

Espen Fuhr Rønquist & Kristian Lauritzen

Analyse av CO₂-basert kuldeanlegg for utendørs isflate og oppvarming av skole og svømmehall

Bacheloroppgave i maskin med fordypning i VVS-teknikk

Veileder: Terje A. Wenaas

Mai 2021

Espen Fuhr Rønquist & Kristian Lauritzen

Analyse av CO₂-basert kuldeanlegg for utendørs isflate og oppvarming av skole og svømmehall

Bacheloroppgave i maskin med fordypning i VVS-teknikk
Veileder: Terje A. Wenaas
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon



Kunnskap for en bedre verden

RAPPORT BACHELOROPPGAVEN

Tittel

Analyse av CO₂-basert kuldeanlegg for utendørs isflate og oppvarming av skole og svømmehall

Analysis of CO₂-based refrigeration system for outdoor ice surface and heating of school and swimming pool

Prosjektnr.

EPT-V-2021-02

Forfattere

Espen Fuhr Rønquist

Kristian Lauritzen

Oppdragsgiver eksternt

SIAT v/ Bjørn Aas

Veileder internt

Terje A. Wenaas

Rapporten er ÅPEN

Dato levert: 20.05.2021

Kort sammendrag

Denne oppgaven er en analyse av et varmepumpesystem for Selbu ungdomsskole. Skolen skal ha en svømmehall, kunstisbane og energibrønn. Det ble utviklet en modell av systemet hvor varmepumpen skal ha en fordampereffekt på 120 kW. Fra sammenligningen av to forskjellige medier, konkluderes det med at saltlake bør benyttes i energibrønnen og kunstisbanen.

This thesis is an analysis of a heat pump system for Selbu ungdomsskole. The school will have a swimming hall, ice surface and energy well. A model of the system was developed where the heat pump will have an evaporator power of 120 kW. From the comparison of two different media, it is concluded that brine should be used in the energy well and the ice rink.

Stikkord: Varmepumpe, CO₂, R744, kunstisbane, energibrønn, svømmehall, skole

Keywords: Heat pump, CO₂, R744, ice rink, energy well, swimming pool, school

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet av Espen Fuhr Rønquist og Kristian Lauritzen.

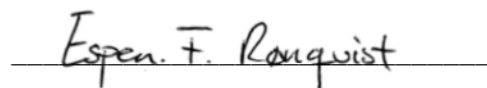
Oppgavens omfang skal tilsvare en studiebelastning på 20 studiepoeng, 1/3 av et årsverk eller ca. 500 timer per student, og er gjennomført ved instituttet for energi- og prosesssteknikk.

Denne oppgaven konkluderer vårt bachelorstudium som maskiningeniør med en fordypning innen Varme-, Ventilasjon- og Sanitærteknikk.

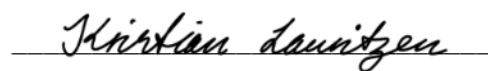
Vi vil benytte muligheten til å takke vår veileder Terje A. Wenaas som har fulgt opp og gitt oss faglig støtte gjennom dette prosjektet. Vi vil også takke Bjørn Aas fra SIAT for tett oppfølging gjennom hele prosessen.

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Trondheim, mai 2021



Espen Fuhr Rønquist



Kristian Lauritzen

Sammendrag

Selbu ungdomsskole skal stå ferdig høsten 2022, og skal brukes primært av ungdomsskoleelever fra 8. trinn til 10. trinn. Skolen skal bygges med plass til 300 personer, og inkluderer en aktivitetssal, 25-meters basseng og en kunstisbane. For at oppvarmingen skal være bærekraftig og effektiv, har Selbu kommune valgt en CO₂-varmepumpe.

CO₂ er ubrennbart, ugiftig og bidrar ikke til nedbrytning av stratosfærisk ozon eller til global oppvarming. Den skiller seg fra andre anlegg på mange måter, blant annet med hensyn på varmeavgivelsesprosessen og hvilke faktorer som påvirker anleggets energieffektivitet. I CO₂-anlegg er det returtemperaturen som bestemmer effektfaktoren. Jo lavere returtemperatur, jo høyere effektfaktor.

I samarbeid med SIAT, Selbu kommune og Norges Teknisk-naturvitenskapelig Universitet (NTNU), er det lagd en modell for et varmepumpesystem til Selbu ungdomsskole. Modellen er utviklet ved å analysere og dimensjonere de forskjellige prosessene i et slikt kjøleanlegg.

Gjennom kartlegging av skolebygget og svømmehallen til Selbu ungdomsskole ble varmebehovet beregnet. Ved bruk av flere metoder og vurderinger er det kommet frem til et totalt oppvarmingsbehov på 174,58 kW, og at varmepumpen skal levere omtrent 150 kW varme.

Ved å dimensjonere varmepumpen etter kuldebehovet får vi et system som harmonerer godt ved ulike driftsforhold, samtidig som at varmebehovet vil være tilfredsstilt. Eventuell overskuddsvarme vil kunne lagres i energibrønner, slik at all energi blir utnyttet.

Ved analyse av systemet så man fordelene ved å benytte kun én fordamper for isbane/solfanger og energibrønn, ettersom man oppnår en jevnere drift. En annen positiv bi-effekt ved bruk av kun én fordamper er at man får opprettholdt sirkulasjon i lakerørene ved at isbanen kan driftes samtidig som det lagres overskuddsvarme i energibrønnene. Ved at begge systemene kan kjøres kontinuerlig, unngår man unødvendig start/stopp og giring av varmepumpen. Én fordamper kombinert med tre gasskjølere, gjør at all varme blir utnyttet. Denne kombinasjonen vil også føre til lavest mulig temperatur på arbeidsmediet før det skal inn i fordamperen.

Ved å sammenligne flere ulike medier for isbanen, endte vi til slutt opp med at saltlake var det mediet som egnet seg best i kjølerørene. Den er ikke giftig og fungerer i energibrønnen. Når det skal legges is er det fornuftig å kjøle 1/3 av banen av gangen.

Abstract

Selbu ungdomsskole will be completed in the autumn of 2022 and will be used primarily by ungdomsskole students from 8th grade to 10th grade. The school will be built with room for 300 people, and includes an activity hall, 25-meter pool and an ice surface. In order for the heating to be sustainable and efficient, Selbu municipality has chosen a CO₂ heat pump.

CO₂ is non-combustible, non-toxic and does not contribute to stratospheric ozone depletion or global warming. It differs from other plants in many ways, including the heat dissipation process and the factors that affect the plant's energy efficiency. In CO₂ systems, it is the return temperature that determines the power factor. The lower the return temperature, the higher the power factor.

In collaboration with SIAT, Selbu Municipality and the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), a model has been created for a heat pump system for Selbu ungdomsskole. The model has been developed by analysing and dimensioning the various processes in such a refrigeration system.

Through mapping of the school building and the swimming pool at Selbu ungdomsskole, the heat demand was calculated. Using several methods and assessments, a total heating demand of 174.58 kW has been reached, and the heat pump will supply approximately 150 kW of heat.

By dimensioning the heat pump according to the cooling demand, we get a system that harmonizes well with different operating conditions, at the same time as the heat demand will be satisfied. Any excess heat can be stored in energy wells, so that all energy is utilized.

Analysis of the system showed the advantages of using only one evaporator for ice surface / solar collector and energy well, as a more even operation is achieved. Another positive side effect of using only one evaporator is that circulation in the paint pipes is maintained by the fact that the ice surface can be operated at the same time as excess heat is stored in the energy wells. Because both systems can be run continuously, unnecessary start / stop and gearing of the heat pump is avoided. One evaporator combined with three gas coolers, means that all heat is utilized. This combination will also lead to the lowest possible temperature of the working medium before it enters the evaporator.

By comparing several different media for the ice surface, we finally ended up with brine being the medium that was most suitable in the cooling pipes. It is non-toxic and works in the energy well. When making ice, it makes sense to cool 1/3 of the course at a time.

Forkortelser

R744 = CO₂ = karbondioksid

NH₄-OH = Ammoniakk

CaCl₂-H₂O = Saltlake

COP = Coefficient of Performance (effekt-faktor)

BRA = Bruksareal

NTNU = Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

SIAT = Senteret for idrettsanlegg og teknolog

ws = water surface (vannoverflate)

VP = Varmepumpe

TEK = Byggteknisk forskrift

Konstanter og symbol

Konstanter

$$c_{p,vann} = \text{Varmekapasitet vann} = 4,2 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\rho_{vann} = \text{Massetetthet vann} = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$I_{opt} = \text{Årlig innstrålt solenergi ved optimal vinkel} = 825$$

$$\bar{\eta}_{sf} = \text{Midlere virkningsgrad for solfanger} = 0,828$$

$$f_A = \text{Korreksjonsfaktor for asimutvinkelen} = 0,81$$

$$f_H = \text{Korreksjonsfaktor for hellingsvinkelen} = 1$$

η_0 = Virkningsgrad uten temperatur differanse

mellom væske og luft temperatur = $0,779 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{k})$

k_1 = Varmetapskoeffisient (konduksjon og konveksjon) = $4,17 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{k})$

k_2 = Varmetapskoeffisient (stråling) = 0,007

$T_{V,vann}$ = temperatur hettvann = 80°C

$T_{K,vann}$ = temperatur kaldt vann = 10°C

Symbol

Δ = Endring i parameter

E = Energi = kWh

V = Volum, liter = l

T = Temperatur = $^\circ\text{C}$

m = Masse = kg

Q = Effekt = kW

Q_H = Overskuddsvarme = kW

Q_L = Tilført varme = kW

h = entalpi = $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

t = tid, timer = h

N = effektbehov = kW

$T_{bereder,max}$ = temperatur fullt oppladet bereder = $^\circ\text{C}$

$T_{bereder,min}$ = temperatur fullt utladet bereder = $^\circ\text{C}$

q = nødvendig volumstrøm

$\bar{T}_v$ = Midlere væske temperatur i solfanger (gjennomsnitt tur, retur)

$\bar{T}_L$ = Lufttemperatur rundt solfanger (utetemperatur)

E_g = Solintensitet

Innholdsfortegnelse

Forord.....	II
Sammendrag	III
Abstract	IV
Forkortelser	V
Konstanter og symbol	V
Konstanter	V
Symbol	VI
Figurliste	X
Tabelliste.....	XI
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål	1
1.3 Omfang og begrensninger	1
2 Teori.....	2
2.1 CO ₂ som arbeidsmedium i varmepumper	2
2.2 COP	3
2.3 Isflate	3
2.4 Solfanger	4
2.5 Energibrønn.....	5
2.6 Bitzer software	6
2.7 Simien.....	6
3 Forutsetninger	6
3.1 Kravspesifikasjon fra Selbu kommune	7
4 Metode	9
4.1 Skolebygget.....	9
4.2 Svømmehallen.....	9

4.3 Tappevann	10
4.4 Varmepumpe	11
4.5 Kunstisbane	11
4.6 Kunstisbane som solfanger.....	12
4.7 Energibrønn.....	13
5 Resultat	14
5.1 Energibruken til skolebygget og svømmehallen	14
5.1.1 Skolebygget	14
5.1.2 Svømmehallen	15
5.1.3 Samlet behov	16
5.2 Akkumulering av varmt forbruksvann	17
5.3 Varmepumpe	18
5.3.1 BITZER simuleringer etter kuldebehov	18
5.3.2 BITZER simuleringer ved opprettholding av isflate	19
5.4 Kunstisbane	20
5.4.1 Oversikt over Kunstisbane.....	20
5.4.2 Medier i kunstisbanen og en oversikt over aktuelle vannmengder.	21
5.5 Kunstisbane som solfanger.....	22
5.6 Energibrønn.....	23
5.7 SIMIEN simuleringer av skole.....	24
6 Analyse og diskusjon	28
6.1 Energibruk for skolebygget og svømmehall	28
6.1.1 Utreget og simulert energibruk og effektbehov for skolebygget.....	28
6.1.2 Svømmehallens energibruk sammenlignet med Enovas byggstatistikk.....	29
6.1.3 Hvor mye av effektbehovet bør varmpumpen dekke?	31
6.2 Forbruksvann.....	32
6.3 Energisystemet	33

6.3.1 Sammenligning av systemutforming	33
6.3.2 Styring av varmpumpen ved Selbu kommune	34
6.3.3 Varmebehov til svømmehall og skolebygg uten drift av isflate	36
6.3.4 Varmebehov til svømmehall uten drift av isflate	37
6.3.5 Varmeflyt ved drift av isflate.....	38
6.3.6 Varmpumpe dimensjonering.....	39
6.4 Kunstisbanen	41
6.4.1 Sammenligning av medier som vi har studert	41
6.4.2 Vurdering av hastighet, trykktap og sirkulasjonspumpe	42
6.4.3 Vann som medier i banedekket for sammenligning	43
6.4.4 Lokale værforhold og varmelaster.....	44
6.5 Solfanger og utnyttelse av energibrønn.....	45
6.5.1 Solfanger.....	45
6.5.2 Energibrønn sett i sammenheng med solfanger.....	47
6.6 Kostnad for oppvarmingsbehovet	48
7 Konklusjon.....	50
8 Videre arbeid.....	51
Referanser	52

Figurliste

Figur 1 Transkritisk prosess (Stene, 2004)	3
Figur 2 Illustrasjonsbilde (Kunstisbaner.no).....	4
Figur 3 Selbu ungdomsskole (Selbu, 2019).....	7
Figur 4 Oversikt over Selbu ungdomsskole (Selbu, 2019).....	7
Figur 5 Systemtegning for Selbu ungdomsskole	18
Figur 6 Månedlig netto energibehov for Selbu ungdomsskole fra SIMIEN.....	25
Figur 7 Årlig energibudsjett for Selbu ungdomsskole fra SIMIEN.....	26
Figur 8 Resultatet av TEK17 evaluering fra Simien for skolebygget i Selbu	26
Figur 9 Energiramme fra TEK17 evaluering for skolebygget i Selbu.....	27
Figur 10 Utklipp fra Vedlegg 4 fra Enovas byggstatistikk	30
Figur 11 Enova byggstatistikk, kategori Skolebygg Vedlegg 4	31
Figur 12 Prinsippskisse for varmeanlegg på Jøa (Jøa, 2016).....	33
Figur 13 Systemtegning for Selbu ungdomsskole	34
Figur 14 Kald side av varmepumpesystemet	35
Figur 15 Varm side av varmepumpesystemet.....	36
Figur 16 Varmeflyt i systemet ved varmebehov til svømmehall og skole uten at det legges is	37
Figur 17 Varmeflyt i systemet ved varmebehov til kun svømmehall	38
Figur 18 Varmeflyt i systemet ved varmebehov til svømmehall og skolebygg ved drift av isflate.....	39
Figur 19 Område bilde rundt Selbuskole	42
Figur 20 Oversikt over temperatur Selbu (MET, 2021)	45
Figur 21 Gjennomsnittlig temperatur Selbu	46
Figur 22 Effekt ved gjennomsnittlig skydekke.....	46
Figur 23 TEK07 med tilførsel av energi til det geotermiske lageret (EiT, 2010).....	48

Tabelliste

Tabell 1 Energibruk for skolebygg fra Enovas byggstatistikk.....	14
Tabell 2 Resultater for skolebygget i Selbu.....	15
Tabell 3 Energibruk for svømmehaller per år fra FAEC	15
Tabell 4 Resultater for svømmehallen	16
Tabell 5 Samlet energibehov for skolebygget og svømmehallen	16
Tabell 6 Antatt antall forbrukere av svømmehall	17
Tabell 7 Beregnet kapasitet.....	17
Tabell 8 Sammenligning av energi- og effektbehov.....	17
Tabell 9 Resultater fra BITZER med fordampereffekt for kuldebehovet.....	19
Tabell 10 Resultater fra BITZER med fordampereffekt for opprettholding av isflate	20
Tabell 11 Oversikt kunstisbane.....	20
Tabell 12 Vannmengder, hastighet og oppdeling av bane	21
Tabell 13 Forutsetninger for utregning av solfangereffekt (Zijdemans, 2018)	22
Tabell 14 Forutsetninger og konstanter for utregning av solfangereffekt (Zijdemans, 2018).22	
Tabell 15 Forklaring av solintensitet	22
Tabell 16 Solintensitet 2020 Selbu kommune	23
Tabell 17 Resultat for beregning av utbytte fra solfanger	23
Tabell 18 Utregning av energibrønnen	24
Tabell 19 Energibruk til oppvarming fra SIMIEN	28
Tabell 20 Sammenligning for energibruk mellom Simien og utregning for skolebygget	29
Tabell 21 Sammenligning for svømmehallen	31
Tabell 22 Varmepumpens dekning av effektbehovet	32
Tabell 23 Ytelser fra Jøa flerbrukshall (Jøa, 2016).....	40
Tabell 24 Ytelser ved forskjellige varmekilder	40
Tabell 25 Medier sammenlignet med vann.....	44
Tabell 26 Resultat solfanger	46
Tabell 27 Sammenligning av årlig pris for oppvarming ved drift av isbane	48
Tabell 28 Sammenligning av årlig pris for oppvarming ved drift av energibrønn	49
Tabell 29 Sammenligning av årlig pris for oppvarming ved drift av solfanger.....	49

1 Innledning

I et samfunn som streber etter å utnytte energi på en bærekraftig og effektiv måte, er det viktig å bruke et naturlig arbeidsmedium i varmepumpen. Når varmepumpen skulle tilpasses bruken til Selbu ungdomsskole ble CO₂ valgt som arbeidsmedium for varmepumpen. For at dette systemet skal fungere er det viktig med en god analyse som skal konkludere med dimensjonerende kapasitet, samt en vurdering av hva som er best mulig drift av et slikt kuldeanlegg.

1.1 Bakgrunn

En kuldeteknisk prosess basert på CO₂ som arbeidsmedium gir interessante muligheter med hensyn på både utnyttelse av kjøle- og varmelytelse i et skolebygg. Bakgrunnen for oppgaven kom opprinnelig fra Selbu kommune. De skal sette opp en ny skole med innvendig svømmehall, oppvarming ved ventilasjon og en utendørs isflate som også skal brukes som en varmekilde om vinteren. I samarbeid med SIAT, Winns AS og Selbu kommune, fikk vi i oppgave å utvikle en modell, analysere og dimensjonere de forskjellige prosessene i et slikt kjøleanlegg ut ifra varme- og kuldebehov.

