



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp.
Fakultetet for realfag og teknologi, RealTek

Utnyttelse av fordrøyningsmagasin for regnvann til termisk akkumulering

Utilisation of stormwater detention basins for
thermal energy storage

Rikke Hansen Bjørnland
Industriell Økonomi

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på min femårige mastergrad i Industriell Økonomi, med fordypning innen energifysikk. Arbeidet tilsvarer 30 studiepoeng er gjennomført i perioden januar til mai 2017, ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

Oppgaven omfatter en mulighetsstudie der tema ble valgt etter ønske fra samarbeidsbedriften. Med det som utgangspunkt ble oppgavens problemstilling utviklet i fellesskap. Jeg vil takke alle de ansatte i bedriften som har delt sin kunnskap og kommet med nyttige innspill. Takk for et lærerikt og inspirerende samarbeid.

Jeg vil også takke min veileder Tor Kristian Stevik for konstruktiv veiledning og gode diskusjoner. Til slutt vil jeg takke min familie og mine medstudenter for all støtte og oppmuntring gjennom arbeidet med masteroppgaven, og under studietiden forøvrig.

Rikke Hansen Bjørnland

Ås, 11. mai 2017

Sammendrag

Med klimaendringer som medfører økt regnintensitet og et underdimensjonert avløpsnett skjerper kommunene krav til lokal overvannshåndtering for nye byggeprosjekter. For overvannshåndtering på tomter i urbane strøk med stor andel tette flater er lukkede fordrøyningsmagasin ofte den mest hensiktsmessige løsningen. Det gjøres store inngrep og investeres store summer i disse magasinene, kun for noen få timer styrtregn i året. Denne masteroppgaven er en mulighetsstudie som vurderer om det er praktisk gjennomførbart og økonomisk lønnsomt å benytte et fordrøyningsmagasin for regnvann som et termisk kjølelager for et kontorbygg.

Vannet i lagertanken kjøles ned om natten, når kjølebehovet i bygget er på et minimum. For en mest mulig energieffektiv løsning skal akkumuleringstanken kjøles ned med størst mulig grad av frikjøling mot energibrønner. Det resterende kjølebehovet må dekkes ved hjelp av kjølemaskiner. Den akkumulerte kjøleenergien utnyttes på dagtid, noe som vil kunne redusere effektvariasjonen over døgnet. Hovedinsentivet for innføring av konseptet er de potensielt store økonomiske besparelsene som følger av effektutjevningen konseptet muliggjør.

I dette studiet knyttes problemstillingen opp mot et konkret casebygg. Døgnvariasjon og årsvariasjon av effektbehovet til casebygget ble simulert ved hjelp av simuleringverktøyet IDA ICE 4.7.1. I oppgaven vurderes caseprosjektets mål om en neddimensjonering av kjøleanlegget på 30 % ved utnyttelse av fordrøyningsmagasinet til termisk kjølelager. Med resultatene fra simuleringene lagt til grunn ble nødvendig akkumulert energimengde beregnet til 1 421 kWh for å nå den målsatte neddimensjoneringen. Forutsatt en nattkjøling av tanken ned til 4°C vil det kreve et vannvolum på om lag 122 m³.

De økonomiske betraktningene gjort i oppgaven viser at konseptets totale lønnsomhet hovedsakelig avhenger av tre faktorer: størrelsen på neddimensjoneringen av kjøleanlegget, størrelsen på oppdimensjoneringen av fordrøyningsmagasinet og merkostnadene ved systemendringen. For caseprosjektet viser lønnsomhetsberegningene, under gitte forutsetninger, at en neddimensjonering på 30 % vil gi en besparelse på 439 058 kr.

I oppgaven belyses de største praktiske utfordringene det er forventet at konseptet vil møte. Som et resultat av den vurderingen kommer det fram at energilageret kan få problemer med kjøleleveransen i tilfellet der store mengder varmt regnvann må tilføres akkumuleringstanken kort tid før kjølebehovet i bygget nærmer seg toppunktet. Ytterligere analyser og beregninger må gjøres for å kartlegge hvor stor risikoen er for at denne situasjonen inntreffer og hvor store konsekvensene potensielt kan bli.

Resultatene i denne oppgaven viser at under de gitte forutsetningene vil løsningen være lønnsom og praktisk mulig å gjennomføre. For videre arbeid med konseptet bør flere analyser samt test av systemet gjennomføres for å redusere usikkerheten rundt dette innovative konseptet.

Abstract

Stormwater management in urban environments is today part of the agenda when developing cities. Due to the increased rainfall and the fact that the sewer system in the cities no longer have capacity to handle the large amounts of water does the authorities require improved stormwater management. The use of closed detention basins for stormwater management in the cities is proven highly effective. Implementing these basins to prevent flood require huge investments. This Master's thesis analyses the possibility of utilisation of these stormwater detention basins to store thermal energy. The main task is to evaluate whether this solution is both feasible and profitable.

In this analysis the thermal energy storage is evaluated for the purpose of cooling an office building. By the use of chillers and free cooling from the energy wells the storage tank will be recharged during night time, off-peak hours, and utilised to meet the buildings demand the following day. Energy storage will make it possible to reduce the peak power demand for the office building. The main incentive for implementing this concept is the possibility of huge economic benefits due to the reduced peak power demand.

The concept is evaluated for a general purpose and in relation to a specific building. For the test building the variation in power demand was simulated using the simulation software, IDA Indoor Climate Energy. The main goal for the test building is to downscale the cooling system in the building by 30 % by utilising the stormwater detention basins as thermal energy storage. The simulation results show that the energy storage capacity needs to be 1 421 kWh to reach this goal. Assuming the storage tank is chilled down to 4°C by night, this will require a volume of 122 m³ of water.

The results of the economic analysis show that the concepts profitability mainly depends on three factors: the size of the downscaling of the cooling system, the size of the upscaling of the detention basins and the additional costs implied by the concept. The results show, under the given conditions, that the test project can save 439 058 NOK by implementing the concept and downscale the cooling system by 30 %.

This thesis comprises an analysis of possible challenges and weaknesses related to the concept. The result of this analysis show that one specific situation may cause problems for the system. If warm rainwater is supplied to the storage tank shortly before the peak power demand occurs, the storage can get problems delivering the required cooling energy. Further analysis and tests must be done to determine the possibility of this situation occurring, and the possible consequences.

The analysis and results in this Master's thesis show that the use of stormwater detention basins as thermal energy storage is both possible and profitable. Further evaluations and tests should be done to reduce the amount of uncertainty related to this new and innovative concept.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	II
Sammendrag.....	IV
Abstract.....	VI
Innholdsfortegnelse.....	VIII
Figuroversikt.....	X
Tabelloversikt.....	XI
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Begrepsoversikt	2
1.3 Problemstilling.....	3
1.4 Mål for oppgaven.....	3
1.5 Avgrensninger.....	3
2 Teori.....	4
2.1 Energikrav for kontorbygg.....	4
2.2 Kjøling av kontorbygg	6
2.2.1 Systemer for kjøleproduksjon	7
2.2.2 Systemer for distribusjon og tilførsel av kjøling.....	8
2.2.3 Styring og energieffektivisering av kjølesystem.....	8
2.3 Frikjøling mot energibrønner	10
2.4 Dimensjonering av kjøleanlegg	11
2.5 Interne varmetilskudd	13
2.6 Termisk akkumulering	14
2.7 Overvannshåndtering	15
2.7.1 Åpne fordrøyningsmagasin.....	16
2.7.2 Lukkede fordrøyningsmagasin.....	17
2.7.3 Dimensjonering av nødvendig fordrøyningsvolum	22
2.7.4 Regulering av videreført vannmengde.....	24
3 Konseptbeskrivelse	26
3.1 Utfordringer.....	28
3.1.1 Plassbegrensning.....	28
3.1.2 Drift og vedlikehold.....	28
3.1.3 Styring og regulering	29
3.2 Økonomiske betraktninger.....	29
3.2.1 Merkostnader ved innføring av konseptet.....	29
3.2.2 Neddimensjonering av kjøleanlegg.....	30
3.2.3 Effektbetaling.....	30
4 Presentasjon av casestudiet.....	32
4.1 Prosjektbeskrivelse.....	32
4.2 Kjøling av casebygg.....	32
4.3 Overvannshåndtering for casetomt	33
5 Metodisk tilnærming	34
5.1 Metode for innsamling av kvantitative data	34
5.2 Metode for innsamling av kvalitative data.....	35

6	Simuleringer i IDA ICE	36
6.1	Forutsetninger for simuleringer.....	36
6.2	Verdier benyttet i simuleringene.....	36
6.2.1	Bygningskropp	36
6.2.2	Interne varmetilskudd	37
6.2.3	Solbelastning.....	39
6.2.4	Andre relevante verdier.....	39
7	Resultater	40
7.1	Effektforbruk i eksempelbygg.....	40
7.1.1	Nydalsveien 12.....	40
7.1.2	Gjerdrumsvei 4.....	41
7.2	Økonomiske betraktninger for eksempelbygg.....	42
7.2.1	Potensielle besparelser ved redusert installert effekt, Nydalsveien 12	42
7.2.2	Potensielle besparelser ved redusert installert effekt, Gjerdrumsvei 4	43
7.3	Frikjøling mot eksempelbrønnpark.....	44
7.4	Casestudiet	44
7.4.1	Maksimalt effektuttak og døgnvariasjon.....	44
7.4.2	Nødvendig akkumuleringsvolum.....	45
7.4.3	Beregnet frikjølingspotensial	46
7.4.4	Overvannshåndtering for casetomt	48
7.4.5	Kjølebehov og nedbørsmengder på årsbasis	49
7.4.6	Økonomiske betraktninger	50
7.4.7	Oppsummert resultat og mål for caseprosjektet.....	52
8	Diskusjon	53
8.1	Døgnvariasjon av kjøleeffekt.....	53
8.2	Konseptvurdering.....	54
8.2.1	Lagring av kjøleenergi	54
8.2.2	Vurdering av konseptet ved ekstremvær.....	54
8.2.3	Frikjølingspotensial.....	56
8.2.4	Vurdering av konseptet for et normaldøgn	58
8.2.5	Praktiske utfordringer	59
8.2.6	Økonomiske betraktninger.....	61
8.2.7	Forslag til videre arbeid	63
8.3	Overdimensjonerte kjøleanlegg	63
8.4	Metodisk tilnærming.....	65
8.4.1	Innsamling av kvantitative data	65
8.4.2	Innsamling av kvalitative data	66
8.4.3	Simuleringer.....	66
9	Konklusjon	68
10	Referanser	i
11	Vedlegg	iv