1.2 Mål

Målet for oppgaven er å analysere bruken av et CO₂-basert kuldeanlegg. Det skal gjøres ved å analysere de forskjellige prosessene i et slikt anlegg. Gjennom å kartlegge varme- og kjølebehovet til de ulike varmepostene for et slik skolebygg, vil resultatene fortelle hva som er best mulig drift av et slikt system.

1.3 Omfang og begrensninger

Denne oppgaven er av teoretisk natur, og det vil derfor ikke finnes målte data for de foretatte beregningene. Det vil heller ikke påløpe noen store økonomiske utgifter på bakgrunn av dette. Alle data er hentet fra eksisterende målinger, andre rapporter og artikler. Der det er behov for bruk av antagelser, er det forsøkt å få de så virkelighetsnære som mulig.

Denne oppgaven vil heller ikke ta hensyn til svingningene i strømpris og fjernvarme, da disse vil variere ved effektbehov og energibruk.

2 Teori

I denne delen blir grunnleggende teori for analysen presentert.

2.1 CO₂ som arbeidsmedium i varmepumper

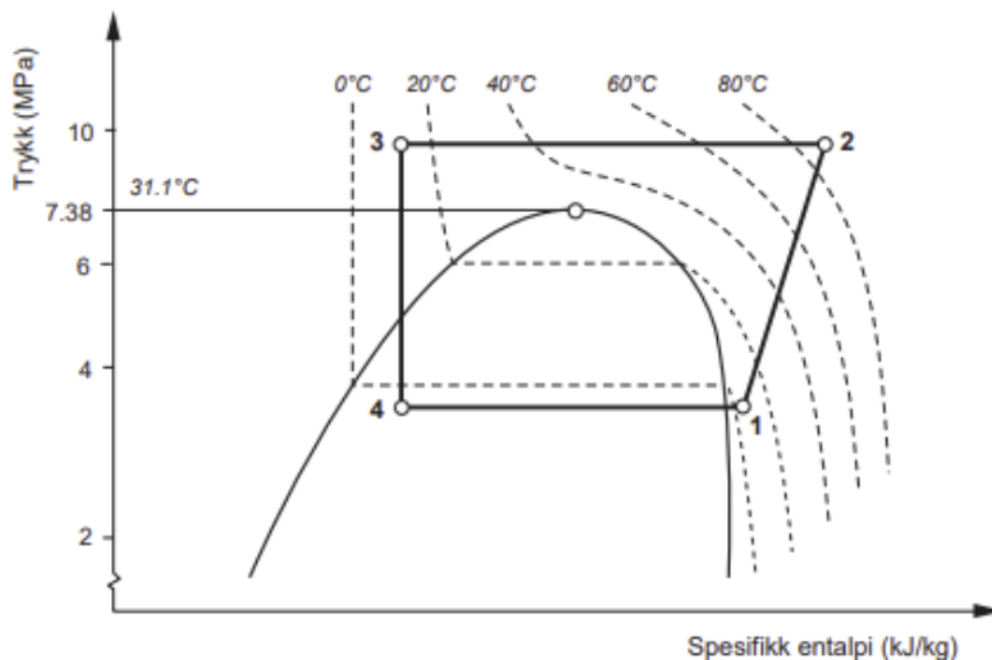
Karbondioksid (R744, CO₂) er et miljøvennlig alternativ til konvensjonelle arbeidsmedier i varmepumper og kjøleanlegg, ettersom mediet er ubrennbart, ugiftig og ikke bidrar til nedbrytning av stratosfærisk ozon eller til global oppvarming. Når CO₂ brukes som arbeidsmedium i varmepumper regnes den ikke som en drivhusgass, da anleggene fylles med overskudds-CO₂ fra industrien, dermed vil det ikke produseres ny CO₂.

Varmepumpe- og kjøleanlegg med CO₂ som arbeidsmedium skiller seg imidlertid fra konvensjonelle anlegg på mange måter, blant annet med hensyn på varmeavgivelsesprosessen og hvilke faktorer som påvirker anleggets energieffektivitet (COP). Effektfaktoren for konvensjonelle anlegg påvirkes i stor grad av turtemperaturen i varmedistribusjonsanlegget, mens i CO₂-anlegg er det returtemperaturen som bestemmer effektfaktoren. Jo lavere returtemperatur, jo høyere effekt-faktor (Stene, 2004).

På grunn av det lave kritiske trykket for CO₂, vil en CO₂-varmepumpe operere i en transkritisk prosess med varmeopptak ved trykk under det kritiske punktet for CO₂. Ved overkritisk trykk avgis varme ved nedkjøling av høytrykks gass, og ikke ved kondensasjon som i konvensjonelle varmepumper (Stene, 2004).

I figur 1 er den transkritiske varmepumpeprosessen med CO₂ som arbeidsmedium illustrert i et trykk-entalpidiagram (p-h diagram).

- 1 – 2: Kompressor: kompresjon av CO₂-gass fra underkritisk til overkritisk trykk
- 2 – 3: Gasskjøler: varmeavgivelse ved nedkjøling av CO₂-gass ved konstant trykk
- 3 – 4: Strupeventil: struping/ekspansjon av CO₂-gass fra overkritisk til underkritisk trykk
- 4 – 1: Fordamper: varmeopptak ved konstant underkritisk trykk og konstant temperatur



Figur 1 Transkritisk prosess (Stene, 2004)

2.2 COP

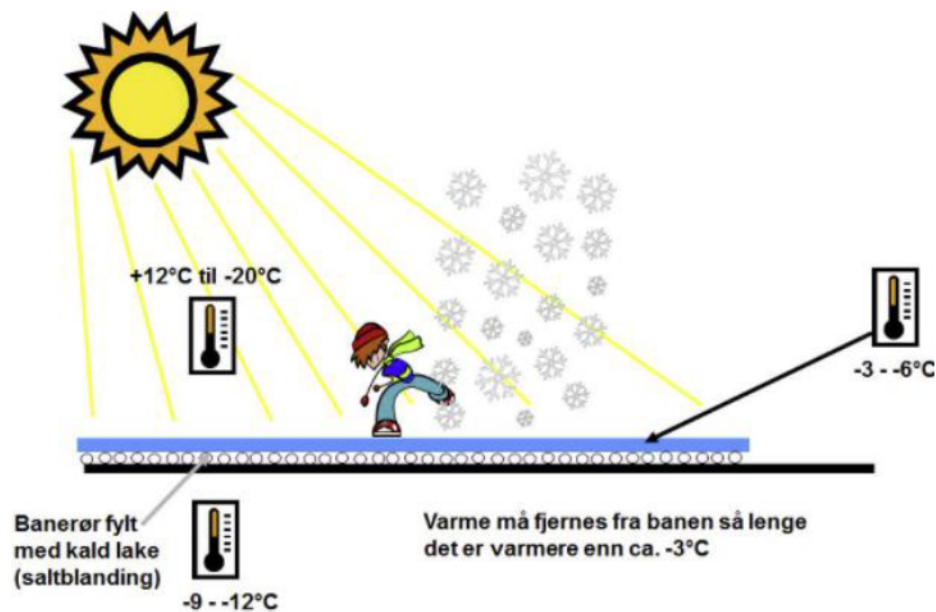
Effektfaktor, eller COP-faktor, beskriver forholdet mellom energien som tilføres og energien som hentes ut av prosessen. COP avhenger av temperaturen til varmekilden, og hva som er ønsket levert temperatur til varmesystemet.

For å oppnå et mest mulig effektivt anlegg, bør COP-faktoren bli så høy som mulig. Akkurat hvor mye varme som kan hentes ut avhenger av egenskapene til kjølemediet og utforming og drift av anlegget. Om det skal hentes ut både varme og kjøling av en prosess er det hensiktsmessig å summere energien for å finne en total COP for en prosess.

Ved lav temperatur i fordampere, må kompressorene arbeide mer for å oppnå en ønsket effekt. COP blir dermed dårligere. Lave temperaturer i fordampere kan være på grunn av varmekilden, som for eksempel en isflate.

2.3 Isflate

Selbu skal ha en kunstisbane tilknyttet skoleområdet. Den skal være utendørs, noe som byr på en del utfordringer. Faktorer som sol, vind, nedbør og flombelysning vil påvirke denne prosessen. Isflaten skal bruke så lite energi som mulig og fjerne varme fra overflaten av isen og inn i kulderørene (Havellen, 2021). Oppbygningen av en kunstisbane er illustrert i figur 2.



Figur 2 Illustrasjonsbilde (Kunstisbaner.no)

Det skal være mulighet til å hente ut varmen i kulderørene, slik at den skal bli brukt til oppvarming av blant annet varmebatteriet til ventilasjonsaggregatet, tappevann og vedlikeholdsvarming av svømmebasseng. Normalt sett vil kjøleanlegget ikke driftes ved temperaturer under -3 til -5°C (Havellen, 2021).

Utenfor driftssesongen av kunstisbanen skal anlegget være klart til å kunne brukes som solfanger.

2.4 Solfanger

Det er hovedsakelig det lokale været som påvirker hvor stor effekt som når jordoverflaten. Man kan angi solens effekt etter skydekke.

- Blå himmel: 1000 W/m²
- Lett skydekke: 600 W/m²
- Overskyet: 300 W/m²
- Vinterdag: 100 W/m²

Normalt deles solstråling inn i direkte og diffus stråling. Den diffuse strålingen skapes ved at direkte stråling fra solen reflekteres og absorberes i skyer så den nærmest stanses fullstendig. Det som deretter treffer jordoverflaten kalles for diffus (eller indirekte) stråling.

Den energimengden som kan utnyttes fra solen påvirkes av antall soltimer, lokalisering, refleksjon og absorbering i skyer, samt vinkelen det absorberende objektet har i forhold til horisontalplanet.

I Norge varierer energimengden på en horisontal flate fra 600-700 kWh/(m² år) i nord, til ca 800 kWh/(m² år) på Vestlandet og opp til 900 kWh/(m² år) i øst og sør.

Om man ser på en bolig på Sørlandet på ca 150 m² grunnflate kan den motta ca 135 MWh energi fra solen i løpet av et år. Det vil si, om man har et energibehov på 25 00 kWh/år, er altså solenergien 5-6 ganger høyere en behovet. Utfordringen er å kunne utnytte denne energien til å dekke boligens energibehov (Zijdemans, 2018).

En metode for å utnytte noe av solenergien kan være en bakkesolfanger som er sammenkoblet til en varmepumpe eller energibrønner. På denne måten kan noe av energien bli brukt til oppvarming eller lagres for senere bruk.

2.5 Energibrønn

Grunnvarme er et indirekte system der en kollektorslange plasseres i en borebrønn. Varme overføres til brønnen fra omkringliggende berg og eventuell grunnvannsgjennomstrømning. En frostsikker væske sirkulerer i slangen og varme tilføres fra berget til varmepumpen.

Boredybden varierer med bergtemperaturen, avstanden ned til berget og ønsket effekt. Normal dybde er mellom 80 og 200 meter for en energibrønn. Varmeeffekten på uttaket kan variere mellom 20 og 80 W/m. Dersom et borehull er tørt, og det er minimalt med gjennomstrømning av grunnvann, bør luftrommet mellom bergveggen og kollektorslangen fylles med et bedre varmeledende materiale enn luft. Ved å tilsette vann, sand eller betong økes varmeledningsevnen. Varmeledningsevnen for vann økes fra ca 0,6 til 2,3 W/(m K) når det fryser til is og har tilnærmet lik varmeledningsevne som betong og sand.

Bergtemperaturen er avhengig av bergtype og utnyttelse av termisk lager, men ligger som regel i området -3 til 8 °C over året (Zijdemans, 2018).

Fordelen med grunnvarme er at den i sommerhalvåret kan benyttes til passiv kjøling. Om det ikke er stor gjennomstrømning vil man få et termisk lager. Altså kan overskuddvarmen fra sommeren nyttiggjøres om vinteren. Gjennomsnittlig bergtemperatur vil også bli noe høyere om sommeren. For å se på effektene man kan forvente fra et slikt system, finnes det en del programvarer som er utviklet.

2.6 Bitzer software

Bitzer software er et simuleringsverktøy utviklet av kompressorleverandøren Bitzer. Simuleringsverktøyet kan benyttes til å finne teoretisk COP som varmepumpen klarer å levere. Den gir også verdier på gasskjølerytelse og temperaturer på mediet inne i selve varmepumpen (Bitzer, 2018).

2.7 Simien

Simien er et simuleringsverktøy for beregning av energibruk og vurdering av inneklime i bygninger. Bruksområdet er evaluering mot byggeforskrifter, energimerking, beregning av årlig energibehov, validering av inneklime og dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og romkjøling (Simenergi, 2020).

3 Forutsetninger

Den nye skolen på Selbu skal stå ferdig høsten 2022, og skal brukes primært av ungdomsskoleelever fra 8. trinn til 10. trinn. I tillegg til nødvendige arbeidsplasser for lærere og inntil 180 elever, inneholder skolen et amfi med plass til 300 personer, aktivitetssal, 25-meters basseng og en kunstisbane. Den nye ungdomsskolen skal bygges nedenfor dagens skole der det i dag er en håndballbane.

Den nye skolen blir en bygning på to etasjer over terreng. Bygningen består i hovedsak av to deler, skolebygg og svømmehall. Skolebygget inneholder klasserom, lærerrom, kultursal med scene, aktivitetshall, bibliotek, lager og øvrige rom.

Figur 3 og 4 viser Selbu ungdomsskole og plassering av bygg.



Figur 3 Selbu ungdomsskole (Selbu, 2019)



Figur 4 Oversikt over Selbu ungdomsskole (Selbu, 2019)

3.1 Kravspesifikasjon fra Selbu kommune

Her er sentrale data fra kravspesifikasjonen til Selbu kommune gjengitt. Oppgaven bygger på disse inndataene. Her har vi hentet ut og gjengitt det som er relevant for oss.

Bygget skal utstyres med et komplett vannbårent varmeanlegg. Varmeanlegget skal baseres på egenprodusert geovarme (energibrønner) koblet opp mot en CO₂ basert væske/vann varmpumpe. Varmepumpen skal betjene oppvarming av varmekrets, gulvarme, gatevarme, ventilasjonsvarme, oppvarming av tappevann og vedlikeholdsvarme av bassengvann. Varmepumpen skal også håndtere en isbane i form av innfrysning og vedlikehold av is. Det totale effektbehovet for VP er ca 120 kW (2x60kW).

Varmepumpen skal tilknyttes energibrønner basert på bergvarme med kollektorslanger og kjølesystemet for isbane. Spisslast og backup for varmeanlegget skal være fjernvarme fra et lokalt flisfyringsanlegg, som skal ha kapasitet til å dekke 100 % av totalt effektbehov om varmepumpen skulle svikte. Ved oppfylling av bassengvann og temperaturheving fra 28 °C til 34 °C skal fjernvarme benyttes som tilleggsvarme.

Varmeoverskuddet i bygget og fra isbanen skal utover vedlikeholdsvarme for basseng, lagres i energibrønnene ved kjøledrift. Varmeanlegget skal være mengdestyrt ut fra temperatur og må utformes slik at varmepumpens interne sirkulasjonspumpe ikke forstyrres av varmeanleggets drift.

Varmepumpen skal utformes som et lukket system. Kapasiteten på varmepumpen skal som minimum fordeles på to kompressorer. Begge kompressorer skal utstyres med frekvensomformer. Anlegget må bygges opp slik at unødvendig mange start stopp ikke oppstår, selv ikke på minimumsbelastning. Det er viktig at VP dimensjoneres riktig og at kompressorene skal ha en myk start. Akkumulatortanker skal utformes for godsjikting og det skal unngås turbulent strømming ved varierende varmeuttak.

Det er viktig at forbrukssteder kobles i serie, med varmest forbrukssted først, og deretter videre til forbrukssteder som krever lavere temperaturer.

Fjernvarmen skal ikke kunne være i drift om varmepumpen klarer belastningen alene. Varmepumpen skal ivareta best mulig gasskjølertrykkregulering ved alle driftsforhold.

Bergvarmepumpen skal dimensjoneres slik at varmepumpen får best mulig driftstid med hensyn på investeringskostnad kontra innsparing ved drift, samt sikre varmepumpen mot driftsstans ved riktig dimensjonering av størrelse og minimumsdrift.

Antatte effekter og dimensjoneringstall:

Fordamperytelse: 120 kW

Kondensatorytelse: 160 kW

Anslått effekt ved 120 kW kjøling ved -12 gir 160 kW varme, varmeanlegget skal kunne ta imot denne effekten. Varmeoverskuddet i bygget og fra isbanen skal utover vedlikeholdsvarming av basseng, lagres i energibrønnene ved kjøledrift.

Anlegget er dimensjonert for 120/80 bar stillstandtrykk som minimum. (Selbu, K., 2019)

Hvordan vi har tenkt å innfri disse kravene er beskrevet i metode.

4 Metode

I dette kapitlet beskrives metodene som er brukt for å løse oppgaven. Bakgrunn for inndata og klimaprofil er hentet fra Selbu kommune. Videre har vi tatt for oss beregninger som er innenfor vår rekkevidde med tanke på tidsbegrensinger og ressurser.

Vi har hatt jevnlige møter med veileder Terje A. Wenaas og medveileder Bjørn Aas ved SIAT, hvor de har delt sin kunnskap og tidligere erfaringer. Dette har hjulpet oss til å oppnå en bedre forståelse.

Ved områder hvor det har vært lite litteratur, ble det gjort antagelser for å bestemme et realistisk estimat. Når vi har innhentet annen informasjon har vi vært kritiske og reflektert over funn og resultat, for å avgjøre om innholdet kunne brukes i oppgaven.

Det er viktig å huske at hvert skolebygg er forskjellig. Dette gjelder også svømmehall og utendørs isflater. Likevel er de basert på de samme prinsippene og utregningsmetoder. Utgangspunktet for oppgaven er Selbu ungdomsskole og det har derfor vært naturlig å bruke konkrete verdier for å komme frem til et realistisk resultat.

4.1 Skolebygget

For utregning av skolebyggets effekt- og energibehov ble det brukt verdier fra Enovas byggstatistikk. Det ble antatt at oppvarmingsbehovet var 40% av den totale energibruken til skolebygget. Denne antagelsen er på bakgrunn av simuleringer som ble utført i Simien.

4.2 Svømmehallen

For å dimensjonere varmebehovet til svømmehallen ble gjennomsnittsverdier hentet fra rapporten «Energy-use in Norwegian Swimming halls». I denne rapporten er svømmehaller delt inn i tre kategorier som gir energiforbruk for svømmehaller per kvadratmeter vannoverflate per år:

1. Anlegg opp til $300 \text{ m}^2 = 4419 (+/- 2219) \text{ kWh/m}^2 \text{ ws}$
2. Anlegg fra $301\text{-}600 \text{ m}^2 = 3608 (+/- 1786) \text{ kWh/m}^2 \text{ ws}$
3. Anlegg med mer enn $600 \text{ m}^2 = 4303 (+/- 1463) \text{ kWh/m}^2 \text{ ws}$

Deretter multipliserer vi inn arealet av svømmebassengets overflate (25x20 m) og dividerer på antall driftstimer per år.

For svømmehallen ble det satt en dekningsgrad på 50 % av det totale energibehovet for svømmehallen. Dette begrunnes med at det er mindre teknisk utstyr og et større behov for oppvarming, da svømmebassenget krever konstant tilskudd av friskt, oppvarmet vann.

Det forventes et høyt spesifikt energibruk, ettersom svømmebassenget dekker en stor del av det totale arealet for svømmehallen (Wolfgang Kampel, 2012).

4.3 Tappevann

For å sikre at det er nok varmt tappevann til å dekke minimumsbehovet til skolen og svømmehallen, bruker vi forenklet dimensjonering (KS, 2019).

«Forbruksvann til svømmehaller krever ca. 50 liter med ferskvann per besøkende» (Bjørn Aas). Det antas at det vil være ett skoletrinn i svømmehallen om gangen, to ganger daglig. Et trinn består av fire klasser med 20 badende samtidig, og i tillegg 30 besøkende på kveldstid. Utenom skolens bruk, er det tatt utgangspunkt i innbyggertallet til Selbu og multiplisert med to for å danne et estimat for antall besøkende til svømmehallen i løpet av et år.

Her blir det presentert noen krav til oppvarmingen av forbruksvannet:

- Systemet skal kunne varme opp kaldt forbruksvann ved inntakstemperatur, 10 °C, og opp til settpunkt for legionellasikring, 80 °C.
- Driftstid i SD-anlegg til 15 timer per dag.
- Massetetthet til vann ble satt til 1000 kg/m³
- Varmekapasiteten til vann ble satt til 4,2 kJ/(kg °C)

For å finne volumet av varmtvannsbereder, ble formelen for nødvendig volum brukt:

$$N\ddot{o}dvendig\ volum, V = \frac{E}{\rho_{vann} * c_{p,vann} * (T_{bereder,max} - T_{bereder,min})}$$

Formelen krever utregning av energibehovet:

$$Energibehov, E = N * t$$

Energibehovet krever at man vet effektbehovet:

$$Effektbehov, N = q * \rho_{vann} * c_{p,vann} * (T_{V,vann} - T_{K,vann})$$

Fra disse opplysningene er det mulig å finne størrelsen til en eventuell el-kolbe som skal ettervarme vannet til ønsket temperatur.

Minimum effektbehov for el-kolbe:

$$Minimum\ effektbehov, N_{min} = \frac{E}{24h}$$

Størrelsen til el-kolben er basert på energibehovet gjennom driftstiden:

$$St\ddot{o}rrelse\ el - kolbe, N = \frac{E}{driftstid}$$

En sikkerhet på 10% etter utregning ble lagt til for å være sikker på at el-kolben dekker oppvarmingsbehovet for varmt tappevann.

4.4 Varmepumpe

For å danne et godt bilde av varmepumpens ytelse, er simuleringsverktøyet til BITZER benyttet.

4.5 Kunstisbane

Standarden for kunstisbaner er noe mangelfull, men bransjen har opparbeidet noen «nøkkeldata». Man regner gjerne med 175W/m² (Havellen, 2021). Ettersom banen har et areal på 900 m² får vi ett effektbehov på rundt 157,5 kW. Dette overskrider kjølebehovet fra

Selbu kommune, og er derfor justert ned til 140 W/m² for å imøtekomme kravspesifikasjonen.

For å dimensjonere kjølerørene i banedekket, ble det beregnet strømning, vannmengde og vannhastighet. I beregningene er det tatt utgangspunkt i at det legges is på deler av banen, og derfor er den delt inn i tre deler.

Utgangspunkt for totalt kjølebehov:

$$140 \text{ W/m}^2 * 900 \text{ m}^2 = 126 \text{ kW}$$

Formel benyttet for å finne vannmengde i rørsøyfer:

$$\dot{V} = \frac{Q}{\rho * c_p * \Delta T}$$

Formel benyttet for å finne vannhastighet:

$$v = \frac{q}{(1000 * A)}$$

Formel benyttet for å finne Reynolds-tallet for å undersøke at vi oppnår turbulent strømning:

$$Re = \frac{\rho * U * d}{\mu}$$

4.6 Kunstisbane som solfanger

Solfanger er ikke utbredt i Norge da solen er mer eller mindre fraværende store deler av året. Ved å kombinere et system hvor man har en isbane om vinteren og solfanger om sommeren kan man begynne å se på nytteeffekten ettersom isflaten allerede var tiltenkt. For å komme frem til hvor mye man kan hente ut av isflaten om sommeren benyttes litteratur fra Zijdemans vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer (Zijdemans, 2018).

Forutsetningene for bruk av denne regnemodellen bygger på klimaprofil fra Selbu kommune hvor det er tatt utgangspunkt i lett skydekke og en gjennomsnittstemperatur for de aktuelle sommermånedene. I Midt-Norge er midlere global solinnstråling 4,00 - 4,50 kWh/(m²*døgn) i juli måned. For å sammenligne det med en energimengde, tilsvarer dette omtrent energien som brukes for to normaldusjer (Zijdemans, 2018).

For å regne ut midlere virkningsgrad i solfanger om sommeren ble virkningsgrad formelen brukt:

$$\eta_{sf} = \eta_0 - k_1 \frac{(\bar{T}_v - \bar{T}_L)}{Eg} - k_2 \frac{(\bar{T}_v - \bar{T}_L)^2}{Eg}$$

Videre benyttes midlere temperatur i mediet, benytter da midlere temperatur formel.

$$\bar{T} = \frac{\Delta T_A + \Delta T_B}{2}$$

Energiutbytteformelen benyttes så for å se hvor mye som er mulig å hente ut ifra isflaten:

$$Q_{utb} = I_{opt} * \eta_{sf} * f_A * f_H$$

4.7 Energibrønn

Da energibrønn er relativt innviklet og krever en del ressurser for å få et konkret tall på hvor mye man kan hente ut ved de forskjellige bruksmønstrene, ble det sett på en rapport fra Ekspert i Team (EiT, 2010) og en artikkel fra Sintef skrevet av Unni Skoglund (Skoglund, 2010). for å komme frem til et estimat. For å kartlegge hvor mange brønner som er nødvendig ble det valgt et intervall for effektuttaket på 10-80 W/m. Effektuttak er hvor stor effekt hver brønn kan levere.

5 Resultat

Her presenteres resultatene fra utregningene, som energibehovet til skolen og svømmehallen, samt hvor mye forbruksvann som bør akkumuleres. Deretter vil resultatene fra simuleringene utført i Bitzer, samt varmetilskuddet fra isflate og energibrønner bli beskrevet. Til slutt vil resultatet fra simuleringen utført i Simien legges frem. Resultatene vil bli kommentert i «6 Analyse og diskusjon».

5.1 Energibruken til skolebygget og svømmehallen

Her presenteres utregningene av energibruk. Dette gjelder resultatene for skolebygget og svømmehallen.

5.1.1 Skolebygget

Tabell 1 gjengir gjennomsnittlige verdier for energiforbruket i skolebygg i Norge. Verdiene for energibruk i skolebygg er hentet fra Tabell 4-1 i Enovas byggstatistikk (Enova, 2017).

Enova byggstatistikk Tabell 4-1		
Temperatur- og stedskorrigert spesifikk energibruk:		
Gjennomsnitt	156.00	kWh/m ²
Arealvektet	140.00	kWh/m ²
Virkelig spesifikk energibruk:		
Arealvektet	133.00	kWh/m ²

Tabell 1 Energibruk for skolebygg fra Enovas byggstatistikk

Driftsdager og driftstid i tabell 2 ble satt til 200 dager i året, med en driftstid på 10 timer, for eksempel kl. 8.00 til 18.00. Hvor mye av energibruken som skal brukes til oppvarming av skolebygget ble henholdvis satt til 40 %.

Gjennomsnittlig energibruk i tabell 2 er resultatet av gjennomsnittet av verdiene fra tabell 1.

Resultat Skolebygg per år		
Gjennomsnittlig energibruk	143.00	kWh/m ²
BRA for skolebygg	3314.00	m ²
Driftstimer per dag	10.00	h
Driftsdager per år	200.00	dager
Driftstid per år	2000.00	h
Energibruk til oppvarming	40%	
Spesifikk energibruk oppvarming	57.20	kWh/m²
Energibruk oppvarming	189560.80	kWh
Effektbehov oppvarming	94.78	kW

Tabell 2 Resultater for skolebygget i Selbu

5.1.2 Svømmehallen

For utregning av energibehovet for svømmehaller er det vanlig å se på energibruk per kvadratmeter vannoverflate. Verdiene for bygningskategoriene i tabell 3 er hentet fra fig. 4 (Wolfgang Kampel, 2012).

Dette gjør det mulig å kategorisere hvor man havner i FAEC sine metoder for energibruk i svømmehaller. Da arealet for vannoverflaten til Selbu ungdomsskole er på 387,5 m², vil svømmebassenget falle inn under kategori 2. Dette er vist i tabell 3.

Kategorier for energibruk for svømmehaller per år						
1	Facilities up to 300 m ² ws	=	4419.00	(+/-)	2219.00	kWh/m ² ws
2	Facilities between 301 - 600 m ² ws	=	3608.00	(+/-)	1786.00	kWh/m ² ws
3	Facilities with more than 600 m ² ws	=	4303.00	(+/-)	1463.00	kWh/m ² ws

Areal basseng Selbu ungdomsskole 25x15.5 m	=	387.50	m² ws	=>	Kategori 2	
---	----------	---------------	-------------------------	--------------	-------------------	--

Tabell 3 Energibruk for svømmehaller per år fra FAEC

Ved beregning av energibruk til oppvarming av svømmehallen vil dette tilsvare 50 % av det totale energibruken til svømmehallen. Den andre halvdel av energibruket er da pumpearbeid, lys, teknisk utstyr osv. Driftstiden er satt til 24 timer over 365 dager, da

bassenget krever kontinuerlig gjennomstrømming av friskt oppvarmet vann, også når det ikke er noen besøkende.

Tabell 4 viser resultatet for utregning av energibruken for svømmehallen. I våre utregninger er kun gjennomsnittet brukt, og det er ikke regnet med standardavviket på $\pm 1786 \text{ kWh/m}^2 \text{ ws}$ for energibruk til oppvarming av svømmehallen.

Resultat Svømmehall	-	Gj.snitt	+
FAEC kategori 2, (kWh/m ² ws)	1786.00	3608.00	1786.00
Energibruk fra FAEC (kWh)	706025.00	1398100.00	2090175.00
BRA for svømmehall	1141.00 m ²		
Driftstimer per dag	24.00 h		
Driftsdager per år	365.00 dager		
Driftstid per år	8760.00 h		
Energibruk til oppvarming	50%		
Energibruk oppvarming	699050.00 kWh		
Spesifikk energibruk oppvarming	612.66 kWh/m ²		
Effektbehov oppvarming	79.80 kW		

Tabell 4 Resultater for svømmehallen

5.1.3 Samlet behov

Samlet energibruk, spesifikk energibruk og effektbehov ble så funnet ved å summere resultatene fra svømmehallen og skolebygget. Dette er vist i tabell 5.

Resultat for skolebygget og svømmehallen		
Spesifikk energibruk oppvarming svømmehall	612.66	kWh/m ²
Spesifikk energibruk oppvarming skolebygg	57.2	kWh/m ²
SUM spesifikk energibruk	669.86	kWh/m²
Energibruk oppvarming svømmehall	699050.00	kWh
Energibruk oppvarming skolebygg	189560.80	kWh
SUM energibruk oppvarming	888610.80	kWh
Effektbehov svømmehall	79.80	kW
Effektbehov skolebygg	94.78	kW
SUM effektbehov	174.58	kW

Tabell 5 Samlet energibehov for skolebygget og svømmehallen

Summen av effektbehovet er effekten varmepumpen bør levere gjennom et års forbruk ved 100 % dekning av energibehovet.

5.2 Akkumulering av varmt forbruksvann

I tabell 6 og 7 er resultatene fra beregning av akkumuleringstankene presentert. Først ble daglig besøkstall utregnet og vurdert.

Antatt antall forbrukere av svømmehall per dag:	
4+4 klasser med 20 stk elever	160.00 pers
+ besøkende kveldstid	30.00 pers
Besøkende per skoledag	190.00 pers
Antall skoledager	190.00 dager/år
Skoleelever per år	36100.00 pers/år
Befolkning Selbu	4030.00 pers
Sikkerhetsfaktor	2.00
SUM	8060.00 pers
Totalt antall besøkende	44160.00 pers/år
Gjennomsnitt besøkende	120.99 pers/dag
Dimensjonerer etter størst antall besøkende per dag: 190>120	190.00 pers

Tabell 6 Antatt antall forbrukere av svømmehall

For utregning av akkumuleringsvolum ble en sikkerhetsfaktor på 50 % valgt. Dette er en sikkerhet for å unngå for lite oppvarmet forbruksvann.

Kapasitet bereder	
Sikkerhetsmargin for akkumulering	50%
	2.81 m³
Akkumulert volum, $V=E/(ro \cdot cp \cdot (T_{max}-T_{min}))$	2814.81 l

Tabell 7 Beregnet kapasitet

Utregnet akkumulert volum og avrundet volum ble sammenlignet i tabell 8. Volumet er avrundet oppover slik at det passer med et system med 600 liters akkumuleringstanker.

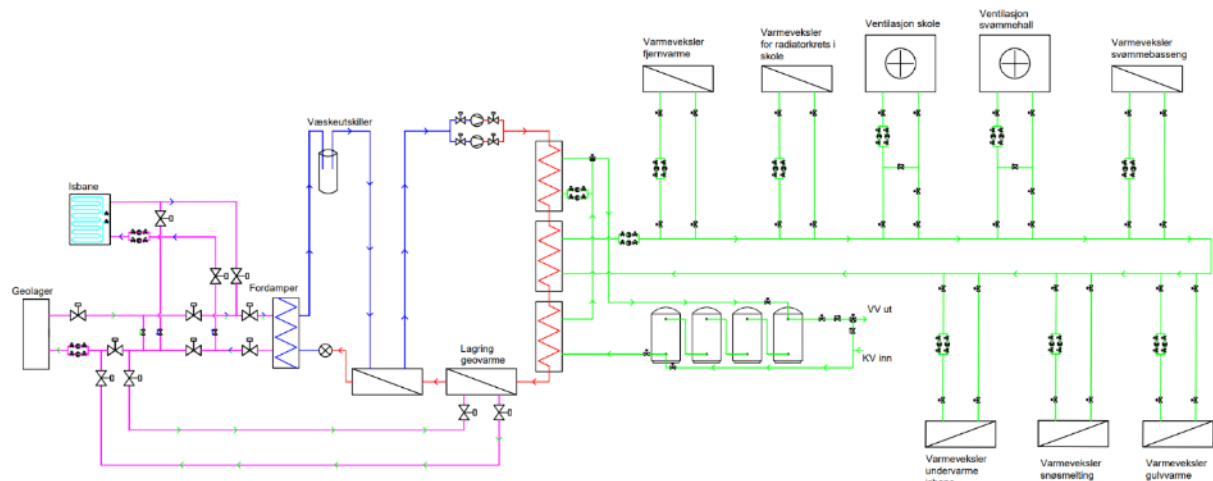
Kumulativ energibruk, for å sammenligne med el-kolbe					
El-kolbens dekning	Utregnet akkumuleringsvolum	Prosjektet volum	En tank		
Volum	2814.81 l	3000.00 l	600.00 l		
Energibehov, E	620.67 kWh	661.50 kWh	132.30 kWh		
Minimum effektbehov, $N_{min}=E/24$	25.86 kW	27.56 kW	5.51 kW		
Driftstid, stilles i SD-anlegg, kan endres etter behov	15.00 h	15.00 h	15.00 h		
Størrelse el-kolbe, $N=E/driftstid$	41.38 kW	44.10 kW	8.82 kW		
+10% sikkerhet => minimum størrelse el-kolbe	45.52 kW	48.51 kW	9.70 kW		

Tabell 8 Sammenligning av energi- og effektbehov

5.3 Varmepumpe

Systemet som er utarbeidet består av et skolebygg, en svømmehall, en isbane (bakkesolfanger), en varmepumpesentral og et geotermisk lager for akkumulering av varme.

Figur 5 viser en systemtegning. Det er valgt å bruke én fordampner, som vist på tegning, i motsetning til et liknende system på Jøa, hvor de har to fordampere.