Figuroversikt

Figur 1. Eksempel på energibalanse i en brønnpark over et år ved normal drift (Stene 2004)	-10-
Figur 2. Illustrasjon av energibrønn ved kjøledrift og typiske temperaturer (Bjørnland 2017).....	-11-
Figur 3. Prinsippskisse av LOD-tiltaket regnbed (Braskerud & Paus 2013).....	-16-
Figur 4. Prinsippskisse av lukket fordrøyningsmagasin (Bjørnland 2017).....	-17-
Figur 5. Fordrøyningsmagasin av typen betongrør (BASAL 2012).....	-18-
Figur 6. Fordrøyningsmagasin av typen plastrør (Wavin 2016).....	-18-
Figur 7. Fordrøyningsmagasin av typen prefabrikkert tank (VA/Miljø-blad104 2012).....	-18-
Figur 8. Fordrøyningsmagasin av typen enkel overvannskasset (Wavin 2017).....	-18-
Figur 9. Fordrøyningsmagasin av typen moduloppbyggede overvannskassetter (Wavin 2017).....	-19-
Figur 10. Fordrøyningsmagasin av typen støpt, rektangulært basseng (samarbeidsbedrift).....	-19-
Figur 11. Fordrøyningsmagasin av typen støpt sirkulært basseng (VA/Miljø-blad103 2012).....	-19-
Figur 12. Lukket fordrøyningsmagasin med tre kammer og slamlomme (Bjørnland 2017).....	-20-
Figur 13. Lukket fordrøyningsmagasin med forbehandlingskammer (Bjørnland 2017).....	-21-
Figur 14. Skisse av et horisontalt virvelkammer (VA/Miljø-blad116 2015).....	-25-
Figur 15. Kurve som viser antatt døgnvariasjon av kjøleeffekt for et typisk kontorbygg.	-27-
Figur 16. Orientering og skyggeelementene for casebygget lagt inn i IDA ICE.....	-39-
Figur 17. Grafisk framstilling av døgnvariasjonen til effektuttaket ved kjøling av kontorbygget i Nydalsveien 12, den 1. Juni 2016. Data hentet fra byggets EOS-logg.....	-41-
Figur 18. Grafisk framstilling av døgnvariasjonen til effektuttaket ved kjøling av kontorbygget i Gjerdrumsvei 4, den 1. Juni 2016. Data hentet fra byggets EOS-logg.....	-42-
Figur 19. Simulert døgnvariasjon av kjøleeffektbehovet til casebygget (fra IDA ICE).....	-45-
Figur 20. Nødvendig vannvolum for lagring av ulike mengder termisk energi ved ulike temperaturdifferanser.....	-46-
Figur 21. Viser potensielt effektuttak [kW] fra energibrønner ved ulik termisk ledningsevne når temperaturdifferansen (ΔT) holdes konstant for 9 000 brønnmeter.....	-47-
Figur 22. Viser total nedbør månedsvis i 2014, 2015 og 2016 målt ved Blindern målestasjon.....	-49-
Figur 23: Årssimulering av kjølebehov for casebygget (IDA ICE).....	-50-

Tabelloversikt

Tabell 1. Gjeldende energikrav for kontorbygg i henhold til TEK10.....	-5-
Tabell 2. Krav for passivhusstandard, utover TEK10.....	-5-
Tabell 3. Prosentvis score for oppnåelse av ulike nivåene av BREEAM-NOR sertifikat.....	-6-
Tabell 4. Oversikt over standardverdier for interne varmelaster gitt i NS3031:2014.....	-13-
Tabell 5. Angir tall for brukertetthet for ulike funksjonsområder i kontorbygg.....	-14-
Tabell 6. Oversikt over effektbehov for vanlige typer utstyr i kontorbygg.....	-14-
Tabell 7. Oversikt over ulike arealtyper og anbefalte avrenningskoeffisienter.....	-23-
Tabell 8. Merkestnader ved omgjøring av fordrøyningsanlegg til energilagringssystem.....	-30-
Tabell 9. Oversikt over månedsbasert effekttariff for bedrifter med timemålte anlegg.....	-31-
Tabell 10. Sammendrag av hoveddata for caseprosjektet.....	-32-
Tabell 11. Totalt regnutsatt areal for casetomten, samt fordelingen av ulike arealtyper.....	-33-
Tabell 12. Fordelingen av areal og arealtype med avrenning til fordrøyningsmagasin 1 og 2.....	-33-
Tabell 13. Oversikt over material og tilhørende U-verdier benyttet i simuleringene, samt krav til U-verdier for å oppnå passivhusstandard.....	-37-
Tabell 14. Tidsplaner og antatt tilstedeværelse i casebygget benyttet i simuleringene.....	-37-
Tabell 15. Oversikt over sone, effektbehov og driftstid for utstyr benyttet i simuleringene.....	-38-
Tabell 16. Nøkkeltall for eksempelbygget i Nydalsveien 12.....	-40-
Tabell 17. Nøkkeltall for eksempelbygget i Gjerdrumsvei 4.....	-41-
Tabell 18. Potensiell kostnadsreduksjon ved redusert installert effekt for Nydalsveien 12.....	-43-
Tabell 19. Potensiell kostnadsreduksjon ved redusert installert effekt for Gjerdrumsvei 4.....	-43-
Tabell 20. Energimengden som må akkumuleres for effektutjevning til ulike nivåer.....	-45-
Tabell 21. Beregnet frikjølingspotensial ved ulike ΔT for casebrønnparken.....	-47-
Tabell 22. Værdata og avrenningskoeffisienter som brukes i fordrøyningsberegningene for caseprosjektet.....	-48-
Tabell 23. Fordelingen av nødvendig fordrøyningsvolum til magasin 1 og 2.....	-49-
Tabell 24. Viser de økonomiske betraktningene for konseptet knyttet opp mot caseprosjektet.....	-51-
Tabell 25. Oppsummering av resultater for en neddimensjonering på 30 %, for caseprosjektet.....	-52-

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

De siste års klimaendringer har ført til økt regnintensitet i ekstremregnene, noe som skaper mer overvann enn tidligere. I følge Oslo kommunes strategi for overvannshåndtering, 2013-2030, vil klimaendringene medføre større nedbørsmengder og kraftigere regnskyll i årene framover (Oslo 2013). Dersom prognosene stemmer vil virkninger av klimaeffekter føre til at dobbelt så mange bygninger flomskades de neste 50 årene sammenlignet med i dag (VA/Miljø-blad84 2015). For å forebygge overvannsskader skjerper Oslo kommune kravene til overvannshåndtering for framtidige byggeprosjekter. Overvannet må i større grad enn tidligere håndteres på egen tomt grunnet strenge krav til påslipp på det offentlige ledningsnett. Overvann håndteres på egen tomt ved infiltrasjon eller ved oppsamling i fordrøyningsmagasin.

Fordrøyningsmagasin samler regnvannet og forsinker avrenning. Magasinene dimensjoneres i henhold til VA/Miljø-blad nr. 69 (2015). Det er i hovedsak tre faktorer som er avgjørende ved dimensjonering: nedbørsdata, kommunens tillatte påslippsmengde til det offentlige avløpsnett og volumberegninger. Det gjøres store inngrep og investeres store summer i disse magasinene, for kun noen få timer styrtregn i året. Denne masteroppgaven er en mulighetsstudie som ser på om det er praktisk gjennomførbart og økonomisk lønnsomt å utnytte disse fordrøyningsmagasinene som kjøleenergilager for et kontorbygg.

Termisk lagring gir flere fordeler, både økonomiske og miljømessige. En stor fordel et kontorbygg vil få med et energilager er muligheten til effektutjevning. Døgnvariasjonen til effektforbruket i et kontorbygg er stor fra effekttoppen midt på dagen til minimalt behov utenfor byggets driftstid. Med utjevnet døgnvariasjon reduseres byggets behov for installert effekt. Ved å anlegge et mindre kjøleanlegg reduseres både investeringskostnadene og vedlikeholdskostnadene. I tillegg til de økonomiske besparelsene som følge av et neddimensjonert kjøleanlegg vil effektutjevning medføre besparelser knyttet til den direkte betalingen for effekt.

Nye og skjerpede energikrav i byggeteknisk forskrift gjør at det bygges tettere og bedre isolerte bygg enn noen gang tidligere. Høyt varmetilskudd fra interne laster og bruk av store glassflater i kontorbygg fører til et stort kjølebehov. Erichsen og Horgens rapport "Kjøling i bygg" fra 2011 viser at det normalt er store avvik mellom teoretisk beregnede og målte verdier for energi i bygg. Avviket er desidert størst for energi til kjøling, og ofte overdimensjoneres kjøleanlegg med opptil 20- 30% (Ørnes 2011).

Med bakgrunn i dette tar denne oppgaven for seg en mulighetsstudie av et konsept for akkumulering av kjøleenergi i overvann via fordrøyningsmagasin. Oppgaven omhandler generelle vurderinger av konseptet og vurdering av konseptet tilknyttet et casebygg.

1.2 Begrepsoversikt

Begrep	Forklaring
Akkumulator	Akkumulator (akkumuleringstank) defineres som en lagringsplass for termisk energi. Termisk energi kan lagres i form av varme eller kulde avhengig av hva det er behov for.
AMS	Avanserte måle- og styringssystemer: toveis-kommunikasjon mellom målere og nettselskap. Registrerer strømforbruket på timesbasis og sender automatisk informasjon om forbruket til nettselskapet.
Avrenningskoeffisient	Forholdet mellom nedbør og avrenning fra et område. Koeffisienten er blant annet avhengig av overflateegenskaper og fallforhold i terrenget.
DX-anlegg	”Direct expansion” eller direkte ekspansjonsanlegg er et kjøleanlegg der kuldemediet varmeveksles direkte med luft som skal kjøles ned.
Flomvei	Naturlig eller planlagt trasé som avleder overvann til en resipient.
Interne varmelaster	Med interne varmelaster menes personer, teknisk utstyr og belysning.
Kjølefaktor (COP)	På engelsk brukes ”coefficient of performance” (COP). Angir effektiviteten til kjøleanlegget. Defineres som kjøleytelsen delt på det tilførte elektriske arbeidet til anlegget. Det elektriske arbeidet inkluderer elektrisitetsbehovet til kompressor i kjølemaskin, pumper og eventuelle vifter. Kjølefaktor ved dimensjonerende forhold kalles ofte effektfaktor.
Kjøleytelse	Den termiske energien (varmen) som kjøleanlegget fjerner fra bygget/rommet/sonen. Oppgis vanligvis i kW eller i W per m ² gulvareal.
Kuldebroverdi	En kuldebro er et felt på bygningskroppen med redusert isolasjon og derav økt varmetap. Eksempelvis i overganger mellom gulv og vegg eller tak og vegg. Kuldebroverdien til en overgangsdetalj angir kvantitativt hvor stort varmetap kuldebroen medfører.
Lekkasjetall	Luftvekslinger per time ved 50 Pa.
LENI	”Lighting Energy Numeric Indicator”: Numerisk indikator for belysningens årlige energiforbruk i et bygg [kWh/m ²] i henhold til NS-EN 15193. LENI-tallet brukes til sammenligning av belysningens energieffektivitet mellom ulike bygninger i samme bygningskategori.
Operativ temperatur	Mål for menneskers opplevde eller ”følte” temperatur.
PCM	”Phase change materials”: faseendringsmateriale.
Resipient	Samlebetegnelse på bekk, elv, innsjø, hav, mye eller annen vannkilde som er mottaker av overvann.
Sedimentering	Sedimenter er små partikler som blir transportert, av vann eller et annet medium, og som med tiden legger seg til ro på bunnen til et lag med faste partikler, i vann eller annen væske.
SFP-faktor	”Specific Fan Power”: spesifikk vifteeffekt. Verdien angir forholdet mellom elektrisk effekt nødvendig for drift av vifter i et ventilasjonsanlegg, og den luftmengden som forflyttes ved hjelp av disse viftene.
Spesifikt energiforbruk	Årlig energiforbruk per oppvarmet areal.
U-verdi	U-verdi eller varmegjennomgangstall er et mål som brukes i bygningsindustrien for å angi en bygningsdels varmeisolerende evne [W/m ² °C]. Verdien angir hvor stor effekt (W) som går gjennom 1 m ² av bygningsdelen når temperaturforskjellen mellom flatene er 1°C.
Varmekapasitet	Forholdet mellom varmen som tilføres et legeme og den påfølgende temperaturstigningen. Angis i J/K. Spesifikk varmekapasitet er varmekapasitet per masseenheter av et stoff [J/(K·kg)].
Årsmiddeltemperatur	Gjennomsnitt av månedsmiddeltemperaturene, som er gjennomsnitt av døgnmiddeltemperaturene, som er gjennomsnittstemperatur over et døgn.