Figur 5 Systemtegning for Selbu ungdomsskole

5.3.1 BITZER simuleringer etter kuldebehov

For simuleringer i Bitzer ble det gjort noen antagelser og valgt verdier for samtlige simuleringer:

- Skal kun se på MT-stage (kompressor type)
- Det skal være en transkritisk prosess
- Number of compressors skal settes til 2
- Suction line superheat skal settes til 5 K
- High pressure skal settes til 100 bar
- Gas cooler outlet skal settes til det laveste hele tallet som er mulig for driftsforholdet
- Intermed. pressure skal settes så lavt som mulig for det gitte driftsforholdet
- Power frequency skal være 50 Hz
- Power voltage skal være 400 V
- Evaporator capacity ble satt til 120 kW. Her vil Bitzer gjøre små justeringer på denne verdien for å finne den effekten som passer best i forhold til kompressorene.

- Unni Skoglund ved Sintef uttrykker «Lavtemperatur geotermisk energi, eller grunnvarme, kalles det når vi henter jordvarme 150–200 meter ned i bakken. Der er temperaturen mellom 6 og 8 grader celsius» (Skoglund, 2010).
På bakgrunn av dette er det benyttet 6 grader som fordampertemperatur for simulering av energibrønn.
- Ved Marienlyst idrettspark i Drammen oppgir Norconsult herunder V. Havellen at laketemperaturen ligger mellom 5 - 27 °C i sommerhalvåret. På bakgrunn av dette vil 15 °C være et fornuftig utgangspunkt for fordampertemperatur for simulering av solfanger (Havellen, 2019).

Resultatene fra de ulike simuleringene er satt sammen, og er presentert i Tabell 9.

KRAVSPESIFIKASJON SIMULERING	Anslått kjøleeffekt fra kravspekk Selbu kommune Isbane	Anslått kjøleeffekt fra kravspekk Selbu kommune Energibrønn	Anslått kjøleeffekt fra kravspekk Selbu kommune Solfanger
Series	Standard	Standard	Standard
Operating mode	Transcritical	Transcritical	Transcritical
Number compressors	2	2	2
Evaporating SST	-13.00 °C	6,00 °C	15.00 °C
Evaporator superheat	3.00 K	2,00 K	10.00 K
Suction line superheat	5.00 K	5,00 K	5.00 K
High pressure	100.0 bar(a)	100,0 bar(a)	100.0 bar(a)
Gas cooler outlet	23.0 °C	16,00 °C	23.0 °C
Intermed. pressure	40.0 bar(a) / 5.30 °C	44,0 bar(a) / 9,10 °C	54.0 bar(a) / 17.50 °C
Power frequency	50Hz	50Hz	50Hz
Power voltage	400V	400V	400V
COP/EER Evaporator	1.90	3.82	4.69
Compressor	MT-Stage	MT-Stage	MT-Stage
Frequency compressor	--	--	--
Evaporator capacity	120.8 kW	121.7 kW	120.8 kW
Ratio	--	--	--
Gas cooler capacity	188 kW	159.1 kW	152.3 kW
Power input	63.6 kW	31.9 kW	44.4 kW
Current	106.1 A	52.9 A	44 A
Voltage range	--	--	--
Mass flow	2324.0 kg/h	2211 kg/h	2296.0 kg/h
Flashgas mass flow	407.0 kg/h	101.9 kg/h	42.8 kg/h
Total superheat	14.7 K	6.5 K	14.6 K
Dis.ch. gas temp. w/o cooling	126.6 °C	91.9 °C	90.8 °C
optimal high pressure	75 bar(a)	75 bar(a)	75 bar(a)

Tabell 9 Resultater fra BITZER med fordampereffekt for kuldebehovet

5.3.2 BITZER simuleringer ved opprettholding av isflate

Ved opprettholding av isen på isflaten, ble det brukt en lavere Evaporator capacity. Denne ble utregnet basert på at opprettholding av is vil trenge en effekt på 100 W/m² (Havellen, 2019). Ettersom isflaten er 900 m², resulterer dette i en effekt på 90 kW. Denne effekten har vi brukt som Evaporator capacity i simuleringen. Resultatet fra denne simuleringen er presentert i tabell 10.

Opprettholding av isflate	
Series	Standard
Operating mode	Transcritical
Number compressors	2
Evaporating SST	-13,00 °C
Evaporator superheat	3,00 K
Suction line superheat	5,00 K
High pressure	100,0 bar(a)
Gas cooler outlet	23,0 °C
Intermed. pressure	54,0 bar(a) / 17,50 °C
Power frequency	50Hz
Power voltage	400V
COP/EER Evaporator	1.86
Compressor	MT-Stage
Frequency compressor	--
Evaporator capacity	93.2 kW
Ratio	--
Gas cooler capacity	146.4 kW
Power input	50 kW
Current	83.3 A
Voltage range	--
Mass flow	1777 kg/h
Flashgas mass flow	33.1 kg/h
Total superheat	7.5 K
Discharge gas temp. w/o cooling	130.9 °C
optimal high pressure	75 bar(a)

Tabell 10 Resultater fra BITZER med fordampereffekt for opprettholding av isflate

5.4 Kunstisbane

I dette kapittelet presenteres resultat for kunstisbanen.

5.4.1 Oversikt over Kunstisbane

Tabell 11 Viser en oversikt over effekt, areal, inndeling og lengder per sløyfe for isbanen.

Baneandel	1/3	2/3	3/3
Effekt per kvadratmeter	140 W/m ²	140 W/m ²	140 W/m ²
Areal isbane	300 m ²	600 m ²	900 m ²
Effekt isbane	42000 W	84000 W	126000 W
Temperaturdifferanse	3 K	3 K	3 K
Senteravstand sløyfer	0.1 m	0.1 m	0.1 m
Sløyfelengde, tur-retur	60 m	60 m	60 m
Antall sløyfer	50 sløyfer	100 sløyfer	150 sløyfer

Tabell 11 Oversikt kunstisbane

5.4.2 Medier i kunstisbanen og en oversikt over aktuelle vannmengder.

Tabell 12 viser vannmengder, hastighet og strømming i form av reynoldstallet. Reynoldstall er den vanligste dimensjonsløse størrelsen innen strømningsmekanikken, og beskriver om fluidet strømmer laminært eller turbulent. Den kan ses på som et dimensjonsløst mål på viskositeten (snl, 2020).

Her er to av de mest aktuelle mediene satt opp for sammenligning. Vi vil diskutere hvilke kjølemedier som egner seg best i diskusjonen. I våre beregninger har vi benyttet Pex-rør med dimensjon $\varnothing 25 \times 2,3 \text{ mm}$.

1/3 av banen	NH4-OH		CaCl2-H2O	
Massetetthet	971.00	kg/m ³	1248.00	kg/m ³
Dynamisk viskositet	2.50	cP	1.86	cP
	0.00250	Pa*s	0.00186	Pa*s
Varmeoverføringsevne	4.22	kJ/kg*K	3.33	kJ/kg*K
Vannmengde 300 m ²	8.50	l/s	15.00	l/s
Vannmengde per sløyfe	0.17	l/s	0.30	l/s
Hastighet	0.52	m/s	0.92	m/s
Reynoldstall	4123.14		4106.32	
Avlesning i Moody-diagram	4.12E+03		4.11E+03	
Vurdering	Ok		Ok	
2/3 av banen	NH4-OH		CaCl2-H2O	
Massetetthet	971.00	kg/m ³	1248.00	kg/m ³
Dynamisk viskositet	2.50	cP	1.86	cP
	0.00250	Pa*s	0.00186	Pa*s
Varmeoverføringsevne	4.22	kJ/kg*K	3.33	kJ/kg*K
Vannmengde 600 m ²	17.00	l/s	30.00	l/s
Vannmengde per sløyfe	0.17	l/s	0.30	l/s
Hastighet	0.52	m/s	0.92	m/s
Reynoldstall	4123.14		4106.32	
Avlesning i Moody-diagram	4.12E+03		4.11E+03	
Vurdering	Ok		Ok	
Hele banen	NH4-OH		CaCl2-H2O	
Massetetthet	971.00	kg/m ³	1248.00	kg/m ³
Dynamisk viskositet	2.50	cP	1.86	cP
	0.00250	Pa*s	0.00186	Pa*s
Varmeoverføringsevne	4.22	kJ/kg*K	3.33	kJ/kg*K
Vannmengde 900 m ²	25.50	l/s	45.00	l/s
Vannmengde per sløyfe	0.17	l/s	0.30	l/s
Hastighet	0.52	m/s	0.92	m/s
Reynoldstall	4123.14		4106.32	
Avlesning i Moody-diagram	4.12E+03		4.11E+03	
Vurdering	Ok		Ok	

Tabell 12 Vannmengder, hastighet og oppdeling av bane

5.5 Kunstisbane som solfanger

Her presenteres resultatet fra utregninger gjort ved Selbu ungdomsskole hvor kunstisbanen benyttes som solfanger. Her er det brukt en midlere temperatur som danner grunnlaget for resultatet slik at det blir så representativt som mulig. Det vil si at vi har tatt utgangspunkt i beliggenhet og lokale værdata fra metrologiske institutt for skydekke, nedbør og soldager. Medietemperatur og lufttemperatur i tabellen under er satt til henholdsvis 8,5 K og 12K. I grafen som er presentert lenger ned har vi satt inn forskjellige temperaturer for å se på effekt økninger opp mot temperatur svingninger.

I tabell 13 og 14 er konstanter og systemforutsetninger presentert. Disse bygger på tall ut fra beliggenhet og utforming av solfanger.

Forutsetninger			
η_0 :	Virkningsgrad uten temperatur differanse mellom væske og luft temperatur	0,799	W/(m ² *K)
k_1 :	Varmetapskoeffisient (konduksjon og konveksjon)	4,17	W/(m ² *K)
k_2 :	Varmetapskoeffisient (Stråling)	0,0077	
$\bar{T}_v$:	Midlere væsketemperatur i solfanger (gjennomsnitt tur/retur)	8,50	K
$\bar{T}_L$:	Lufttemperatur rundt solfanger (utetemperatur)	12	K
E_g :	Solintensitet	500	W/m ²

Tabell 13 Forutsetninger for utregning av solfangereffekt (Zijdemans, 2018)

Konstanter for en solfanger med planflate presentert (asimutvinkelen), og hvilken virkningsgrad man kan forvente i Selbukommune.

Forutsetninger/konstanter		
I_{opt} :	Årlig innstrålt solenergi ved optimal vinkel	825
$\bar{\eta}_{sf}$:	Midlere virkningsgrad for solfanger	0,82800135
f_A :	Korreksjonsfaktor for asimutvinkelen	0,81
f_H :	Korreksjonsfaktor for hellingsvinkelen	1

Tabell 14 Forutsetninger og konstanter for utregning av solfangereffekt (Zijdemans, 2018)

I tabell 15 er solintensiteten gitte tall som avhenger av skydekket disse verdiene er hentet fra Vannbaserte oppvarmings og kjølesystemer (Zijdemans, 2018).

Solintensitet	
Sol	1000 W/m ²
Lett sky	600 W/m ²
Overskyet	300 W/m ²
Vinterdag	100 W/m ²

Tabell 15 Forklaring av solintensitet

I tabell 16 er solintensiteten sett i sammenheng med temperatur og nedbør. Værdata er hentet fra Meteorologisk institutt (MET, 2021) og gjelder for Selbu kommune. Man ser at solfanger mest sannsynlig kan driftes fra slutten av april til oktober. I månedene januar, februar, mars, november og desember er gjennomsnittlig skydekke satt til 0. Det er disse månedene det mest sannsynlig vil være is på banen.

Solintensitet 2020		
Måned	Gjennomsnittlig temperatur (°C)	Gjennomsnittlig skydekke (W/m ²)
Jan	2	0
Feb	-0.4	0
Mars	1.1	0
April	3.2	100
Mai	6.2	600
Juni	16.7	600
Juli	12.5	300
Aug	14.2	600
Sep	10.5	600
Okt	6.6	600
Nov	4.1	0
Des	1.6	0

Tabell 16 Solintensitet 2020 Selbu kommune

I tabell 17 er energiutbytte presentert. Her er forutsetningene at man bruker data som presentert i tabell 13 og 14.

Resultat solfanger		
$Q_{utb} =$	553.311902	kWh/m ²
Energiutbytte =	497980.712	kWh
Effektutbytte =	113.694226	kW

Tabell 17 Resultat for beregning av utbytte fra solfanger

5.6 Energibrønn

Ut fra kravspesifikasjonen er det beskrevet at fordampereffekten skal være på 120 kW (Selbu, K., 2019). Denne verdien er derfor benyttet for å finne ut hvor mange energibrønner som trengs for å levere fordampereffekten. Som nevnt tidligere, ble det valgt et intervall på 10-80

W/m for energibrønnenes ytelser. Alle brønnene skal være 200 meter dype. Resultatene er presentert i tabell 18.

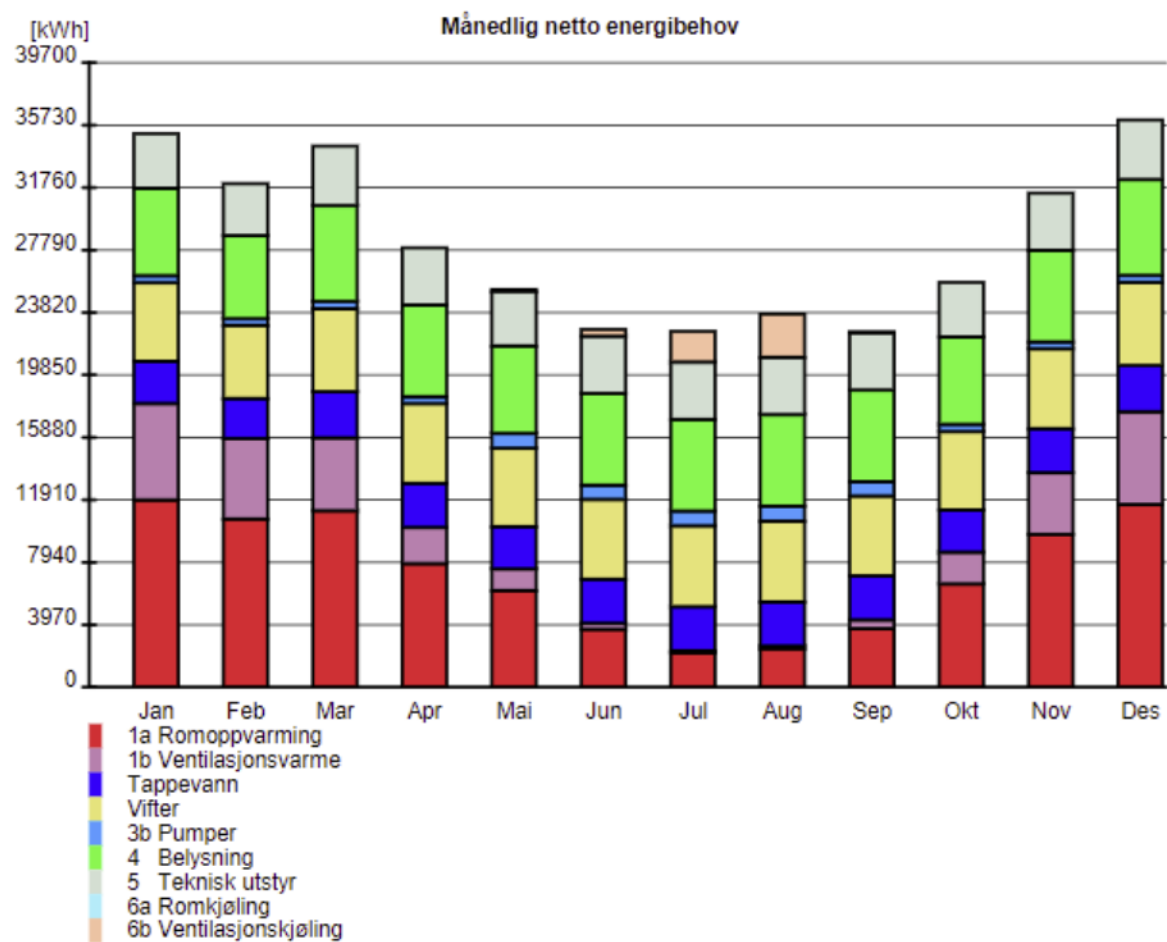
Utrekning energibrønn								
Effekt per meter (W/m)	10	20	30	40	50	60	70	80
Effekt en brønn (W)	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000
Antall brønner fordampet 120 kW	60	30	20	15	12	10	8.6	7.5
Total lengde (m)	12000	6000	4000	3000	2400	2000	1714.29	1500

Tabell 18 Utrekning av energibrønnen

Fra resultatene framkommer et behov på 15 brønner ved en effekt på 40 W/m.