Symbolliste

Symbol	Enhet	Forklaring
Q	J	Energi
C_p	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	Spesifikk varmekapasitet: for vann $4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
ΔT	$^\circ\text{C}$	Temperaturdifferanse
m	kg	Masse
E	W	Effekt
k	W/mK	Varmeledningsevne
l	m	Lengde. Her: borehullsdybde

1.3 Problemstilling

”Neddimensjonering av kjøleanlegg i kontorbygg ved utnyttelse av fordrøyningsmagasin for regnvann til termisk akkumulering – praktisk mulig og lønnsomt?”

1.4 Mål for oppgaven

1. Avdekke hvor mye kjøleanlegg kan neddimensjoneres ved utnyttelse av fordrøyningsmagasin for regnvann som lager for kjøleenergi.
2. Avdekke hvor store de økonomiske besparelser kan bli som følge av effektutjevningen som energilagringen muliggjør.

I tillegg til de kvantitative målene ønsker jeg med denne oppgaven å belyse hvilke praktiske utfordringer konseptet står ovenfor.

1.5 Avgrensninger

Termisk akkumulering via fordrøyningsmagasin er et konsept som kan være aktuelt både for lagring av kjøleenergi og varmeenergi. Grunnet tidsbegrensningen for arbeidet med denne oppgaven avgrenses den til å se på muligheten for lagring av kjøleenergi. Det valget ble tatt på bakgrunn av to hypoteser:

1. Kjøleanlegg som installeres i kontorbygg i Norge er kraftig overdimensjonerte.
2. Døgnvariasjonen av effektuttak ved kjøling er større enn ved oppvarming, noe som potensielt kan gi større besparelser ved effektutjevning.

2 Teori

I teorikapittelet presenteres det teoretiske bakteppet som ligger til grunn for oppgavens problemstilling, valg av metoder og valg for systemet. Teorikapittelet danner også grunnlaget for diskusjonskapittelet. Temaene belyses i ulik grad vurdert etter relevans for oppgavens problemstilling og den avsluttende diskusjonen.

➤ Hovedtemaene som belyses i kapittelet er:

- 2.1 Energikrav for kontorbygg
- 2.2 Kjøling av kontorbygg
- 2.3 Frikjøling mot energibrønnparker
- 2.4 Dimensjonering av kjøleanlegg
- 2.5 Interne varmetilskudd
- 2.6 Termisk akkumulering
- 2.7 Overvannshåndtering

2.1 Energikrav for kontorbygg

I henhold til byggt teknisk forskrift (TEK10) står bygningsmassen for ca. 40 % av innenlands energibruk i Norge (TEK10 2016). Det vil si at byggenæringen er en av hovedaktørene i arbeidet for å redusere landets totale miljøpåvirkning fra energibruk. I dette kapittelet presenteres de lovpålagte kravene i byggt teknisk forskrift, krav til passivhusstandard samt en kort beskrivelse av miljøsertifiseringsordningen BREEAM.

TEK10

Kravene til redusert energibruk og tettere bygg blir stadig strengere. Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) skal overholdes ved etablering av nybygg. Kapittel 14 i TEK10 inneholder generelle energikrav, krav til energiforsyning og krav til energieffektivitet. I november 2015 vedtok regjeringen endringer til energikravene i TEK10. Kravene kom som en oppfølging av klimaforliket fra 2012 der mål om å "*Skjerpe energikravene i byggt teknisk forskrift til passivhusnivå i 2015, og nesten nullenerginivå i 2020*" ble satt (Regjeringen.no 2015). De nye og skjerpede energikravene i TEK10 trådte i kraft 1. Januar 2016, med tillatt overgangstid på ett år.

For bygningskategorien kontorbygg gjelder følgende fra 1. Januar 2017:

- Energiramme: I henhold til §14-2 er krav til totalt netto energibehov 115 kWh/m² oppvarmet bruksareal (BRA) per år.
- Energiforsyning: I henhold til §14-4 skal bygninger med over 1 000 m² oppvarmet BRA ha energifleksible varmesystemer og tilrettelegges for lavtemperatur varmeløsninger.
- Energieffektivitet: I henhold til §14-3 er minimumskrav til energieffektivitet som vist i tabell 1.

Tabell 1: Gjeldende energikrav fra 1. Januar 2017. Tabell hentet fra (TEK10 2016)

Energiltak	TEK10
U-verdi yttervegg [W/m ² K]	≤ 0,22
U-verdi tak [W/m ² K]	≤ 0,18
U-verdi gulv på grunn mot det fri [W/m ² K]	≤ 0,18
U-verdi vindu og dør, inkludert karm og ramme [W/m ² K]	≤ 1,2
Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell [luftveksling pr. time]	≤ 0,6

Passivhusstandard

I Norsk Standard for passivhus, NS 3701:2012 "Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – yrkesbygg" stilles det strenge krav til bygningskroppen (standard.no 2012). For å tilfredsstillte kravene for passivhus skal det brukes passive tiltak for å redusere energibehovet. Dette krever blant annet svært god isolasjon av yttervegger, tak, gulv og vinduer.

Utover de lovpålagte kravene i TEK10 må minstekravene presentert i tabell 2 i tillegg til følgende tilleggskrav oppfylles for å tilfredsstillte kravene for passivhusstandard:

- Totalt varmetapstall for transmisjon og infiltrasjon skal ikke overstige 0,40 W/m²K.
- Netto spesifikt energibehov til oppvarming skal ikke overstige 20 kWh/m² per år.
- Netto spesifikt energibehov til kjøling skal ikke overstige 9,40 kWh/m² per år
- Netto spesifikt energibehov til belysning skal ikke overstige LENI 12,5 kWh/m² per år.

Tabell 2: Viser minstekrav i henhold til passivhusstandard, utover kravene i TEK10. Hentet fra NS 3701:2012.

Egenskap	Passivhus	
U-verdi vindu og dør [W/m ² K]	≤ 0,8	
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	≤ 0,03	
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner	≥ 80 %	
SFP-faktor ventilasjonsanlegg [kW/(m ³ /s)]	≤ 1,5	
Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell [luftvekslinger pr. time]	≤ 0,6	
Belysning	Dynamisk dagslys- og konstant lysstyring	Minst 60 % av installert effekt til belysning er underlagt styringssystemet.
	Dynamisk behovsstyring ved tilstedeværelse	Minst en styringssone per rom eller en styringssone per 30m ²

BREEAM

BREEAM er byggebransjens verktøy for å måle miljøprestasjonen for alle fasene i et byggeprosjekt, fra planlegging til overlevert bygg. Formålet med miljøsertifiseringen er å motivere til bærekraftig design og bygging. BREEAM skal ”skape bevissthet blant eiere, brukere, prosjekterende og driftsansvarlige rundt fordelene ved å se bærekraft i et livsløpsperspektiv” (BREEAM-NOR 2015).

BREEAM er en metode som per 2016 brukes i mer enn 70 land. BREEAM-NOR er den norske tilpasningen av BREEAM som er utviklet av Norwegian Green Building Council i samarbeid med bygg- og eiendomsnæringen i Norge. Et BREEAM-NOR sertifikat utstedes i fem nivåer: pass, good, very good, excellent og outstanding. Tabell 3 viser prosentvis score som kreves for å oppnå de ulike nivåene samt hvor stor andel av nybyggene som oppnår de ulike nivåene (BREEAM-NOR 2016).

Tabell 3: Viser prosentvis score for å oppnå de fem ulike nivåene av et BREEAM-NOR sertifikat. Kolonnen til høyre viser hvor stor andel av nybyggene som oppnår de ulike sertifikatene.

BREEAM-nivå	% Score	Andel
Outstanding	≥ 85	Mindre enn øverste 1 % av alle nybygg, krever innovasjon.
Excellent	≥ 70	Øverste 10 % av alle nybygg, beste praksis.
Very Good	≥ 55	Øverste 20 % av nybygg, svært god praksis.
Good	≥ 45	Øverste 50 % av nybygg, gjennomsnittlig god praksis.
Pass	≥ 30	Øverste 75 % av nybygg, god standard praksis.
Unclassified	≤ 30	Ett eller flere minstekrav er ikke oppfylt, eller samlet poengsum for laveste klasse er ikke nådd.

Sertifiseringen baseres på dokumentert miljøprestasjon innenfor følgende ni kategorier: ledelse, helse- og innemiljø, energi, arealbruk og økologi, transport, vann, materialer, avfall og forurensning. De sentrale temaene som bedømmes innenfor kategorien energi er: byggets energibehov, lav- eller nullkarbonløsninger, delmåling av energi, energieffektive installasjoner og energimerkeordningen.

2.2 Kjøling av kontorbygg

Behovet for kjøling av kontorbygg bestemmes av flere faktorer. Der de viktigste faktorene er mengden av interne laster, solbelastning, utetemperatur og luftfuktighet. Årlig energiforbruk per kvadratmeter oppvarmet areal for kontorbygg har ikke gått merkbart ned de siste årene, til tross for at kravene til energieffektivisering har blitt strengere. Dette skyldes blant annet bruk av større mengde teknisk utstyr og økte krav til inneklima, noe som øker ventilasjonsbehovet. Dette er en medvirkende årsak til det store fokuset på energieffektivisering av både nye og eksisterende kontorbygg (Stene & Smedegård 2013).