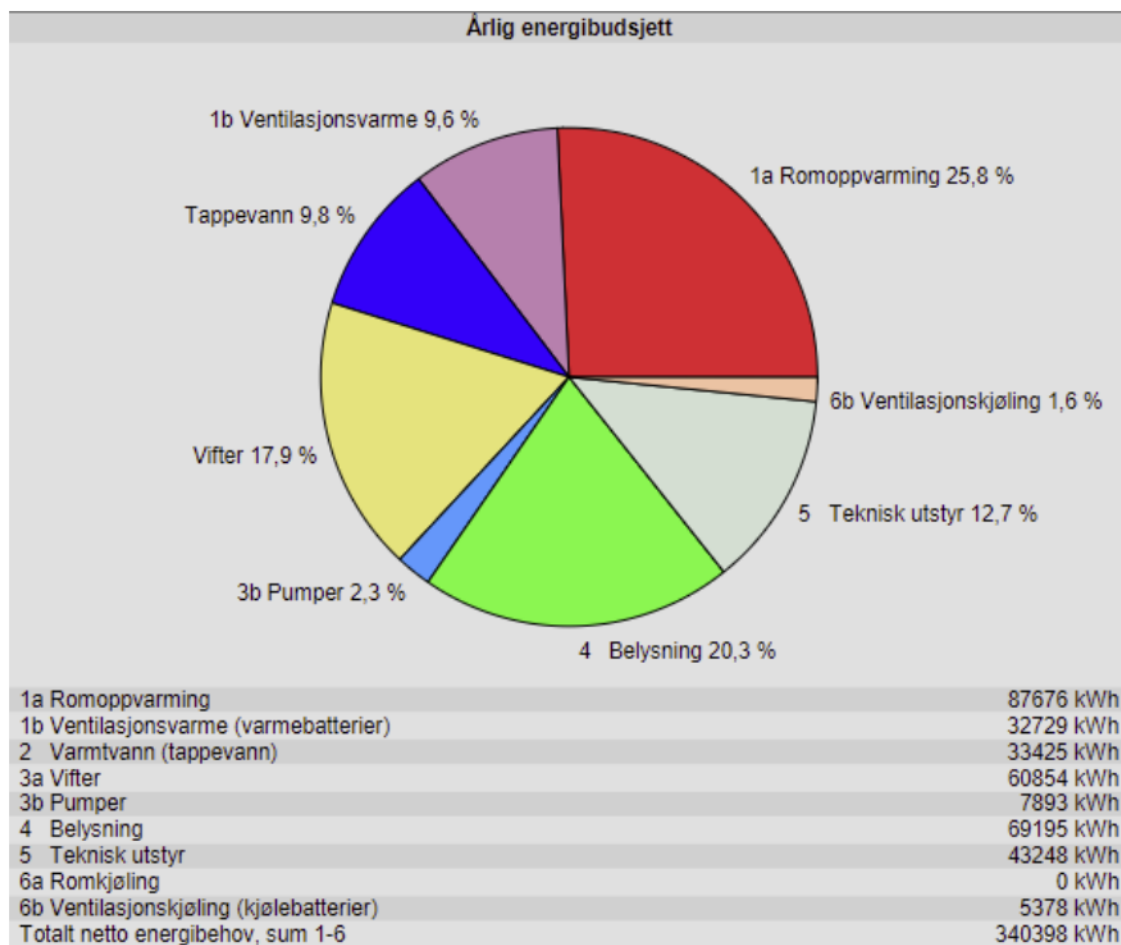
5.7 SIMIEN simuleringer av skole

For å danne et mest mulig realistisk bilde av skolebyggets energibruk, ble det utført simulering i Simien. Grunnlaget for simuleringene er informasjon hentet fra kravspesifikasjon. I figur 6 blir månedlig netto energibehov presentert. Dette diagrammet viser energiforbruket i de forskjellige månedene gjennom et år. Fra denne figuren kan man se at energibehovet for romoppvarming er mindre midt på året.



Figur 6 Månedlig netto energibehov for Selbu ungdomsskole fra SIMIEN

Figur 7 viser det årlige energibudsjettet for skolebygget til Selbu ungdomsskole gjennom et år. Fra sektordiagrammet kan man se at den største energiposten for skolen er romoppvarming, 25,8 %.



Figur 7 Årlig energibudsjett for Selbu ungdomsskole fra SIMIEN

I Simien ble det også utført simuleringer mot kravene som er beskrevet i TEK17. Resultatet ble godkjent og er presentert i figur 8 og i figur 9.

Resultater av evalueringen		
Evaluering av		Beskrivelse
Energiramme	Bygningen tilfredsstiller energirammen ihht. §14-2 (1)	
Minstekrav	Bygningen tilfredsstiller minstekravene i §14-3	
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstiller minstekrav gitt i NS3031:2014 (tabell A.6)	
Energiforsyning	Fossilt brensel benyttes ikke i oppvarmingsanlegget (§14-4)	
Samlet evaluering	Bygningen tilfredsstiller byggeforskriftenes energikrav	

Figur 8 Resultatet av TEK17 evaluering fra Simien for skolebygget i Selbu

Energiramme (§14-2 (1), samlet netto energibehov)	
Beskrivelse	Verdi
1a Beregnet energibehov romoppvarming	14,8 kWh/m ²
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)	9,8 kWh/m ²
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)	10,1 kWh/m ²
3a Beregnet energibehov vifter	16,7 kWh/m ²
3b Beregnet energibehov pumper	2,6 kWh/m ²
4 Beregnet energibehov belysning	22,1 kWh/m ²
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr	13,3 kWh/m ²
6a Beregnet energibehov romkjøling	0,0 kWh/m ²
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	6,2 kWh/m ²
Totalt beregnet energibehov	95,4 kWh/m ²
Forskriftskrav netto energibehov	110,0 kWh/m ²

Figur 9 Energiramme fra TEK17 evaluering for skolebygget i Selbu

6 Analyse og diskusjon

I dette kapitlet blir de ulike resultatene analysert og diskutert.

6.1 Energibruk for skolebygget og svømmehall

På grunn av stort bruksareal i skolebygg og et høyt energiforbruk i svømmehaller, vil dette føre til store energikostnader. Det er derfor viktig å kartlegge energibruken.

For å kartlegge resultatene for oppvarmingsbehovet, har vi valgt å sammenligne med Enova byggstatistikk. I tillegg har vi gjort simuleringer i SIMIEN for å finne den spesifikke energibruken for oppvarming til skolebygget og svømmehallen. Vi har også hatt tilgang til en energirapport fra Selbu kommune (Selbu, 2019).

6.1.1 Utreget og simulert energibruk og effektbehov for skolebygget

For å oppnå en dekning på 90 % av det årlige varmebehovet, regner man med at det kreves en grunnlast på 40-50 % (Ole Øiene Smedegård, 2013). Ved utregning av effektbehovet for skolebygget ble det derfor brukt en grunnlast på 40 % av det totale energibehovet.

Verdiene i tabell 19 er basert på tall fra figur 7. Her framkommer det at en antagelse på 40 % for skolebyggets energibruk for oppvarming er noe lavere enn hva Simien regner med.

Prosentvis inndeling av energibruk til oppvarming			
Romoppvarming	87676	kWh	25.80%
Ventilasjonsvarme	32729	kWh	9.60%
Varmtvann	33425	kWh	9.80%
SUM	153830	kWh	45.20%

Tabell 19 Energibruk til oppvarming fra SIMIEN

Tabell 20 viser at utregningene noe høyere enn resultatet som framkommer utfra simuleringer utført i Simien. Dette kan komme av en rekke årsaker. Utregningene er gjennomsnittsverdier fra Enovas, og vil derfor ikke gi et veldig nøyaktig svar, men kan likevel være med å gi en pekepinn på energibruk og effektbehov uten å utføre en simulering. Simien vil her være mer nøyaktig, samtidig som den gir grafer og verdier som kan være til hjelp til for eksempel å se

energibruken i ulike måneder gjennom året. Det er verdt å merke seg at Simien krever en god del informasjon om det bygget som skal simuleres, og er noe mer tidkrevende.

Sammenligning av SIMIEN og utregning skolebygg	SIMIEN		Utreget	
Energibruk	153830.00	kWh	189560.80	kWh
Spesifikk energibruk	46.42	kWh/m ²	57.20	kWh/m ²
Effektbehov	76.915	kW	94.78	kW

Tabell 20 Sammenligning for energibruk mellom Simien og utregning for skolebygget

Det er valgt å likevel beholde det utregnede effektbehovet for å dimensjonere varmepumpen. På denne måten vil man trenge mindre spisslast ved store varmebehov.

6.1.2 Svømmehallens energibruk sammenlignet med Enovas byggstatistikk

Da svømmehallen ble beregnet, ble det brukt en metode som finner energibruken for svømmehallen basert på hvor stor bassengoverflaten er. Det resulterte i en noe høy spesifikk energibruk på 612,66 kWh/m² for svømmehallen. Dette var noe forventet siden bassengets overflateareal var på 34 % av det totale bruksarealet til svømmehallen som er stort i forhold til andre svømmehaller.

For å se om dette kan være en realistisk verdi, er det valgt å sammenligne med Enovas byggstatistikk, da med kategorien for idrettsbygg og underkategorien for svømmehaller som vist i figur 10. De aktuelle verdiene er merket med gult.

TYPE BYGG	Antall bygg	TEMPERATUR- OG STEDSKORRIGERT SPESIFIKK ENERGIBRUK (kWh/m² år)				ENERGIBÆRER			
		Oppv. areal (BRA)	Gj. snitt	Arealvektet	Elektrisk	Gass	Flytende	Fjern- varme	Biologisk
Barnehage	172	123 687	195	181	91,4 %	0,0 %	0,0 %	8,3 %	0,3 %
Barnehage	172	123 687	195	181	91,4 %	0,0 %	0,0 %	8,3 %	0,3 %
Boligblokk	40	167 181	143	143	44,6 %	0,0 %	0,3 %	53,5 %	1,6 %
Boligblokk	40	167 181	143	143	44,6 %	0,0 %	0,3 %	53,5 %	1,6 %
Forretningsbygg	1519	4 043 952	559	343	95,2 %	0,2 %	0,1 %	4,5 %	0,0 %
Annen forretningsbygning	75	319 969	194	299	89,6 %	0,5 %	0,1 %	9,8 %	0,0 %
Butikkbygning	60	149 576	369	259	84,7 %	0,0 %	0,9 %	14,4 %	0,0 %
Dagligvarebutikk	1272	1 422 804	617	540	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kjøpesenter, varehus	112	2 151 603	243	224	89,3 %	0,6 %	0,3 %	9,9 %	0,0 %
Hoteller	87	663 771	304	272	75,3 %	0,5 %	0,2 %	23,9 %	0,1 %
Appartement	24	50 220	165	158	88,3 %	0,0 %	0,8 %	10,8 %	0,0 %
Fengselsbygning	1	914	278	278	63,3 %	0,0 %	0,0 %	36,7 %	0,0 %
Hotellbygning	60	611 247	354	281	74,7 %	0,5 %	0,1 %	24,5 %	0,1 %
Restaurantbygning, kafébygning	2	1 390	455	420	86,5 %	0,0 %	0,0 %	13,5 %	0,0 %
Idrettsbygg	98	343 189	219	237	64,7 %	0,0 %	0,2 %	33,7 %	1,4 %
Helsestudio	2	5 121	173	180	61,8 %	0,0 %	0,0 %	38,2 %	0,0 %
Idrettshall	66	198 502	156	164	77,3 %	0,0 %	0,3 %	18,9 %	3,5 %
Ishall	7	79 053	339	350	41,5 %	0,0 %	0,0 %	58,5 %	0,0 %
Svømmehall	16	46 360	425	366	80,2 %	0,0 %	0,0 %	19,8 %	0,0 %

Figur 10 Utklipp fra Vedlegg 4 fra Enovas byggstatistikk

I rapporten fra Enova kan man se at den gjennomsnittlige verdien ligger på 425 kWh/m². Dette er da noe lavere enn 612,66 kWh/m², som er den utregnede verdien til Selbu ungdomsskole.

Om man ser på oppvarmet areal fra Enovas rapport, og deler den på antall bygg, får man et gjennomsnittlig areal for svømmehallene som har bidratt i byggstatistikken. Det gjennomsnittlige arealet ligger på 2897,5 m². Dette er 2,5 ganger større enn svømmehallen som er prosjektert for Selbu ungdomsskole, og kan være grunnen til forskjellen mellom byggstatistikken og utregnet verdi. I tabell 21 er det satt opp en sammenligning av resultatene fra Enova, og utregningene som ble utført. Energibruk og effektbehov i tabellen er utregnet med driftstiden og arealet for svømmehallen i Selbu.

Sammenligning av SIMIEN og utregning svømmehall	Enovas byggstatistikk		Utreget	
Energibruk	484925.00	kWh	699050.00	kWh
Spesifikk energibruk	425.00	kWh/m ²	612.66	kWh/m ²
Effektbehov	55.36	kW	79.80	kW

Tabell 21 Sammenligning for svømmehallen

I tabell 21 kommer det frem at Selbu ungdomsskole har en noe høyere spesifikk energibruk enn gjennomsnittet. Som sagt, vil nok grunnen til dette være forskjellen mellom vannoverflaten og størrelsen på svømmehallen.

Som for skolebygget, blir likevel utregningene for svømmehallen beholdt ved dimensjonering av varmepumpen.

Det kunne også blitt utført en sammenligning med kategorien som heter «Barne- og ungdomsskole med idrettshall/svømmehall». Dette ble da ikke gjennomført etter å ha sett på det gjennomsnittlige spesifikke energibruket, som er 148 kWh/m² for denne kategorien. Dette er da lavere enn for barne- og ungdomsskoler uten basseng. Dette kan sees i Figur 11. Det vil derfor være et urealistisk mål å prøve å oppnå, da svømmehaller er veldig energikrevende og realistisk sett ville energibruken endt på en mye høyere verdi.

Skolebygg	380	2 138 935	156	140
Barne- og ungdomsskole	234	1 042 190	155	139
Barne- og ungdomsskole med idrettshall/svømmehall	46	229 660	148	140
Videregående skole	79	635 537	164	139
Videregående skole med idrettshall/svømmehall	21	231 548	159	148

Figur 11 Enova byggstatistikk, kategori Skolebygg Vedlegg 4

6.1.3 Hvor mye av effektbehovet bør varmepumpen dekke?

Etter å ha lagt sammen varmebehovet fra skolebygget og svømmehallen, får man et totalt effektbehov. For Selbu ungdomsskole vil denne varmen komme fra en varmepumpe, som hovedkilde, og fjernvarme i form av flisfyring fra nærområdet. Fjernvarmen vil for dette systemet være spisslast.

Da levetiden til en varmepumpe avhenger av hvor mange start og stopp kompressoren må igjennom per døgn, vil det derfor lønne seg å dimensjonere varmepumpen til å ta en del av oppvarmingsbehovet, i motsetning til å ta seg av all oppvarming. Dette kan også begrunnes med at det ikke vil være behov for like mye varme om for eksempel sommeren. Man vil derfor klare å dekke det meste av det årlige effektbehovet med en lavere dekningsgrad, som typisk er på 60-70 %, hvor spisslasten vil brukes ved behov.

For Selbu ungdomsskole blir dette litt annerledes, da det er en svømmehall som krever en konstant oppvarming av både bassengvann og romoppvarming. Vi anbefaler derfor 100 % dekning av svømmehallens varmebehov. Det er verdt å merke at varmebehovet er beregnet for vedlikehold av vanntemperatur i bassenget. Ved oppvarming etter tømning av bassenget må spisslasten bidra for å varme opp vannet igjen. Skolebygget trenger riktignok ikke 100 % dekning, men for å unngå for mye bruk av fjernvarme vil en dekning på 75 % av varmebehovet til skolen være å anbefale. Et eventuelt varmeoverskudd vil kunne lagres i energibrønner for senere bruk.

Basert på disse vurderingene kan varmepumpens dekning bestemmes til ca. 150 kW, noe som kan sees i tabell 22.

Varmepumpens dekning		
Svømmehall 100%	79.80	kW
Skolebygg 75%	71.09	kW
SUM Varmepumpe	150.89	kW

Tabell 22 Varmepumpens dekning av effektbehovet

Basert på en fordampereffekt på 120 kW ble det gjennomført simuleringer i Bitzer. Dette vil også være innenfor kravspesifikasjonen fra Selbu kommune. Fra simuleringene kan man se at varmepumpen klarer å levere det utregnede varmebehovet på 150,89 kW ved de fleste driftsforhold. Når det kun skal opprettholdes is, altså kjøling med redusert effekt, ble resultatet fra Bitzer en gasskjølereffekt på 146,4 kW. Her vil det muligens behøves hjelp fra en tilleggsvarmekilde, for Selbu ungdomsskole vil dette være fjernvarme.

6.2 Forbruksvann

Da vannoppvarming er en kontinuerlig prosess, og variasjonen i effekt/varmetilskudd er vanskelig å forutsi, antas det at effekten og varmetilskuddet fra vannoppvarming er konstant gjennom døgnet. Det ble beregnet akkumulert volum for forbruksvann basert på antall

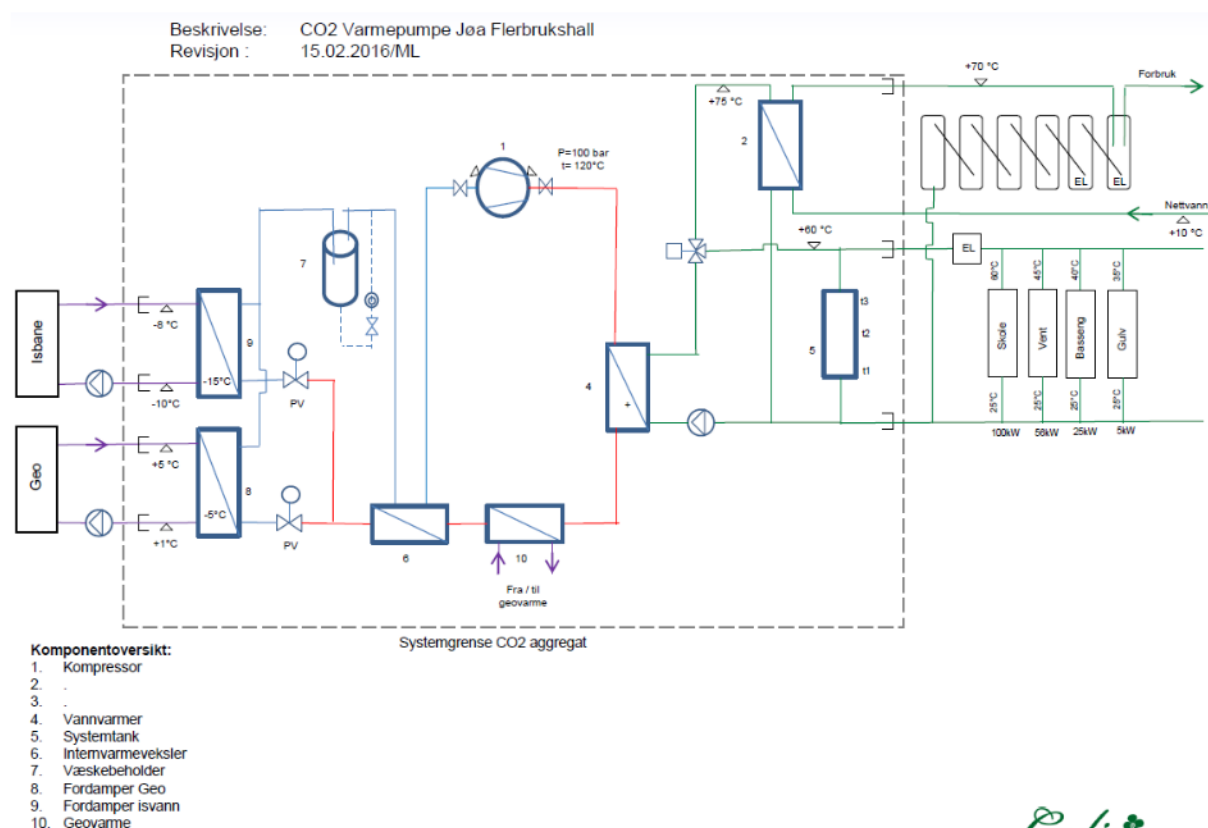
forbrukere/besøkende av dusjanlegget i svømmehallen. Det ble lagt til en sikkerhetsmargin på 50 %, og resultatet ble et system som skal akkumulere 3000 liter vann, her med fem tanker på 600 liter hver.