I praksis betyr de siste endringene av energirammene i byggt teknisk forskrift lavere U-verdier for vinduer, dører og gulv, lavere SFP-faktor og lavere lekkasjetall. Rammene setter krav til tettere og bedre isolerte bygg enn noen gang tidligere. Økt isolasjon reduserer varmetapet i bygget og kan ha stor innvirkning på energibruken. På den annen side kan økt isolasjon og tetting av byggene medføre problemer for inn klima i bygget. Dersom man skal opprettholde et godt termisk inn klima og unngå fuktproblemer må man tilføre større luftmengder til rommene, noe som vil øke energibehovet til ventilasjonen i bygget. I henhold til §13-4 i forskrift til tekniske byggverk (TEK10) skal *"termisk inn klima i rom for varig opphold tilrettelegges ut fra hensyn til helse og tilfredsstillende komfort ved forutsatt bruk"* (TEK10 2012). Videre anbefales det at lufttemperaturen holdes under 22°C ved lett fysisk inn arbeid i perioder med oppvarmingsbehov, og at temperaturer under 19°C eller over 26°C bør unngås.

Et kjennetegn for moderne kontorbygg er bruk av store glassflater. Arkitektenes ønske om romfølelse, lys og utsikt er en av hovedårsakene til kontorbyggenes store energibehov både om sommeren og om vinteren. Til tross for de skjerpede kravene til U-verdi for vinduer vil varmetapet om vinteren og varmetilskuddet om sommeren til glassflatene fremdeles være vesentlig større enn for en yttervegg. Varmetilskuddet sola tilfører bygget om sommeren sammen med tilskuddet fra interne varmelaster, som er betydelige i kontorbygg, øker behovet for kjøling for å opprettholde ønsket inn temperatur og termisk komfort i bygget.

Det finnes flere metoder for kjøling av kontorbygg og under følger en kort beskrivelse av de mest brukte. Systemene er inndelt i to kategorier: systemer for produksjon og systemer for distribusjon av kjøling.

2.2.1 Systemer for kjøleproduksjon

Lokale kjølemaskiner

Den mest brukte metoden for produksjon av kjøling er ved bruk av kjølemaskiner, eller en reversert varmepumpe. Kjølemaskinen benytter et sirkulerende kjølemedium (f.eks. ammoniakk eller karbondioksid) som ved hjelp av en kompressor kondenserer og avgir varme i kondensatoren og ved hjelp av en ekspansjonsventil tar opp varme og fordampes, i fordamperen. Kjølemaskiner baserer seg på prinsippet om at faseendring mellom væske og gass krever energi fra omgivelsene. Dette utnyttes på to ulike måter, enten ved å avgi kjøling direkte til ventilasjonsluften (DX-system) eller indirekte til et vannbårent sirkulasjonssystem (isvannsystem) som videre tilfører kjøling til lokale enheter rundt i bygget (Thyholt & Dokka 2001).

Frikjøling

Der sjøvann, brakkvann, ellevann eller energibrønner (kap. 2.3) er tilgjengelig kan disse kildene brukes til kjøling av bygget. Det vanligste er å ha et lukket vannbårent sirkulasjonssystem som varmeveksles direkte mot kildene. Om sommeren når temperaturen i kildene er høy og kjølebehovet er stort klarer ofte ikke et slikt system å kjøle bygget til ønsket temperatur på egenhånd. Da kan en kjølemaskin benyttes som spisslast (Thyholt & Dokka 2001).

Fjernkjøling

Kjøling tilføres bygget via en fjernkjøleledning og varmeveksles mellom fjernkjøleledning og et vannbårent lukket sirkulasjonssystem i bygget etter samme prinsipp som systemet beskrevet over. Via det lukkede sirkulasjonssystemet i bygget tilføres kjøling til kjølebatterier og eventuelt andre lokale kjøleenheter i bygget.

2.2.2 Systemer for distribusjon og tilførsel av kjøling

Løsninger for distribusjon og tilførsel av kjøling kan deles i to kategorier: ventilasjonskjøling og lokalkjøling. Ventilasjonskjøling er mest brukt ved kjøling av kontorbygg.

Sentralkjøling (ventilasjonskjøling)

Ventilasjonskjøling vil si nedkjøling av innblåst luft ved bruk av et kjølebatteri. Kjølebatteriet kan enten være en del av et ventilasjonsaggregat eller stå fritt i ventilasjonskanalen. Avgitt kjøleeffekt i kjølebatteriet styres vanligvis etter ønsket tilluftstemperatur. Kjølebatterier brukes også til avfukting av luft ved at vann kondenserer på kjølebatterioverflatene. I et fuktig klima kan energibruk til avfukting av luft være større enn energibruk til kjøling av luft, dette er imidlertid sjeldent i norsk klima (Thyholt & Dokka 2001).

Lokalkjøling (romkjøling)

Det stilles strenge krav til termisk komfort i kontorbygg. Kombinasjonen av tettere bygg og økte interne varmelaster, spesielt teknisk utstyr, har ført til økt behov for lokale kjøleenheter. Lokale kjøleenheter plasseres direkte i rom med ekstra stort kjølebehov, dette gjelder vanligvis rom med store mengder teknisk utstyr eller rom med spesielt stor solbelastning. Eksempel på vanlige lokale kjøleenheter er kjølebløt, kjøletak, fasadeapparater og fancoils.

2.2.3 Styling og energieffektivisering av kjølesystem

Styling av ventilasjonskjøling

Avgitt kjøleeffekt til kjølebatteriet styres vanligvis etter tilluftstemperatur.

Tilluftstemperaturen kan være konstant, kompensert etter utetemperatur, kompensert etter temperatur på avtrekksluft eller behovsstyrt. Under følger en nærmere beskrivelse av ulike metoder for styling av ventilasjonskjøling.

- **Konstant tilluftstemperatur:** Ved bruk av en konstant tilluftstemperatur styres ikke ventilasjonsluften etter det faktiske og varierende behovet i bygget. Vanlig tilluftstemperatur for kontorbygg er 16- 18°C. Forutsatt at luftmengden som tilføres bygget også er konstant vil et slikt styringssystem tidvis kjøle bygget mer enn nødvendig. Denne avkjølingen fører til økt oppvarmingsbehov noe som gjør denne løsningen lite energieffektiv (Thyholt & Dokka 2001).

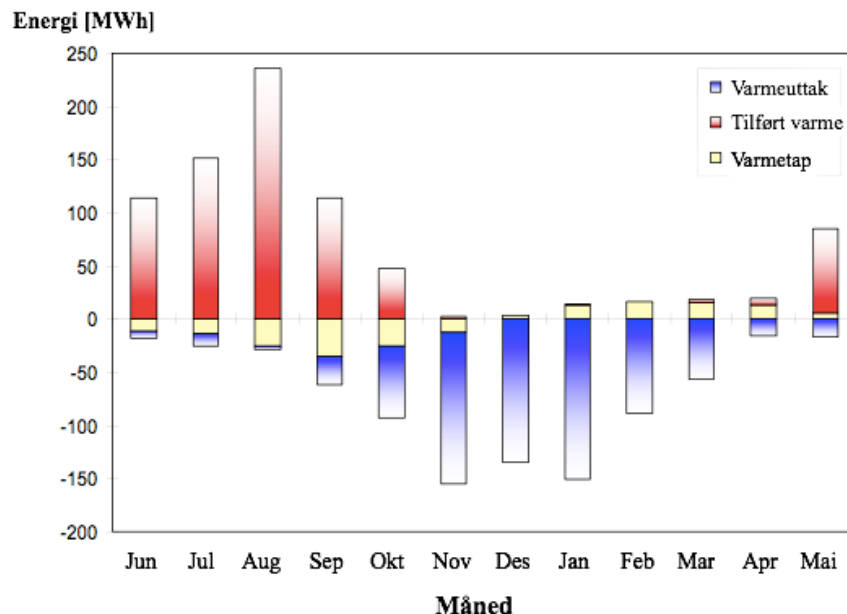
- **Utetemperaturkompensert tilluftstemperatur:** Et mer avansert styringssystem oppnås ved å styre tilluftstemperaturen etter utetemperatur. Eksempelvis når utetemperaturen er over 20°C holdes tilluftstemperaturen på 15°C og når utetemperaturen er under 0°C holdes tilluftstemperaturen på 20°C, og mellom disse punktene reguleres tilluftstemperaturen lineært ut ifra utetemperaturen. Et slikt styringssystem er bedre tilpasset kjølebehovet i bygget, men er heller ingen optimal løsning da sammenhengen mellom kjølebehovet og utetemperaturen ikke alltid er lineær.
- **Avtrekkskompensert tilluftstemperatur:** Temperaturen på avtrekksluften i ventilasjonsanlegget er en god indikator på kjølebehovet i bygget (Thyholt & Dokka 2001). Et eksempel på en slik styring kan være å tilføre luft med temperatur på 15°C når avtrekkstemperaturen er over 24 °C, og tilføre luft med temperatur på 19°C når avtrekksluften har en temperatur på under 21 °C med en lineær regulering mellom disse settpunktene. Dette styringssystemet tar byggets kjølebehov i betraktning og vil derfor være relativt energieffektiv. I bygg der kjølebehovet varierer mye fra rom til rom er heller ikke denne metoden optimal med tanke på energibruk.
- **VAV-anlegg:** Den mest energieffektive måten å styre et ventilasjonsanlegg på er med et behovsstyrt VAV-anlegg (variable air volume). Med denne løsningen styres tilført luftmengde etter kjølebehovet i rommet. Luftmengdene styres vanligvis etter romtemperaturen og vil dermed kunne være et alternativ til lokale kjøleenheter. Luftmengdene kan også styres ved f.eks. bevegelsesdetektor, CO₂-måler, bryter eller ved hjelp av tidsstyring. Hensikten med behovsstyrt ventilasjon er å redusere energiforbruket. Ved at VAV-anlegget går med redusert hastighet ved redusert behov og slår seg av når det ikke er kjølebehov i bygget vil denne typen anlegg i praksis alltid være mer energieffektivt sammenlignet med et CAV-anlegg (constant air volume).

Styring av lokalkjøling

Lokale kjøleenheter reguleres normalt etter romlufttemperatur eller operativ temperatur. Operativ temperatur vil si menneskets opplevde eller ”følte” temperatur, denne tar også hensyn til strålingsvarme fra for eksempel soltilskudd i rommet.