Vi har sammenlignet med Jøa flerbrukshall. Systemutformingen deres er ganske likt systemet til Selbu ungdomsskole, bortsett fra at de ikke har svømmehall. De har prosjektert fem 400 liters akkumuleringstanker, som til sammen blir 2 000 liter. Etter møte med flere personer som hadde jobbet med utvikling og prosjektering av systemet, fikk vi vite at Jøa sitt anlegg ble for stort til deres behov. Da kan det tenkes at volumet på 3 000 liter kan være passende for Selbu sitt forbruk, ettersom de har både en svømmehall med garderober og en aktivitetshall med tilhørende garderober.

6.3 Energisystemet

6.3.1 Sammenligning av systemutforming

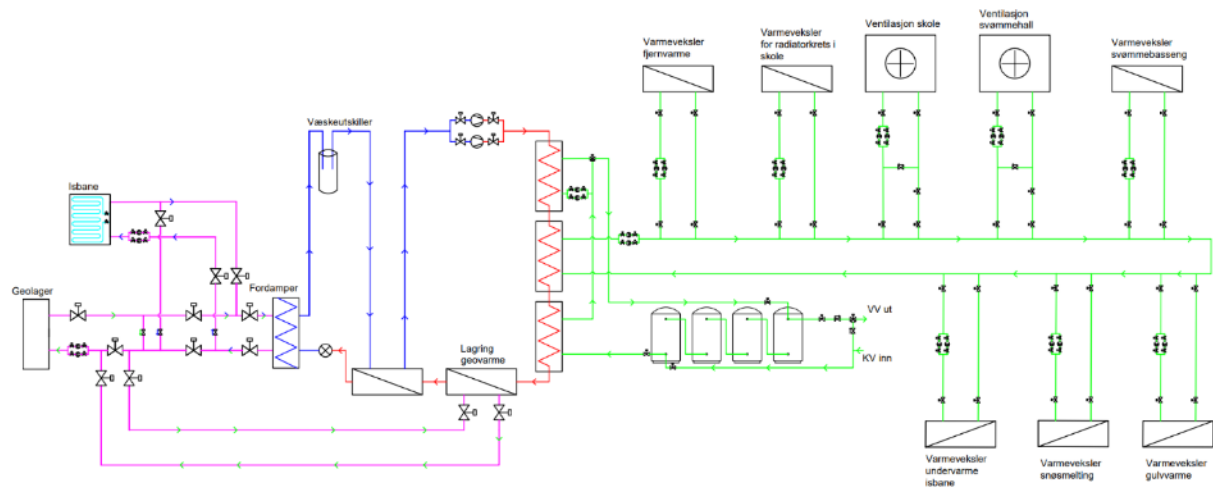
Figur 12 er en prinsippskisse fra et tilsvarende anlegg på Jøa der de benytter seg av to fordampere. Én fordamper til energibrønn og én fordamper til kunstisbanen.



Cadio

Figur 12 Prinsippskisse for varmeanlegg på Jøa (Jøa, 2016)

I figur 13 har vi lagd en modell i Autocad av Selbu sitt system, som er utformet med en felles fordampner til energibrønn og kunstisbane. Dette vil være med på å unngå mange start/stopp-situasjoner for systemet. Det er også tenkt at Selbu bør ha tre gasskjølere.



Figur 13 Sistemtekening for Selbu ungdomsskole

6.3.2 Styring av varmepumpen ved Selbu kommune

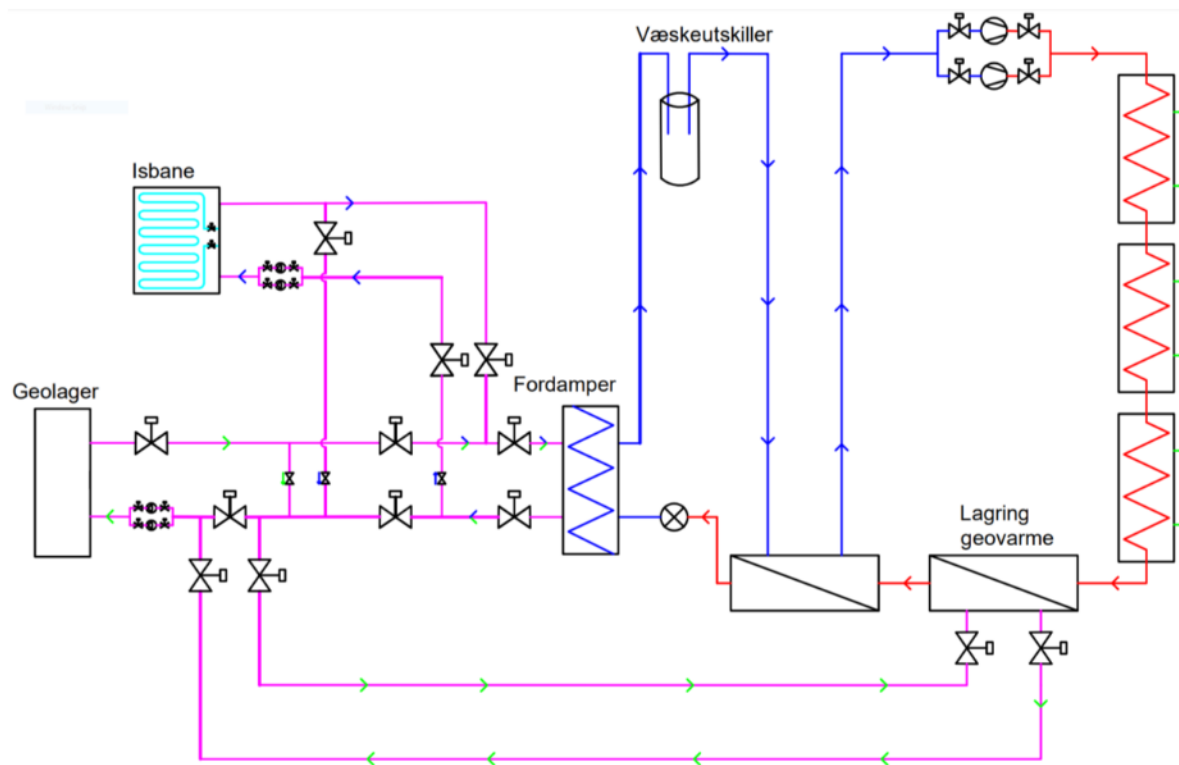
I figurene 14 og 15 er systemet ved Selbu delt opp i henholdsvis kald og varm side av varmepumpen.

Ved den kalde siden, figur 11, bestemmes hvilken kilde varmen skal hentes fra. Her er det to kilder; energibrønn (geolager) og kunstisbane/solfanger.

Ved henting av varme fra energibrønn (geolager) kan man se på de grønne pilene på figuren. Da vil ventilene til isbane/solfanger være stengt.

Skal isbane/solfanger brukes som kilde, må man her se på de blå pilene. Da vil ventilene til energibrønnene stenge.

De pilene som er nærmest fordampneren, som er blå og grønne, er for å illustrere at begge kildene bruker samme fordampner. For å oppsummere er det mulig å lagre varme i energibrønner samtidig som isbanen driftes. Man kan og dumpe solenergi direkte til geolager.



Figur 14 Kald side av varmepumpesystemet

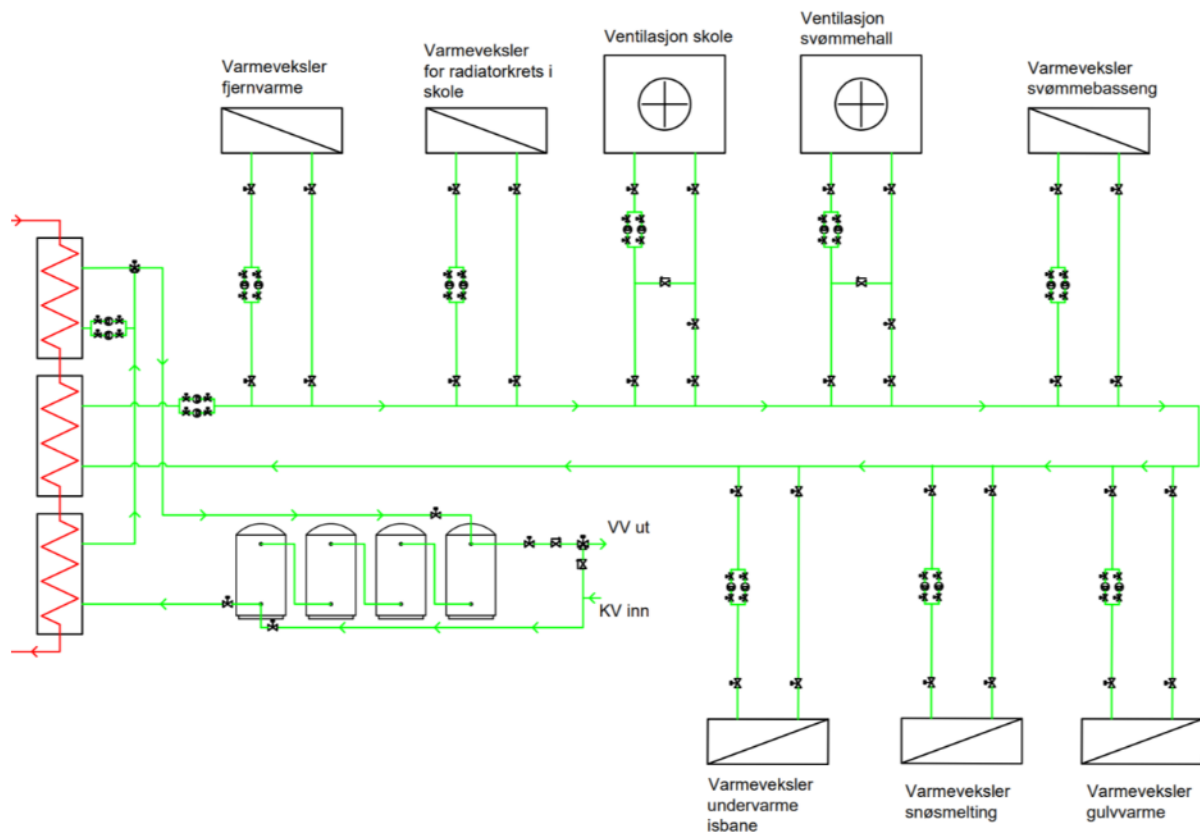
Figur 15 viser at det er valgt tre gasskjølere i motsetning til én som vist i figur 11. Valget av denne løsningen bygger på en mer oversiktlig nedtrapping av varmen i systemet.

Den øverste gasskjøleren blir brukt til oppvarming av varmt forbruksvann. Denne gasskjøleren vil ha høyest temperatur.

Gasskjøleren i midten brukes til det meste av romoppvarming for skolebygget og svømmehallen. Denne vil også ta seg av opprettholding av badetemperatur i bassenget, snøsmelting og undervarme for isbane.

Den nederste gasskjøleren fungerer som en forvarmer for tappevannet, men også for å sørge for en lavest mulig returtemperatur til fordamper.

Om det fortsatt er en del varme i systemet, såkalt overskudd, vil en varmeveksler som er forbundet med energibrønnene lagre noe av varmen. På denne måten er man sikre på returtemperaturen er lavest mulig.



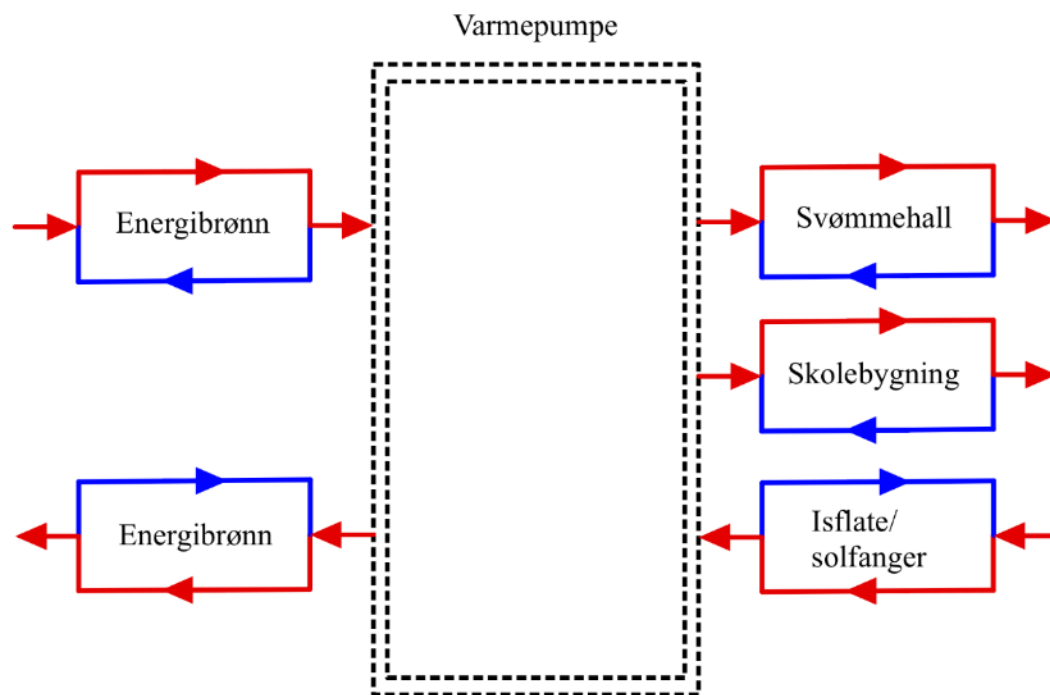
Figur 15 Varm side av varmepumpesystemet

6.3.3 Varmebehov til svømmehall og skolebygg uten drift av isflate

I driftsperioder der det ikke er behov for kjøling av isflaten, og det fortsatt er et varmebehov til både svømmehall og skolebygget, vil systemet hente varme fra energibrønnene. Kaldt arbeidsmedium vil sirkulere ned i brønnene, hvor temperaturen til mediet vil øke. Videre vil arbeidsmediet gå til varmepumpesentralen, som vil løfte temperaturen ytterligere før arbeidsmediet vil kunne brukes til oppvarming av svømmehallen og skolebygget. Etter endt oppvarming vil arbeidsmediet være kaldt igjen, og vil dermed pumpes tilbake til energibrønnene for å hente mer varme.

Når det ikke er is på kunstisbanen så fungerer den som en solfanger. Bakkesolfangeren vil da muliggjøre lagring av varme i energibrønnene.

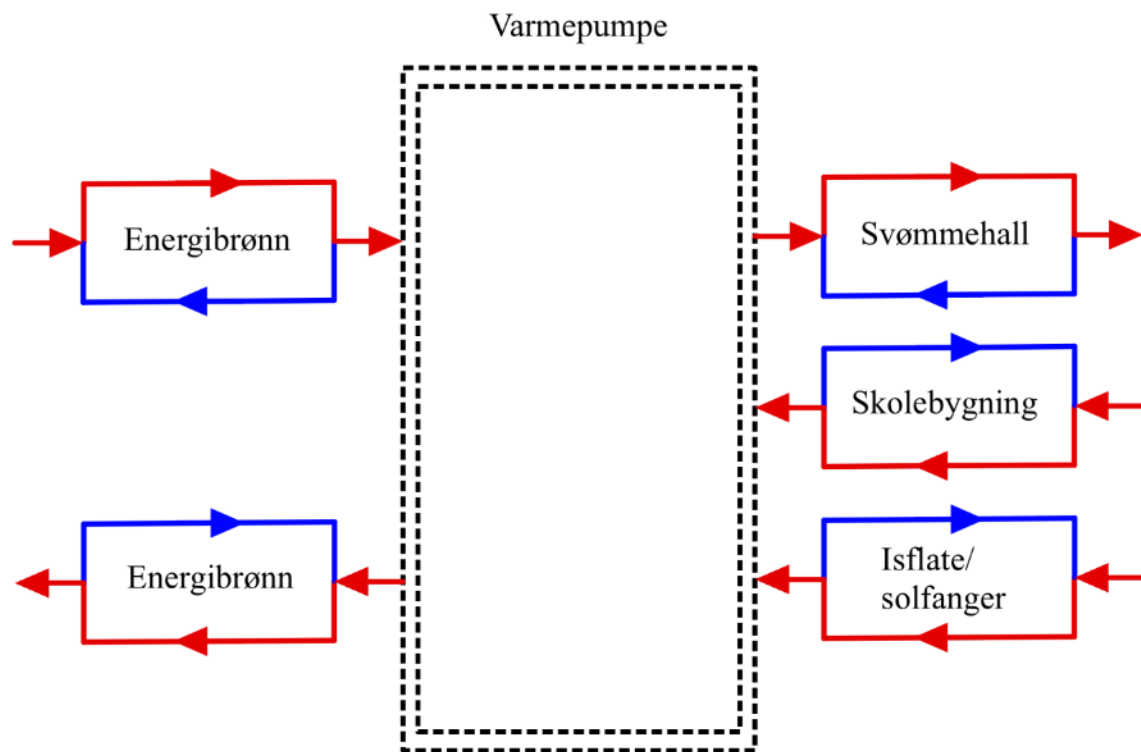
Om kunstisbanen er islagt, og det er lav nok utetemperatur, vil ingen varme kunne hentes fra kunstisbanen. Da vil systemet kun drives av energibrønnene.