2.3 Frikjøling mot energibrønner

Energibrønner kan brukes som et termisk lager for et kontorbygg. Den stabile temperaturen i berggrunnen utnyttes ved at varme hentes ut ved varmebehov og tilbakeføres ved kjølebehov (frikjøling). Ved varmebehov i bygget tappes brønnene for termisk energi og temperaturen i brønnparken synker. Om sommeren da bygget har stort kjølebehov tilføres varme til brønnparken og temperaturen stiger. Figur 1 viser et eksempel på energibalansen i en brønnpark i over et år. Blå søyler viser varmeuttak, røde viser varmetilførsel eller frikjøling mot brønnene og gul viser varmetapet fra brønnene til fjellet rundt.



Figur 1: Viser et eksempel på energibalansen i en brønnpark i løpet av et år. Kilde: (Stene 2004), tilpasset av Rikke Bjørnland.

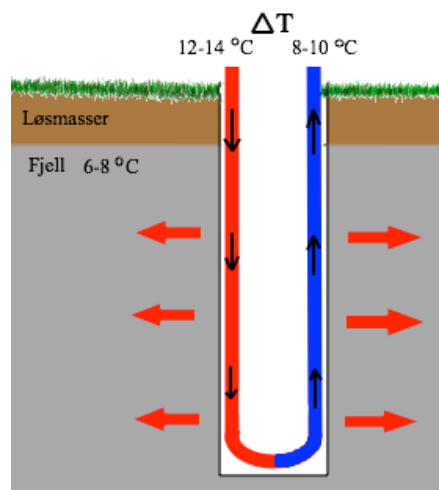
For å unngå en permanent temperaturendring i brønnparken er det viktig at årlig tilbakeført varmeenergi er tilnærmet likt årlig varmeuttak. I bygg med stort varmeuttak løses dette ved å ”lade” brønnene ved å tilføre varme fra ulike kilder som avtrekksluft etter varmegjenvinneren i ventilasjonssystemet, gjenvinne varme fra spillvann eller ved å ta i bruk solfangere (Stene 2004).

Temperaturen i de øverste 15- 20 meterne av jordskorpen vil variere i takt med overflatetemperatur og årstid. Dypere enn dette ligger temperaturen ganske konstant nær årsmiddeltemperatur (Reitan 2015). Årsmiddeltemperaturen ved Blindern målestasjon i Oslo i 2016 var 5,7 °C (yr.no 2017). Faktorer som påvirker temperaturen i de dypere lagene og dermed energipotensialet i en brønn er berggrunnens varmeledningsevne, grunnvannsstrømmer og variasjonen i varmeuttak og varmetilførsel over året. Berggrunnens varmeledningsevne er et mål på hvor godt berget leder varme inn i borehullet (NGU 2016). Varmeledningsevne varierer først og fremst med berggrunnens kvartsinnhold, i tillegg er lagdeling og tekstur av betydning (Hilmo et al. 2000).

Effektoverføringen er avhengig av temperaturen og berggrunnens varmeledningsevne og beregnes ved bruk av følgende formel:

$$E = kL\Delta T \quad \leftrightarrow \quad k = \frac{E}{L\Delta T} \quad (1)$$

Der E er estimert effektuttak fra brønnen [W], L er borehullsdybden [m], k er varmeledningsevnen i berggrunnen [W/mK] og ΔT er temperaturredifferansen på vannet som føres ned i brønnen og vannet som pumpes opp i retur, se figur 2. Temperaturen på vannet som føres fra bygget i kjøledrift ligger normalt på 12- 14°C, da kan det forventes en returtemperatur på 8- 10 °C. Med denne forutsetningen vil det si at ΔT i praksis vil variere mellom 2- 6°C.



Figur 2: Illustrasjon av energibrønn ved frikjøling og typiske temperaturer (egen tilvirkning).

Typisk effektuttak er 30- 40 W per meter aktivt borehull, med et variasjonsområde på 20- 80 W/m (ENOVA 2013). I henhold til en rapport publisert av Norges geologiske undersøkelse (NGU) kan varmeledningsevnen i fjell variere mellom 2- 6 W/mK (Hilmo et al. 2000).

2.4 Dimensjonering av kjøleanlegg

I følge rapporten "Hensiktsmessige varme- og kjøleløsninger i bygninger" utarbeidet av Stene og Smedegård for COWI i 2013 forventes det at fremtidige revideringer av TEK-kravene vil heve byggestandarden på nivå med det vi i dag kjenner som passivhusstandard. Nye og skjerpede krav til bygningskroppen skal redusere det årlige kjøleenergiebehovet til kontorbyggene. Det innebærer at den ekvivalente driftstiden (årlig kjøleenergiebehov dividert på maksimalt kjøleeffektbehov) for klimakjøling i nye kontorbygg stadig blir kortere (Stene & Smedegård 2013). En utfordring for kjøleanlegg i kontorbygg er kravet om å dekke et døgnkontinuerlig lavt grunnbehov for kjøling av tekniske rom hele året samtidig som anlegget må være dimensjonert for å dekke de største effekttoppene som kan inntreffe. I nye kontorbygg der ekvivalent driftstid for kjøling stadig blir kortere må det legges vekt på å utforme kjølesystemet slik at det kan dekke nødvendig kjølebehov med høy effektfaktor (COP) i hele driftsområdet (Stene & Smedegård 2013). Overdimensjonering av kjøleanleggene fører til at anleggene går på dellast store deler av året. Høy grad av kjøring på dellast gir dårlig utnyttelse av kjøleanlegget som vil oppnå en lavere COP i perioder med lavt

effektbehov (Thyholt & Dokka 2001). I tillegg til dellastproblematikken vil overdimensjonerte kjøleanlegg føre med seg unødvendig høye kostnader.

Overdimensjonerte sirkulasjonspumper i isvannssystemet vil avgi varme, denne varmen må igjen fjernes av kjølemaskiner eller fjernkjøling. Energibruk til fjerning av varme avgitt fra sirkulasjonspumpene fører til en konstant økning av kjøleeffekt i bygget, selv i perioder der bygget ikke har kjølebehov. Undersøkelser viser at installert kjøleeffekt gjennomsnittlig ligger mellom 30- 100 W/m² (Thyholt & Dokka 2001). Mange kontorbygg forsøker å minimere bruken av lokal kjøling og benytter hovedsakelig ventilasjonskjøling. I rom med store interne varmelaster eller spesielt stor solbelastning er det ofte ikke tilstrekkelig med ventilasjonskjøling. For å oppnå ønsket operativ temperatur vil det være behov for svært store luftmengder. Tilførsel av luft med høy hastighet og lav temperatur vil også kunne oppleves som trekk for brukerne. I disse spesialrommene tas derfor lokale kjøleenheter i bruk. For kontorer med konstant tilluftsmengde, CAV-anlegg, dimensjoneres en installert kjøleeffekt på ca. 50 W/m² (Thyholt & Dokka 2001).

Det er ofte store avvik mellom teoretisk beregnet og målt energi i bygninger. Vanligvis er avviket spesielt stort for energi til kjøling. I henhold til Erichsen og Horgens rapport "Kjøling i kontorbygg" fra 2011 kan årsaken til det være mangel på reelle erfaringstall for størrelsen til interne varmelaster (kap. 2.5). Bygningers energiytelse måles normalt opp mot standardverdier fra NS 3031. NS 3031 tar i bruk et standardisert sett med inndata for ulike bygningskategorier. Inndataene omfatter blant annet gjennomsnittlig energi til og varmetilskudd fra interne laster som utstyr, belysning og personer i W/m². Grunnlaget for fastsettelse av disse verdiene er basert på målinger fra eksisterende bygg. Grunnlaget ansees for å være relativt tynt da det er svært vanskelig å skille mellom varmetilskudd fra teknisk utstyr og belysning. I tillegg til problemene med å skille varmetilskuddet fra ulike interne laster fra hverandre kommer vanskelighetene med varmetilskudd fra personer. Varmetilskudd fra personer avhenger av flere faktorer som persontetthet, tilstedeværelse, aktivitetsnivå og bekledding. Faktorer som igjen avhenger av virksomheten og driftstiden. I følge Erichsen og Horgens rapport har det ikke blitt gjort tilstrekkelig med studier til å fastsette gode representative standarder for varmetilskudd fra interne laster for de ulike bygningskategoriene (Ørnes 2011).

I nyere kontorbygg har det blitt mer vanlig å ha egne rom der det installeres store IT og IKT systemer. Disse rommene forårsaker spesielt stor varmeproduksjon og har et vesentlig større kjølebehov enn et gjennomsnittlig kontor, noe standardene ikke tar hensyn til. I kontorbygg med slike spesialrom vil det være spesielt store avvik mellom teoretisk beregnet og målt energibruk når det kommer til kjøling (Ørnes 2011).

2.5 Interne varmetilskudd

Med internt varmetilskudd menes varme som avgis fra lys, utstyr og personer i bygningen. Internt varmetilskudd har stor betydning for energibalansen i de fleste bygninger og betydningen blir større jo tettere og bedre isolerte byggene er. I nye bygg som tilfredsstillende kravene i TEK10, med god isolasjon og økt bruk av lys og teknisk utstyr kan det interne varmetilskuddet bli større enn varmen fra det egentlige oppvarmingsanlegget (Novakovic et al. 2007). Det interne varmetilskuddet bidrar dermed til å redusere oppvarmingsbehovet når det er kaldt ute. På den annen side fører varmetilskuddet til at de aller fleste bygninger, selv i vårt nordlige klima, får økt behov for kjøling for å oppnå et tilfredsstillende innneklima. I NS3031:2014 er det oppgitt standarder for gjennomsnittlig varmetilskudd fra belysning, utstyr og personer, disse er presentert i tabell 4.

Tabell 4: Standardverdier for gjennomsnittlig varmetilskudd i driftstid og årlig totalt energitilskudd fra belysning, utstyr og personer. Verdier hentet fra i NS3031:2014 (standard.no 2014)

Bygningstype	Gjennomsnittlig varmetilskudd					
	Belysning		Utstyr		Personer	
Kontorbygg	W/m ²	kWh/ (m ² år)	W/m ²	kWh/ (m ² år)	W/m ²	kWh/ (m ² år)
	8,0	25	11,0	34	4,0	13

Varmetilskudd fra belysning

Belysning gir et stort bidrag til internt varmetilskudd i kontorbyggene. Med et styringssystem for utnyttelse av dagslys eller basert på tilstedeværelse kan varmetilskuddet fra belysning i følge norsk standard reduseres med opp til 20 % (standard.no 2014). Det har de siste årene vært en sterk utvikling av lysrør, både når det gjelder lyskvalitet og effektivitet. Installert effekt og brukstid avhenger av bygningskategori, bygningens alder, romtype og hvilken type lys som installeres. Typiske verdier for installert effekt til belysning i kontorer og forretningsbygg oppgis til 5- 15 W/m² (Novakovic et al. 2007).