Figur 16 Varmeflyt i systemet ved varmebehov til svømmehall og skole uten at det legges is

6.3.4 Varmebehov til svømmehall uten drift av isflate

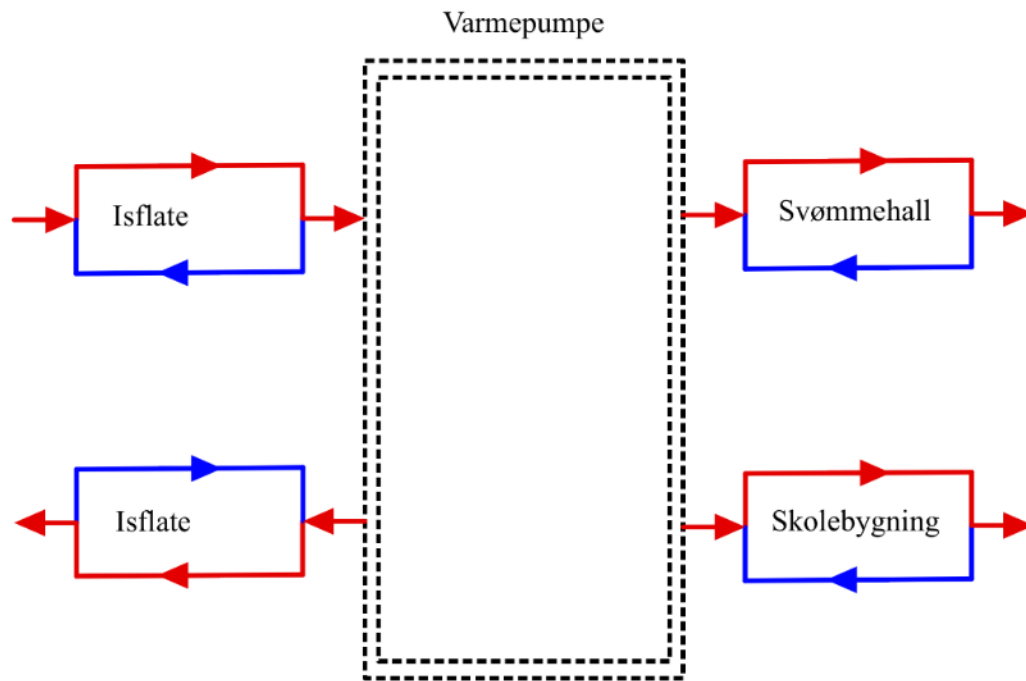
Varmedflyten til systemet ved varmebehov til kun svømmehallen vil fungere på samme måte. Den største forskjellen er at det nå vil hentes varme fra skolebygget som her vil bli lagret i energibrønnene. Dette er gjerne om sommeren hvor det er bedre å kjøle ned skolen. Også her vil bakkesolfangeren lagre varme i energibrønnene.



Figur 17 Varmeflyt i systemet ved varmebehov til kun svømmehall

6.3.5 Varmeflyt ved drift av isflate

I de kaldere månedene i året vil det være et behov for å enten produsere is eller opprettholde isen. Da må varme fjernes fra isflaten, og siden den er tilknyttet varmepumpen, kan den brukes direkte i varmepumpesystemet.



Figur 18 Varmeflyt i systemet ved varmebehov til svømmehall og skolebygg ved drift av isflate

6.3.6 Varmepumpe dimensjonering

Ved dimensjonering av varmepumpe er det vanlig å se på hvilket av behovene som er størst og om dimensjoneringen skal skje etter varmebehovet eller kjølebehovet. Om varmepumpen blir dimensjonert etter varmebehovet, blir kjøleeffekten variabel. Dette er ikke ønskelig, derfor blir kjøleeffekten satt på et slikt nivå at varmepumpen vil klare å dekke varmebehovet, og vil levere noe overskuddsvarme til lagring ved enkelte driftsforhold.

I tabell 23 er det oppgitt forskjellige ytelser for en varmepumpe som er hentet fra Jøa flerbrukshall. Selv om det er et annet bygg med et annet varme- og kuldebehov enn Selbu ungdomsskole, kan det likevel være interessant å sammenligne systemene, da de er likt utformet med tanke på at de har de samme type varmekilder.

Transkrittisk drift, leveringstrykk 100 bar:

Vanntemp inn gasskjøler, C	15	25	35
Vanntemp ut gasskjøler, C	75	60	60
GEOENERGI (50 Hz, ford.temp -5C):			
Varmeytelse, kW	122	97	92
Kuldeytelse, kW	86	65	58
Kompressoreffekt (Power input), kW	36	32	35
COPvarme	3,4	3,0	2,7
Leveringstrykk (Bar)	100	100	100
ISBANE (50 Hz, ford.temp -15C):			
Varmeytelse, kW	92	75	72
Kuldeytelse, kW	58	44	39
Kompressoreffekt (Power input), kW	34	30	32
COPvarme	2,7	2,5	2,2
Leveringstrykk (Bar)	100	100	100

Tabell 23 Ytelser fra Jøa flerbrukshall (Jøa, 2016)

I tabell 24 er de viktigste verdiene fra Bitzer simuleringen hentet ut. Disse resultatene skal bli brukt til å sammenligne med systemet til Jøa flerbrukshall.

Fra våre simuleringer oppnår man en høy COP ved drift av energibrønn og solfanger. Men når kunstisbanen driftes krever det mer energi og man oppnår ikke like høy COP.

Sammenligning	Ytelse med varmekilde - isbane	Ytelse med varmekilde - energibrønn	Ytelse med varmekilde - solfanger
COP	1.90	3.82	4.69
Temp. inn fordampner	-13 °C	6 °C	15 °C
Kuldeytelse	120.8 kW	121.7 kW	120.8 kW
Kompressoreffekt	63.6 kW	31.9 kW	44.4 kW
Varmeytelse	188 kW	159.1 kW	152.3 kW
Temp. ut gasskjøler	126.6 °C	91.9 °C	90.8 °C

Tabell 24 Ytelser ved forskjellige varmekilder

Ved sammenligning av Jøa flerbrukshall og Selbu ungdomsskole blir det rettet fokus mot COP, fordampertemperatur og temperatur ut fra gasskjøler.

Fra simuleringene av Selbu ungdomsskole, oppnås en høyere COP for energibrønn. Her undres det over fordampertemperaturen til Jøa, på -5 °C, og hvordan de har kommet frem til dette. Muligens kan det være en skrivefeil. Det forventes noe høyere temperatur fra energibrønn enn -5 °C. Videre ser vi på COP for kunstisbanen.

Å produsere is vil naturligvis kreve mye energi, som resulterer i en lavere COP. Forskjellen mellom fordampertemperatur og COP er ikke store, så det antas at ulikhetene kommer av forskjellige varme- og kuldebehov og kompressorene som er valgt til de forskjellige systemene.

En kommentar til simuleringene for energibrønn og solfanger ved Selbu, hvor COP er på 3,82 og 4,69, viser til en bra utnyttelse av tilført varme.

6.4 Kunstisbanen

En kunstisbane vil by på utfordringer. Byggetekniske forhold, som klima, konstruksjon av banedekket og kuldesystemet. Når anlegget er ferdigstilt, er det driften som er utfordringen. Vil iskvaliteten leve opp til forventningene?

6.4.1 Sammenligning av medier som vi har studert

Ammoniakkvann, $\text{NH}_4\text{-OH}$, er et medium med gode varmeoverføringsegenskaper og lavere tetthet enn kalsiumklorid, CaCl_2 . Lav tetthet gjør mediet lettere og er gunstig med hensyn til at dette gir mindre pumpearbeid. Trykktap i banerør blir ca. halvert med ammoniakkvann i forhold til bruk av CaCl_2 som kuldebærer.

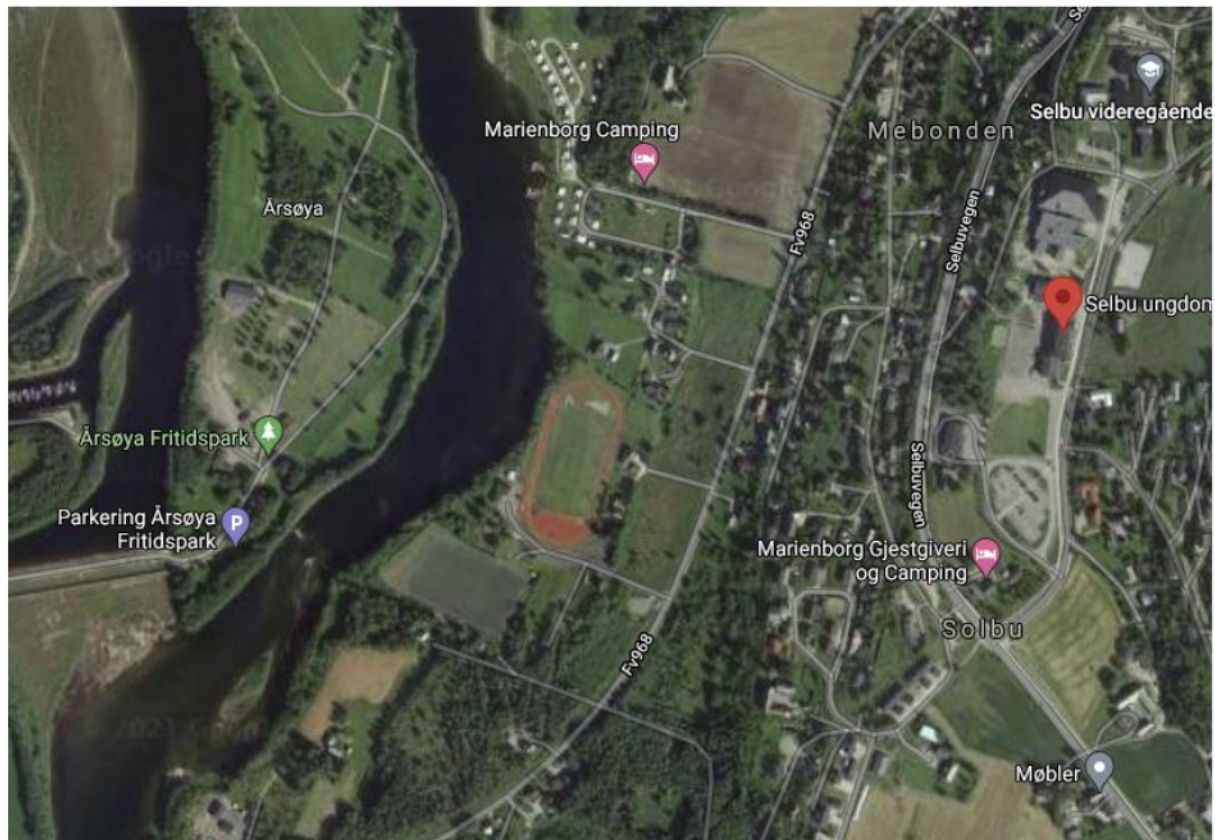
En fordel med ammoniakkvann er at det er mindre aggressivt enn kalsiumklorid, og det kan benyttes rimeligere materialer i komponenter som pumper og fordampere. For ammoniakkvann kan det eksempelvis benyttes fordampere i syrefast rustfritt stål, i motsetning til saltlake hvor titan bør brukes med tanke på korrosjon. Dette vil føre til vesentlig rimeligere fordampere.

Driftsmessig har ammoniakkvann en fordel ved at det ikke er fare for utkrystallisering slik det er for CaCl_2 i perioder med stillstand i anlegget. Forsøk har vist at det ikke er fare for begroing på heteflater ved bruk av ammoniakkvann. En ulempe er at en lekkasje vil medføre ammoniakklukt og denne lukten vil oppleves ubehagelig i nærheten av utslippsstedet. Samtidig er det svært enkelt å detektere lekkasje.

Ammoniakkvann kan ikke benyttes dersom en lekkasje kan føre mediet til bekker, elver eller innsjøer. Med tanke på at Selbusjøen ligger i nærheten og elven Nea renner forbi et stykke

unna, samt generelt nærområdet rundt skolen, bør det gjennomføres en risikoanalyse for bruk av ammoniakkvann (Havellen, 2019).

Oversiktsbilde av Selbu ungdomsskole. Til høyre i bildet vises skolen med en rød markør, og man kan se elva Nea til venstre i bildet.



Figur 19 Område bilde rundt Selbuskole

6.4.2 Vurdering av hastighet, trykktap og sirkulasjonspumpe

Man er avhengig av en hastighet opp mot 0,5 m/s for å oppnå turbulens. Forutsetningene for å oppnå turbulens i beregningsmodellen handlet først og fremst om å øke vannmengdene tilstrekkelig. På denne måten oppnår man en hastighet og en utskifting av mediet som er rask nok til å fjerne varme fra omgivelsene. Det er på bakgrunn av dette at man ønsker turbulent strømning, fordi det gir en bedre varmeoverføringsevne enn laminær strømning.

For å bestemme størrelsen på sirkulasjonspumpa og samtidig kunne innregulere anlegget, er det nødvendig med en trykktapsberegning av sirkulasjonssystemet. Det er ikke nok å bestemme friksjonstapet i rørene, man må også ta hensyn til trykktap i fordelere, ventiler, bend og avgreininger.

Valg av sirkulasjonspumper dimensjoneres forenklet etter «kritiske vei», det vil si det største trykktapet pumpen må overvinne. Lengste krets blir langsiden av banen og 60 m som da er en rørsøyfe. Altså 30 m + 60 m, totalt 90 m. Ettersom trykktapet i pex-rør med utregnet hastighet er på 150 Pa/m (Dahl, 2018), gir dette $150 \text{ Pa/m} \cdot 90 \text{ m} = 13,5 \text{ kPa}$. Armatur Jonsson regner med 46,2 kPa i trykktap over fordeler, dermed kan man se etter pumpe som leverer minimum $62,7 \text{ kPa} = 0,627 \text{ Bar}$, og en vannmengde på 36 l/s. Denne fremstillingen tar utgangspunkt i at man legger is på hele banen samtidig.

Dersom det kan aksepteres å kunne kjøle 1/3 av banen av gangen til man har oppnådd akseptabel iskvalitet, kan man se fra resultatene at en vannmengde på 10,5 l/s for ammoniakk og 12 l/s for saltlaken trenger en betydelig mindre pumpe ved drift av 1/3 av banen. Dette vil ha noe å si for total kostnad. Det kan godt tenkes at det er mest aktuelt for Selbu ungdomsskole at det kun legges is på 1/3 av banen om gangen. Her er kostnaden på fordampere og installasjoner, som ikke tåler saltlake, ikke tatt med i vurderingen.

6.4.3 Vann som medier i banedekket for sammenligning

I tabell 25 er vann presentert. Vann har en annen viskositet og massetetthet, og er interessant å sammenligne med for å danne et bilde av de forskjellige egenskapene mediene har. Naturligvis kan man ikke bruke vann da det fryser, men det er tatt med for å kunne danne et bilde over hydraulikkens egenskaper og sammenligning. Vann sammenlignet med ammoniakk og saltlake krever mindre volumstrøm og lavere hastighet som resulterer i lavere pumpearbeid. Vann er til høyre i tabell 25.

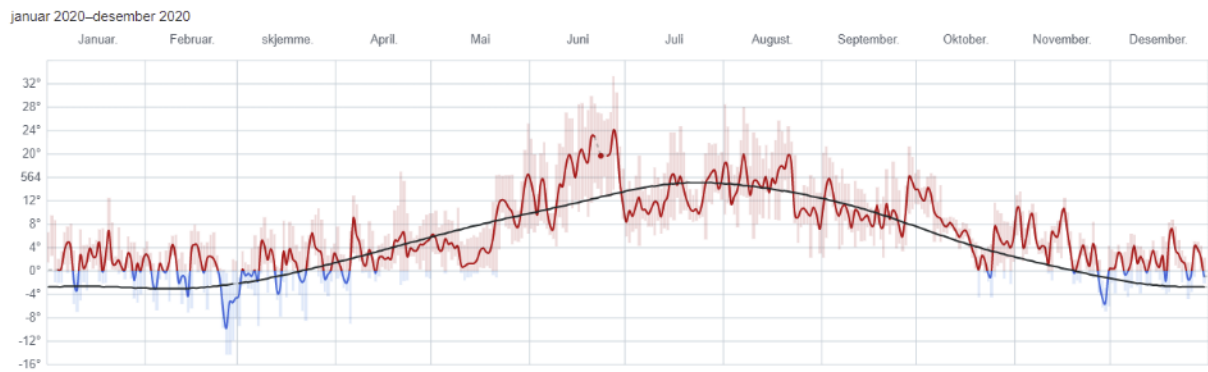
1/3 av banen	NH4-OH	CaCl2-H2O	H2O
Massetetthet	971,00 kg/m ³	1248,00 kg/m ³	998,00 kg/m ³
	2,50 cP	1,86 cP	1,002 cP
Dynamisk viskositet	0,00250 Pa*s	0,00186 Pa*s	0,001002 Pa*s
Varmeoverføringsevne	4,22 kJ/kg*K	3,33 kJ/kg*K	4,18 kJ/kg*K
Vannmengde 300 m ²	8,50 l/s	15,00 l/s	3,50 l/s
Vannmengde per sløyfe	0,17 l/s	0,30 l/s	0,07 l/s
Hastighet	0,52 m/s	0,92 m/s	0,21 m/s
Reynoldstall	4123,14	4106,32	4362,43
Avlesning i Moody-diagram	4,12E+03	4,11E+03	4,36E+03
Vurdering	Ok	Ok	OK
2/3 av banen	NH4-OH	CaCl2-H2O	H2O
Massetetthet	971,00 kg/m ³	1248,00 kg/m ³	998,00 kg/m ³
	2,50 cP	1,86 cP	1,002 cP
Dynamisk viskositet	0,00250 Pa*s	0,00186 Pa*s	0,001002 Pa*s
Varmeoverføringsevne	4,22 kJ/kg*K	3,33 kJ/kg*K	4,18 kJ/kg*K
Vannmengde 600 m ²	17,00 l/s	30,00 l/s	7,00 l/s
Vannmengde per sløyfe	0,17 l/s	0,30 l/s	0,07 l/s
Hastighet	0,52 m/s	0,92 m/s	0,21 m/s
Reynoldstall	4123,14	4106,32	4362,43
Avlesning i Moody-diagram	4,12E+03	4,11E+03	4,36E+03
Vurdering	Ok	Ok	OK
Hele banen	NH4-OH	CaCl2-H2O	H2O
Massetetthet	971,00 kg/m ³	1248,00 kg/m ³	998,00 kg/m ³
	2,50 cP	1,86 cP	1,002 cP
Dynamisk viskositet	0,00250 Pa*s	0,00186 Pa*s	0,001002 Pa*s
Varmeoverføringsevne	4,22 kJ/kg*K	3,33 kJ/kg*K	4,18 kJ/kg*K
Vannmengde 900 m ²	25,50 l/s	45,00 l/s	10,50 l/s
Vannmengde per sløyfe	0,17 l/s	0,30 l/s	0,07 l/s
Hastighet	0,52 m/s	0,92 m/s	0,21 m/s
Reynoldstall	4123,14	4106,32	4362,43
Avlesning i Moody-diagram	4,12E+03	4,11E+03	4,36E+03
Vurdering	Ok	Ok	OK

Tabell 25 Medier sammenlignet med vann

6.4.4 Lokale værforhold og varmelaster

De lokale værforholdene har stor betydning for drift av kunstisbanen. Optimale forhold for et slikt anlegg er lite nedbør, lite vind, overskyet himmel og lite sol.