Varmetilskudd fra personer

Varmetilskudd fra personer i bygget avhenger som nevnt blant annet av aktivitetsnivået og angis enten i W/m² kroppsoverflate, eller i den relative enheten met. Per definisjon er 1 met = 58,15 W per m² kroppsoverflate. For normalt kontorarbeid angis 1,1- 1,5 met som typiske verdier (Novakovic et al. 2007). Bekledningen til personene har isolerende effekt og har stor betydning for varmeutvekslingen. Isolasjonsevnen angis enten i m²K/W eller i den relative enheten clo. Per definisjon er 1 clo = 0,155 m²K/W. Normale verdier for bekledning tilpasset innendørsbruk for en stillesittende person er 0,7- 1,0 clo (Novakovic et al. 2007).

Tabell 5 viser en oversikt over ulike funksjonsområder i et kontorbygg og tilhørende typiske verdier for brukertetthet. Tallene er hentet fra teknisk manual BREEAM-NOR for nybygg 2016 (BREEAM-NOR 2016).

Tabell 5: Angir tall for brukertetthet for ulike funksjonsområder i kontorbygg.

Funksjonsområde i kontorbygg	Brukertetthet [personer/m ²]
Kontorområde	0,108
Mattilberedningsområde (bemannet)	0,108
Resepsjon	0,110
Lager	0,009
Serverrom	0,096

Varmetilskudd fra utstyr

Varmetilskudd fra utstyr varierer sterkt for ulike bygningskategorier. For kontorbygg er det også store individuelle variasjoner mellom ulike typer rom. Tabell 6 viser en oversikt over utstyrstype med tilhørende effektbehov for vanlige typer utstyr i kontorbygg.

Tabell 6: Oversikt over effektbehov for vanlige typer utstyr i kontorbygg (Novakovic et al. 2007).

Utstyrstype	Effekt [W]
CRT fargeskjerm	90-140
LCD fargeskjerm	12-40
PC, stasjonær (u.skjerm)	50-70
PC, bærbar	12-20
Kopimaskin i drift	1 000-2 000
Kopimaskin i ventemodus	200-600
Kopimaskin i dvalemodus	30-300
Blekkskriver	30-40
Laserskriver	200-400
Kaffetrakter	200-500
Mindre kjøleskap	200-300

Brukstiden til denne typen utstyr tilsvarer for de fleste rommene i kontorbygget normal kontortid. Spesielle rom som serverrom vil ha store mengder teknisk utstyr og døgnkontinuerlig belastning, dette bør tas hensyn til ved beregning av varmetilskudd i disse rommene.

2.6 Termisk akkumulering

Energiakkumulering defineres som lagring av energi for senere bruk ved hjelp av mekaniske, termiske, elektriske eller kjemiske metoder (Rosvold & Hofstad 2013). Lagring av termisk energi gjøres i praksis gjennom å varme opp eller kjøle ned et lagringsmedium slik at energien kan benyttes til oppvarming eller kjøling på et senere tidspunkt (fornybar.no 2016). I følge Rosvold og Hofstad er de tre viktigste egenskapene til et termisk energilager: høy energitetthet (energimengde som kan lagres i et gitt volum), mulighet for hurtig oppladning

og uttak og lavt energitap knyttet til både oppladning, uttak og lagringsperiode (Rosvold & Hofstad 2013). Termisk lagring kan foregå i mange ulike materialer. Vann har høy spesifikk varmekapasitet (4 180 J//K·kg) og er derfor et godt egnet lagringsmedium for termisk energi (fornybar.no 2016). I tillegg til dette er vann mye brukt fordi det er en billig og lett tilgjengelig ressurs.

Ved beregning av nødvendig vannvolum for lagring av ønsket mengde termisk energi, ved gitte temperaturdifferanser benyttes sammenhengen vist med formel 2:

$$m = \frac{Q}{C_p \Delta T} \quad (2)$$

Der m er den nødvendige vannmengden [kg], beregningene i denne oppgaven legger til grunn at 1 l vann veier 1 kg. Q er termisk energi [J], C_p er den spesifikke varmekapasiteten til vann på 4 180 J/kg·°C og ΔT er temperaturdifferanse [°C]. Som sammenhengen i formel 2 viser vil den nødvendige vannmengden for lagring av en gitt mengde termisk energi være avhengig av størrelsen på temperaturdifferansen (ΔT). For å begrense det nødvendige vannvolumet er det ønskelig å oppnå en så stor temperaturdifferanse som mulig.

2.7 Overvannshåndtering

I en rapport fra Norges Offentlige Utredninger (NOU) med tittelen ”Overvann i byer og tettsteder” drøftes klimaendringer og overvannshåndtering i urbane strøk. Økt nedbør i kombinasjon med økt areal med tette flater i byene gir en hurtigere og større avrenning som må håndteres på en trygg måte. Hvilke overvannstiltak som er mest hensiktsmessig for et spesifikt prosjekt vil være avhengig av lokale forhold og forventede klimaendringer. Nedbørsfeltet må vurderes i sin helhet og kapasiteten til overvannssystemet må sees i sammenheng med utbyggingsplaner og kapasiteten til ledningsnett (NOU 2015). For håndtering av overvann benyttes en strategi kalt ”treleddsstrategien”. I treleddsstrategien deles tiltakene for overvannshåndtering inn i tre kategorier:

1. Forsinket avrenning gjennom infiltrasjon
2. Forsinket avrenning gjennom fordrøyning
3. Trygg avledning til resipient

Prinsippet for strategien er at overvannet i første ledd skal håndteres lokalt og infiltreres der det er mulig. Overskuddsvann som ikke lar seg infiltrere ledes i neste ledd føres til et fordrøyningsanlegg. Dersom kapasiteten til både infiltrasjonsanlegget og fordrøyningsanlegget overstiges avledes overvannet på en trygg måte til en egnet resipient. Ved å følge treleddsstrategien skal overvannssystemet håndtere både normal og ekstrem nedbør på en tilfredsstillende måte. I enkelte tilfeller kan også ekstra sikringstiltak tas i bruk. Sikringstiltak kan være tiltak rundt eller på bygninger og infrastruktur slik at de beskyttes mot vann, eller i verste fall kan tåle å stå under vann i korte perioder (NOU 2015).

Videre i denne oppgaven skal muligheten for utnyttelse av overvann fra et lukket fordrøyningsmagasin vurderes. Bruk av fordrøyningsmagasin er et tiltak som inngår i det andre leddet i treleddsstrategien. Fordrøyning er fellesbetegnelsen for alle typer LOD-tiltak, lokal overvannsdiskonering, som har til hensikt å forsinke avrenning gjennom oppsamling av regnvann. Vannet samles og lagres midlertidig i magasiner for så å ledes kontrollert til lokal infiltrasjon, til offentlig ledningsnett eller til nærmeste resipient (VA/Miljø-blad104 2012).

Generelt deles fordrøyningsmagasin inn i to hovedtyper:

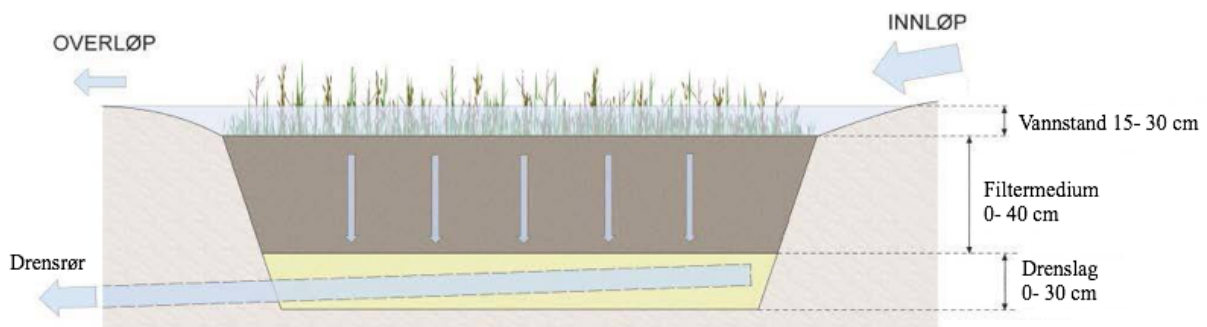
- Åpne magasin: dammer, regnbed, åpne bassenger og grønne tak.
- Lukkede magasin: tanker, kummer, rørmagasin, støpte konstruksjoner, kassetter og steinmagasin.

Hvilke tiltak som er de mest hensiktsmessige må vurderes i hvert enkelt tilfelle. Under følger en nærmere beskrivelse av utvalgte LOD-tiltak som er aktuelle til fordrøyning av overvann fra tomt med kontorbygg i urbane strøk.

2.7.1 Åpne fordrøyningsmagasin

Regnbed

Regnbed utformes som en forsenkning i terrenget der vann holdes tilbake på regnbedoverflaten før det infiltreres ned gjennom ett filtermedium. Figur 3 viser prinsippet for oppbyggingen av et regnbed. Den maksimale vannstanden i selve regnbedoverflaten er 30 cm, hovedsakelig av sikkerhetsmessige årsaker da regnbed ofte lokaliseres i tett befolkede områder som ved parkeringsarealer, langs veier, på gårdsplasser, som del av en park eller hage (Braskerud & Paus 2013).



Figur 3: Prinsippkisse av LOD-tiltaket regnbed. Bildet hentet fra: (Braskerud & Paus 2013). Tilpasset av Rikke Bjørnland.

Regnbed er ofte foretrukket på grunn av estetisk kvalitet og god fordrøyningsevne. Noen ulemper med dette tiltaket er at det krever relativt mye areal og vedlikehold. Filtermediet og beplantningen krever mye vedlikehold for å opprettholde både det estetiske og fordrøyningsevnen. Regnbed er foreløpig lite utprøvd i norsk klima og man vet lite om hvordan tiltaket kommer ut i forhold til effekt, kostnader, vedlikehold og sosial aksept sammenliknet med andre tiltak (Braskerud & Paus 2013).

Grønne tak

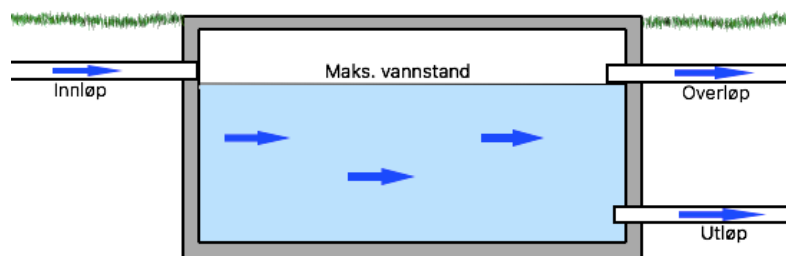
Beplantning på bygningstak i tettbebygde strøk blir mer og mer vanlig og har flere fordeler. I tillegg til det estetiske og det forbedrede bymiljøet vil plantelaget på taket bidra til å isolasjon og overvannshåndtering. Varmetapet fra taket minker og bygget varmes ikke opp i like stor grad om sommeren. På taket vil noe av vannet anvendes av plantene, noe vil fordampe, noe vil infiltreres mens det resterende vannet vil forsinkes og avrenningen vil skje langsommere enn ved andre typer tak (VA-miljøblad107 2013).

Mengden av vann som holdes tilbake og som anvendes av plantene avhenger av tykkelsen på vekstlaget og typen beplantning. I henhold til VA-/Miljøblad nr. 107 "Grønne tak" kan avrenningskoeffisienter variere mellom 0,1 til 0,6 avhengig typen beplantning og tykkelse på vekstlag (VA-miljøblad107 2013). I henhold til rapporten er det på årsbasis målt en reduksjon i avrenning på 50- 60 % for tak med vekstlag under 100 mm, og 70- 80 % ved tak med vekstlag opptil 200 mm. Ved små nedbørsmengder holdes alt vannet tilbake, og ved større nedbørsmengder holdes noe tilbake mens det overflødig vannet forsinkes. Overskuddsvannet som renner av taket og må håndteres av andre LOD- tiltak kan ledes til åpne regnbed, gressarealer eller overløp til avløpsledning.

Vedlikehold av grønne tak inkluderer inspeksjon og rengjøring av taksluk, taknedløp og takrenner. Det bør gjøres jevnlig spesielt etter store nedbørsmengder eller stort løvfall (VA-miljøblad107 2013).



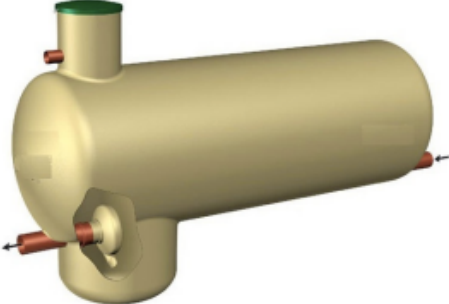
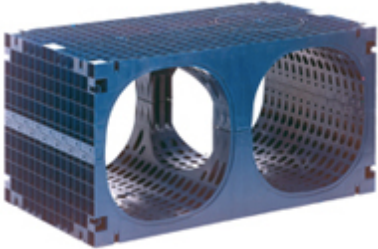
2.7.2 Lukkede fordrøyningsmagasin

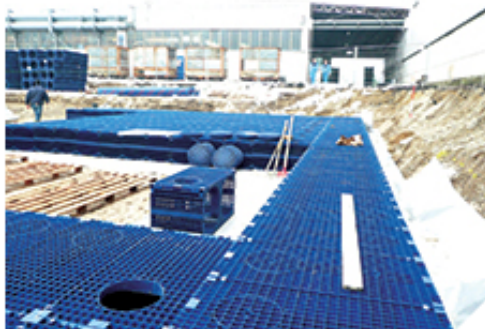
Fordrøyningsmagasin har ofte et stort volum og krever dermed stor plass. I byer og tettbebygde strøk med stor andel asfalt og andre tette overflater er ofte det mest hensiktsmessige tiltaket bruk av lukkede fordrøyningsmagasin som graves ned under bakkenivå. Figur 4 viser en prinsippskisse av et lukket fordrøyningsmagasin der regnvannet ledes til magasinet via et innløp. Magasinet er normalt utstyrt med et utløp som leder vannet med ønsket hastighet til offentlig ledningsnett eller nærmeste resipient, samt et nødoverløp.



Figur 4: Prinsippskisse av et lukket fordrøyningsmagasin. Illustrasjonen viser innløp, utløp og overløp (egen tilvirkning).

Fordrøyningsmagasin kan utformes på mange ulike måter. Figurene 5- 11 viser de mest brukte typene av lukkede fordrøyningsmagasin.

Magasintype	Beskrivelse
<p>Rørmagasin: Betong</p>  <p><i>Figur 5: Bildet er hentet fra Basals produktkatalog 2012</i></p> <p>Rørmagasin: Plast</p>  <p><i>Figur 6: Bildet er hentet fra Norsk Wavin AS</i></p>	<p>Figur 5 viser et fordryningsmagasin som legges i betongrør under bakkenivå. Til dette formålet benyttes normalt dimensjoner på 1 000- 2 400 mm. Bruk av betongrør til fordryning er en kjent og velprøvd metode som gir et magasin som tåler stor belastning. Installasjon og vedlikehold er enkelt og magasinet er kostnads- og arealbesparende (BASAL 2012).</p> <p>Fordryningsrør kan også lages av ulike typer plast, vanligst er PE eller PP. Rørene finnes i ulike dimensjoner, produsenten Wavin leverer rør med diameter opp til 3 000 mm. Figur 6 viser et fordryningsrør, Wavin XL. Mest brukt ved bruk av plastrør er doble vegger der innerveggen er glatt og ytterveggen er spiralviklet for ekstra stor motstand mot sprekkvekst (Wavin 2016).</p>
<p>Kum- og tankmagasin</p>  <p><i>Figur 7: Bildet er hentet fra VA/Miljø-blad nr. 104 (2012)</i></p>	<p>Figur 7 viser en prefabrikkert tank med integrert virvelkammer. Prefabrikerte tanker eller kummer brukes ved mindre magasinbehov, fortrinnsvis til eneboliger. Disse er relativt lette tanker som må sikres mot oppdrift og trafikkbelastning. Leveres normalt med volum opp til 100 m³ (VA/Miljø-blad104 2012).</p>
<p>Stein- og kassettmagasin</p>  <p><i>Figur 8: Bildet er hentet fra Norsk Wavin AS</i></p>	<p>Stein- og kassettmagasin benytter seg av samme prinsipp, fordryning i porevolumet til steinmasser eller kassetter under bakken. Magasinene dekkes av en fiberduk som stabiliserer konstruksjonen og skiller magasinet fra løsmassene rundt slik at de ikke trenger inn i konstruksjonen. Fiberduken kan være vanntett dersom det ikke er ønskelig at vannet infiltrerer til omkringliggende masser. Figur 8 viser Wavins Q-Bic overvannskasset.</p>



Figur 9: Bildet er hentet fra Norsk Wavin AS.

Figur 9 viser moduloppbyggede Q-Bic overvannskassetter. Norsk Wavin AS fremstiller plastkassetter av polypropylen som gir kassetene en levetid på minst 50 år (Wavin 2017). Porevolumet ligger normalt på rundt 95 % (VA/Miljø-blad104 2012) noe som gir en høy utnyttingsgrad av volumet i magasinet.

Porevolumet til steinmagasin ligger normalt på 30- 40 %. Steinmagasinets hovedfordel er den lave innkjøpsprisen sammenlignet med andre alternativer (VA/Miljø-blad104 2012).

Støpte løsninger: rektangulært basseng



Figur 10: Bildet er tilsendt fra samarbeidsbedrift.

Figur 10 viser støpte, rektangulære fordrøyningsbasseng. I henhold til VA/Miljøblad nr. 103 utføres oftest rektangulære basseng i plasstøpt armert betong. Dersom det forekommer høy grunnvannsstand må bassenget sikres mot oppdrift. Ved mindre volum kan bassengene utføres av prefabrikkerte betongelementer med plasstøpt bunnplate. De prefabrikkerte elementene har normalt en begrensning med hensyn til maksimalbelastning fra jord og trafikk. Rektangulære basseng deles ofte inn i flere seksjoner eller kamre.

Støpte løsninger: sirkulært basseng



Figur 11: Bildet er hentet fra VA/Miljø-blad nr. 103 (2012)

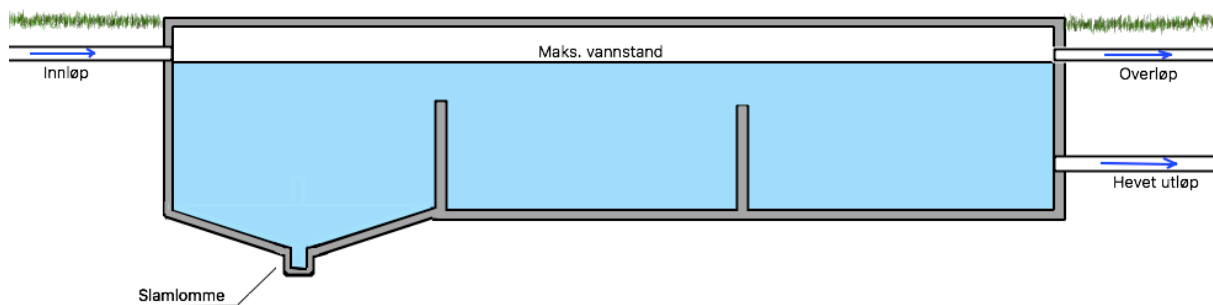
Figur 11 viser et sirkulært fordrøyningsbasseng under bygging. Sirkulære bassenger utføres normalt av prefabrikkerte elementer som monteres på en plasstøpt bunnplate. En ulempe med sirkulære basseng er at de ikke kan oppdeles i seksjoner eller kamre da det vil endre elementveggens geometri og virkemåte (VA/Miljø-blad103 2012).

2.7.2.1 Drift og vedlikehold av lukkede fordrøyningsmagasin

Kraftig nedbør i urbane områder fører med seg sand, småstein og en rekke ulike forurensninger som partikler, næringssalter, miljøgifter, olje og veisalt. Overvann fra veier, parkeringsarealer og næringsområder forurenses fra en rekke ulike kilder deriblant eksosutslipp fra trafikken, materialbruk i biler, overflatedekker, bygningsmasse (maling og materialer), atmosfærisk nedfall og drift av veinettet (Åstebøl et al. 2013). For å unngå forurenset vann, skader på anlegget, redusert levetid og uønsket driftsstans er det nødvendig å håndtere dette avfallet på en god måte.

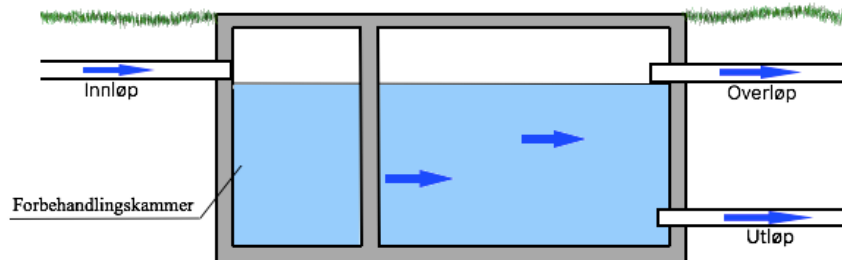
Under følger en oversikt over driftsmessige utfordringer ved bruk av lukkede fordrøyningsanlegg, samt tiltak for å løse disse.