Ved temperaturer fra -3 til -5 °C vil det normalt ikke være behov for å drifte selve kuldeanlegget, da holder isen seg stabil uten ekstra kjøling. Klimaet i Selbu, som vi ser i figur 20, ligger innenfor rimelighetens grenser med tanke på temperaturer (Havellen, 2021).



Figur 20 Oversikt over temperatur Selbu (MET, 2021)

Klimaet i Selbu er godt egnet for et kunstisanlegg. Kunstisen regnes å kunne driftes fra 15. oktober til 15. mars. Gjennomsnittstemperaturen for Selbu ligger mellom -3 til 3 °C i disse månedene. Dette er innenfor temperaturområdene som vil gi en akseptabel iskvalitet.

Det kan være dager hvor kvaliteten på isen er noe lavere og man kan oppleve vanddannelse på isen, men dette vil variere fra sesong til sesong og er avhengig av været.

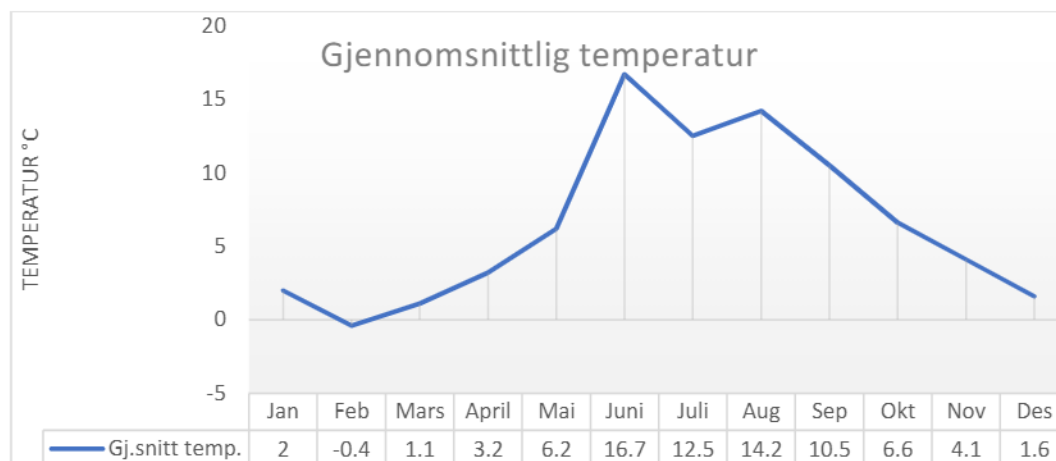
Det legges til grunn at anlegget bør utformes slik at man kan ta høyde for eventuelle varmelaster og ytre påvirkninger. Hver sløyfe i banedekket bør kunne kanaliseres dit hvor det eventuelt er noe dårligere is-kvalitet. Hvor vidt dette skal tas høyde for, og om det er en merverdi eller en utgiftspost, ble det ikke sett nærmere på. Det ble heller ikke sett på varmelaster fra omgivelser, lys og eventuelle brukere av isen.

6.5 Solfanger og utnyttelse av energibrønn

6.5.1 Solfanger

Utenom kunstisessongen benyttes banen som en solfanger. Det gir mange fordeler at man kan utnytte den hele året. En annen positiv bi-effekt er at man også får opprettholdt sirkulasjon i lakerørene som er viktig slik at ting ikke står seg.

I Figur 21 og 22 kan man se at man får en effektiv solfanger. Fra grafen ser man det er størst effekt i mai, juni, august, september, og delvis oktober. Effekten i juli er dårligere, dette skyldes mye nedbør.



Figur 21 Gjennomsnittlig temperatur Selbu



Figur 22 Effekt ved gjennomsnittlig skydekke

Fra tabell 26 under ser vi at man kan forvente å hente ut omkring 113 kW.

Resultat solfanger		
$Q_{utb} =$	553.31	kWh/m ²
Energiutbytte =	497980.71	kWh
Effektutbytte =	113.69	kW

Tabell 26 Resultat solfanger

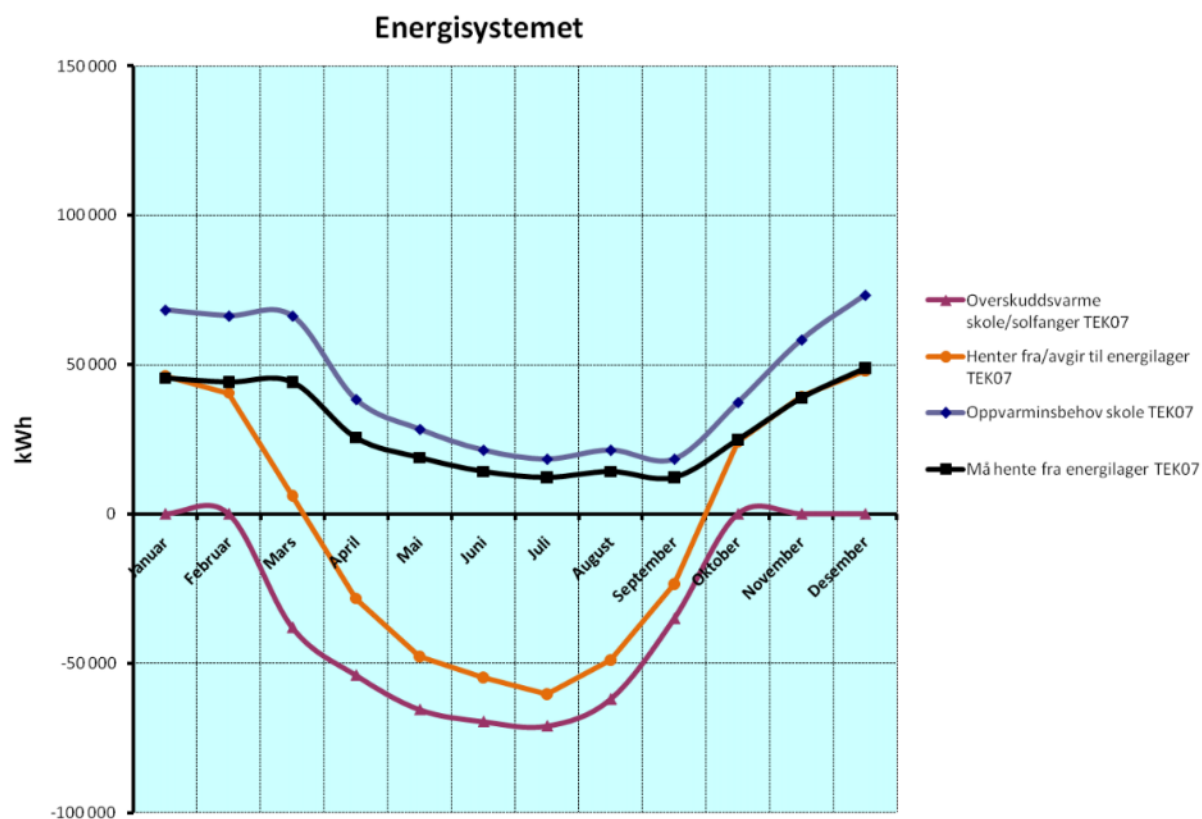
Det er noe usikkerhet rundt denne beregningsmodellen da solfanger ikke er veldig utbredt i Norge. Det ble valgt å ta utgangspunkt i en lavere medietemperatur slik at utbytte vil være noe underdimensjonert. Det er viktig å ikke blande effektutbyttet man får her, sammen med varmepumpen. Dette er forholdstall for å stadfeste hvilket potensiale solfangeren kan ha.

6.5.2 Energibrønn sett i sammenheng med solfanger

For å se på en grafisk fremstilling er det sett på en tidligere rapport fra Eksperter i Team (EiT, 2010) som viser dekningsbidraget til en solfanger opp mot energiforbruket i en skole som har mange likhetstrekk som Selbu ungdomsskole. Rapporten fra Eksperter i Team er utgitt før 2017, og vil derfor ikke ha tidsriktige målinger med tanke på TEK (DIBK, 2017) og tetthetskrav som er i bygg i dag, men figuren gir en god indikasjon på hvilket potensiale solfangeren kan ha.

Figur 23 viser en modell basert på TEK07 hvor man kan lese fra den lille grafen hvor mye energi skolebygningen og solfangeren tilfører det geotermiske lageret gjennom året. Der er det kommet frem til at hovedtilskuddet i det geotermiske lageret skjer om sommeren, naturligvis.

Den blå grafen viser oppvarmingsbehovet til skolebygningen gjennom året, mens den sorte grafen viser hvor mye som må hentes ut av lageret for å dekke oppvarmings/kjølebehov til skolebygningen. Avstanden mellom den blå og den sorte grafen tilsvarer mengde varme som dekkes av varmepumpen. Det som er mest interessant å studere er den oransje grafen som viser hvor mye man henter fra/avgir til geotermisk lager gjennom året (EiT, 2010).



Figur 23 TEK07 med tilførsel av energi til det geotermiske lageret (EiT, 2010)

I simuleringen som ble gjennomført av EIT, kan man observere at det hentes ut energi fra det geotermiske lageret fra oktober til midten av mars. I perioden fra midten av mars til oktober vil skolebygningen og bakkesolfangeren tilføre energi til det geotermiske lageret. I vintermånedene ser man at den oransje og sorte grafen vil overlappe hverandre. Dette viser at i vinterhalvåret, da skolen har størst behov for varme, vil energibrønnen kunne levere nok energi for å dekke varmebehovet (EiT, 2010).

6.6 Kostnad for oppvarmingsbehovet

For å kartlegge kWh pris ved ulike driftsforhold, ble kompressorarbeidet i varmepumpen sammenlignet med elektrisitet og biovarme. Prisgrunnlaget kommer fra vedlegg med spotpris, og er tilsendt fra Selbu kommune, herunder prosjektleder Annar Bjørnbeth. Resultatet av denne sammenligningen er vist i tabell 27, 28 og 29.

Sammenligning VP Isbane drift				
Varmepumpe		Elektrisitet		Biovarme
144,800	kr/år	195,785	kr/år	338,990 kr/år

Tabell 27 Sammenligning av årlig pris for oppvarming ved drift av isbane

Sammenligning VP Energibrønn drift					
Varmepumpe		Elektrisitet		Biovarme	
72,627	kr/år	195,785	kr/år	338,990	kr/år

Tabell 28 Sammenligning av årlig pris for oppvarming ved drift av energibrønn

Sammenligning VP solfanger drift					
Varmepumpe		Elektrisitet		Biovarme	
101,087	kr/år	195,785	kr/år	338,990	kr/år

Tabell 29 Sammenligning av årlig pris for oppvarming ved drift av solfanger

Denne sammenligningen er for å danne et bilde av forskjellen mellom varmpumpe og andre energikilder ved drift av Selbu ungdomsskole. Gjennom et år med oppvarming vil varmebehov og driftsforhold variere. En varmpumpe vil kreve mindre energi enn direkte oppvarming med elektrisitet eller biovarme. Her er det ikke tatt høyde for andre energilaster som for eksempel sirkulasjonspumper.

7 Konklusjon

Gjennom kartlegging av oppvarmingsbehovet for skolebygget og svømmehallen til Selbu ungdomsskole ble varmebehovet beregnet. Ved bruk av flere metoder, som simuleringer i Simien og sammenligning med Enovas byggstatistikk, er resultatet et oppvarmingsbehov på totalt 174,58 kW. Etter en analyse av varmepumpesystemet og varmebehovet til de forskjellige byggene, ble konklusjonen at varmepumpen skal levere 150 kW varme.

Ved å dimensjonere varmepumpen etter kuldebehovet får vi et system som harmonerer godt, der varmepumpen dekker oppvarmingsbehovet ved forskjellige driftsforhold. Videre vil eventuell overskuddsvarme bli lagret for senere bruk i energibrønner, slik at all energi blir utnyttet.

Ved å benytte kun én fordamper for isbane/solfanger og energibrønn, oppnår systemet jevnest mulig drift. En annen positiv bi-effekt ved én fordamper er at man også får opprettholdt sirkulasjon i lakerørene, da isbanen kan driftes samtidig som at energibrønnene lagrer varme. At begge disse systemene kan kjøres kontinuerlig, hindrer mange start/stopp. Kombinert med tre gasskjølere, er man sikker på at all varme som varmepumpen leverer, blir utnyttet. Det vil også være lavest mulig temperatur på arbeidsmediet når det skal inn i fordamperen.

Ammoniakk skiller seg ut ettersom det kreves mindre sirkulert mengde og lavere pumpe effekt. Etter å ha vurdert ammoniakk opp mot saltlake, er det konkludert med at saltlaken er å foretrekke. Da får man et medium som ikke er giftig og som fungerer godt i energibrønnen. Ved å velge CaCl_2 er det fordelaktig at man kjøler 1/3 av banen av gangen for å unngå stort pumpearbeid. Dette vil ikke være et problem når det først er kuldegrader ute.

Økonomisk sett vil en varmepumpe være mer lønnsom enn andre energikilder til oppvarming. Sammenlignet med elektrisk oppvarming for et helt år, vil varmepumpen være ca. 50 000 kr billigere i året ved drift av isbanen. Med energibrønn som varmekilde til varmepumpen vil den være omtrent 120 000 kr billigere i året enn oppvarming med elektrisitet.

8 Videre arbeid

Denne oppgaven har i all hovedsak tatt for seg teoretiske analyser av et varmepumpesystem for Selbu ungdomsskole. Oppgaven har vært begrenset for å kunne gå dypere på et færre antall temaer, og på grunn av tidsbegrensning. Under arbeidet ble det oppdaget noen tema som kunne vært nærmere undersøkt eller som kan jobbes videre med.

En mer konkret analyse av hvert enkelt system vil gi en bedre oversikt over hvordan dette systemet vil kunne driftes.

Siden denne oppgaven er teoretisk, ville det vært spennende å ta målinger for å få en innsikt i eksisterende anlegg. Dette kunne vært til hjelp ved utvikling av nye løsninger med tanke på etablering av nye skolebygg med varmepumper. Dette ville også gitt en innsikt i driften av slike varmepumper.

En økonomisk analyse gjennom ett års bruk ville gitt et bedre bilde av hvor lønnsomt varmepumper er for oppvarming. Det ville vært nyttig å se på kostnad ved kjøp og installasjon av varmepumper, og hvor lang tid det vil ta før bygge- og anskaffelseskostnadene er inntjent.

I sluttspurten av oppgaven ble vi opp oppmerksom på et annet medium som kunne vært aktuelt å sammenligne med. HX35 er en etanolblanding som har interessante egenskaper og ville kanskje vært mer passende for systemet til Selbu ungdomsskole.

Referanser

Bitzer (2018) Software. Available at: <https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx>
(Accessed: 09.03.21).

Dahl, B. (2018). Available at: <https://varmefaktor.no/assets/files/Kapittel6.pdf>.

DIBK (2017) *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Available at:
<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Accessed: 04/mar 2021).

EiT (2010) *Kunstgressbane som solfanger i samvirke med skole- og idrettbygg*.

Enova (2017) *Enovas byggstatistikk 2017*.

Havellen, V. (2019) *Mulighetsstudie*.

Havellen, V. (2021) *Om kunstisbaner*. Available at: http://kunstisbane.no/?page_id=90
(Accessed: 02/03 2021).

Jøa (2016) Jøa flerbrukshall - Prinsippskisse varmeanlegg med CO2 varmepumpe.

KS (2019) *Tekniske bestemmelser Standard abonnementsvilkår for vann og avløp*.

MET (2021) *Statistikk værdata Selbukommune* (Accessed: 01.05 2021).

Ole Øiene Smedegård, J. S. (2013) *Hensiktsmessige varme- og*

kjøleløsninger i bygninger. Available at:

https://www.enova.no/upload_images/380D698AC6CC4A0D98695AC29342ECDC.pdf.

Selbu (2019) *Energikonsept Selbu Skole*.

Selbu, K. (2019) Funksjonsbeskrivelse Selbu ungdomsskole.

Simenergi (2020) Simien.

Skoglund, U. (2010) *Energiløsningen*. Available at: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2010/energilosningen/#:~:text=Lavtemperatur%20geotermisk%20energi%2C%20Oeller%20grunnvarme,med%20varmepumper%20kombinert%20med%20energibrønn>
. (Accessed: 12/05 2021).

snl (2020) *Reynoldstall*. Available at: https://snl.no/Reynolds'_tall.

Stene, J. T. A., Jacob Stang (2004) *CO₂-varmepumper for oppvarming/kjøling av kontorbygg*. SINTEF.

Wolfgang Kämpel, B. A., Amund Bruland (2012) Energy-use in Norwegian swimming halls.

Zijdemans, D. (2018) *Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer*.