- **Uønsket avfall og tilstopningsrisiko:** sandfang kan installeres for å redusere mengden av sand, stein, blader og liknende som overvannet fører med seg samt redusere tilstopningsrisiko installeres det sandfang. Det er viktig at sandfanget er dimensjonert for maksimal forventet regnintensitet og at det rengjøres ofte nok for å unngå tilstopping og driftsstans av anlegget. Sandfang installeres normalt i innløpskummen til magasinet, og kan suppleres ofte med gatesandfang. Sandfangene holder normalt tilbake de største partiklene, men kraftige regnskylt kan likevel virvle opp og tilføre sand, slam og forurensninger til magasinet. Økt regnintensitet de siste årene har gjort det mer vanlig å ha flere sandfang knyttet til et tilløp av vann fra veier og plasser. Regnvann fra tak kan inneholde blader og kvister, for å hindre tetting av takrenne kan en sil eller liknende settes inn (VA/Miljø-blad104 2012).
- **Bunnfelling og sedimentering:** det finnes flere ulike tiltak for å løse problemer med bunnfelling og sedimentasjon. Bassengene kan deles i flere kammer der det første utformes med en slamlomme slik at bunnfelling i hovedsak skjer der, noe som forenkler rengjøringsprosessen (figur 12). Flere adskilte kammer har også den fordelen at ved mindre nedbørmengder tas ikke hele bassenget i bruk. Det reduserer behovet for inspeksjon og rengjøring (VA/Miljø-blad103 2012). Et annet tiltak som gjøres for å stoppe videreføring av uønsket avfall og redusere tilstopningsrisikoen er å heve utløpet fra magasinet (figur 12). Ved å heve utløpet vil fordrøyningsmagasinet holde tilbake sand, slam og andre forurensninger (BASAL).



Figur 12: Skisse av lukket fordrøyningsmagasin inndelt i tre kammer. Innløpskammeret er utstyrt med en slamlomme (egen tilvirkning).

For å øke partikkeltilbakeholdelsen kan en vertikal skillevegg plasseres i begynnelsen av magasinet slik at man får et adskilt forbehandlingskammer (figur 13). Forbehandlingsdelen vil på samme måte som slamlommen forenkle rengjøring av magasinet da slam og andre store partikler holdes igjen i denne delen. Tilbakeholdelse av partikler vil være langt bedre med et forbehandlingskammer enn ved et tradisjonelt sandfang (BASAL).



Figur 13: Fordrøyningsmagasin utstyrt med forbehandlingskammer (egen tilvirkning).

- **Olje:** I magasin der overvannet kommer fra veier, parkeringsplasser og næringsområder foreligger det en risiko for at vannet inneholder olje. I tilfeller der denne risikoen foreligger skal en oljeutskiller installeres (VA/Miljø-blad104 2012).
- **Strømning:** Bassengets utforming har betydning for vannets strømning. Utformingen tilpasses magasinets ønskede funksjon. Av hensyn til bunnfelling er det i noen typer basseng ønskelig med stor sirkulasjon og omrøring av vannet, i andre tilfeller ønskes eller ingen omrøring (VA/Miljø-blad103 2012).
- **Forurenset overvann:** krav til rensing av overvann avhenger av hvor vannet skal videreføres, omfanget av utslippet og resipientens vannkvalitetsmål. Et tiltak som kan gjøres der det er behov for økt renhetsgrad er å skille regnvann som faller på taket fra regnvannet som faller på bakken. Overvann fra tak er normalt vesentlig renere enn bakkevann (Åstebøl et al. 2013).
- **Vedlikehold:** Det som krever størst vedlikehold i et fordrøyninganlegg er kontroll av inn- og utløpsarrangement og tømning av sandfang og eventuelle slamlommer eller forbehandlingskammer (Åstebøl et al. 2013). Magasinene må være utstyrt med inspeksjonskummer som sikrer tilgang for kontroll av magasinet.

2.7.3 Dimensjonering av nødvendig fordrøyningsvolum

Riktig dimensjonering av fordrøyningsmagasin er svært viktig. Skadeomfanget ved en underdimensjonering kan få alvorlige konsekvenser, samtidig som en overdimensjonering kan være av stor økonomisk betydning. Dersom det skal tas hensyn til prognosene for klimaendringer og magasinene skal dimensjoneres for alle verst tenkelige situasjoner vil det bli ekstremt kostbart. Det bør likevel alltid tas i betraktning at nedbøren kan bli større enn det overvannsanlegget er dimensjonert for, og det anbefales i henhold til VA/Miljø-blad nr. 69 å dimensjonere magasinets nødoverløp for en 100-årsflom. VA/Miljø-blad nr. 85 definerer den optimale dimensjoneringen til *”den som gir den laveste totale kostnad i løpet av anleggets levetid når alle kostnader og ulemper er medregnet”* (VA/Miljø-blad85 2008).

Lukkede fordrøyningsmagasin dimensjoneres i henhold til VA/Miljø-blad nr. 69 (2015), som angir følgende tre dimensjonerende faktorer:

1. Lokal nedbørsdata: retningslinjer for minimum dimensjonerende gjentakintervall oppgir en variasjon på 5 til 30 år, dette er i praksis sterkt avhengig av den lokale situasjonen og hvor stort skadepotensial området har. Med gjentakintervall menes her antall år det statistisk sett går mellom hver gang det inntreffer nedbør av en viss intensitet og varighet.
2. Videreført vannmengde: Den videreførte vannmengden styres i all hovedsak av kommunens tillatte påslippmengde til det offentlige ledningsnettet. Kommunens krav ligger normalt på mellom 5- 20 l/s, men dette er sterkt situasjonsavhengig og søknader for påslipp må godkjennes for hvert enkelt prosjekt.
3. Volumberegninger: i henhold til VA/Miljø-blad nr. 69 er det tre ulike metoder med ulik detaljgrad og kompleksitet som benyttes til denne dimensjoneringen. Regnvelopmetoden med konstant utløp er den mest brukte metoden. Ved bruk av denne metoden antar man et konstant utløp som er tilnærmet likt den ønskede videreførte vannmengden fra magasinet. Metoden baserer seg på beregning av differansen mellom tilført og videreført vannmengde (massebalansen) i magasinet. Metoden er beskrevet nedenfor.

➤ **Regnvelopmetoden med konstant utløp**

Metoden baserer seg på å finne massebalansen i magasinet. For å finne det nødvendige magasineringsvolumet beregnes tilført og videreført vannmengde for ulike regnvarigheter der det største volumet blir dimensjonerende. Nødvendig magasineringsvolum beregnes med bruk av formel 3:

$$V_m = V_{inn} - V_{ut} \quad (3)$$

Der V_m er nødvendig magasineringsvolum [l], V_{inn} er tilført volum til magasinet [l] og V_{ut} er videreført volum [l].

Tilført volum beregnes ved bruk av formel 4:

$$V_{\text{inn}} = t * k_f * A * i_{\text{dim}} \quad (4)$$

Der V_{inn} er tilført volum til magasinet [l], t er regnvarigheten [s], k_f er klimafaktor [ubenevnt], A er areal av regnutsatt flate [ha] og i_{dim} er dimensjonerende regnintensitet [l/s·ha].

Til beregning av nødvendig fordrøyningsvolum for tomten i casestudiet benyttes i denne oppgaven beregningsverktøy tilgjengelig fra nettsiden til Basal, leverandør av fordrøyningsmagasin (BASAL 2017). Beregningsprogrammet baserer seg på værdata for området der magasinet skal lokaliseres, data for det regnutsatte arealet og den tillatte videreført vannmengde. Værdata kan enten legges inn manuelt eller baseres på eksisterende værdata fra metrologisk institutt. I tillegg må gjentaksintervall og klimafaktor bestemmes. Gjentaksintervallet for denne typen beregninger settes normalt til mellom 20- 30 år. Klimafaktoren er en faktor som legges til for å ta hensyn til framtidige klimaendringer. Faktoren multipliseres med regnintensiteten for at det skal dimensjoneres for økt regnintensitet i framtiden. Klimafaktoren for denne typen beregninger settes normalt til 20 %. Ut ifra værdataene og de valgte parameterne beregner programmet dimensjonerende regnintensitet, i_{dim} .

I tillegg til værdata må data for det nedbørsutsatte arealet legges inn. Programmet beregner andelen av tette flater (A) ut fra størrelsen på ulike arealtyper og tilhørende avrenningskoeffisienter. Tabell 7 angir ulike arealtyper og hvilke tilhørende avrenningskoeffisienter Basal anbefaler (BASAL 2017).

Tabell 7: Angir arealtyper med tilhørende anbefalte avrenningskoeffisienter. Kilde: BASALs beregningsprogram for overvannshåndtering.

Arealtype	Avrenningskoeffisient (φ)
Tette flater (tak, asfalterte plasser/veger og lignende)	0,85 – 0,95
Bykjerne	0,70 – 0,90
Rekkehus-/leilighetsområder	0,60 – 0,80
Eneboligområder	0,50 – 0,70
Grusveier/-plasser	0,50 – 0,90
Industriområder	0,50 – 0,90
Plen, park, eng, skog, dyrket mark	0,30 – 0,50
Betong, asfalt, bart fjell og lignende	0,60 – 0,90

Til slutt må verdiene for maksimal videreført vannmengde og gjennomsnittlig videreført vannmengde legges inn. Maksimal videreført vannmengde er kommunens tillatte påslippsmengde til det offentlige ledningsnett. Verdien for gjennomsnittlig videreført vannmengde settes normalt til 70 % av maksimal videreført vannmengde. Videreført volum (V_{ut}) beregnes ved bruk av formel 5:

$$V_{ut} = t * Q_{mid} \quad (5)$$

Der V_{ut} er videreført volum fra magasinet [l], t er regnvarigheten [s] og Q_{mid} er midlere videreført vannmengde [l/s].

➤ Sikre flomveier

Regnenvelopmetoden tar mange faktorer i betraktning og inkluderer flere sikkerhetsmarginer. Til tross for dette må det tas høyde for at kapasiteten til anlegget vil kunne overstiges, det vil ikke være hverken økonomisk lønnsomt eller praktisk mulig å dimensjonere et fullstendig flomsikkert fordrøyningsanlegg for all fremtid. På bakgrunn av dette inkluderes det tredje leddet i strategien i NOUs rapport; sikre flomveier. Når den hydrauliske kapasiteten til både infiltrasjonsanlegget (første ledd) og fordrøyningsanlegget (andre ledd) overskrides må nedbøren avledes på en trygg måte til en egnet resipient. I følge rapporten kan egnede resipienter være: ubebygde traséer i terrenget, veigrøfter, parkeringsplasser eller gater der biler kjører sakte og vannhastigheten forblir lav (NOU 2015).

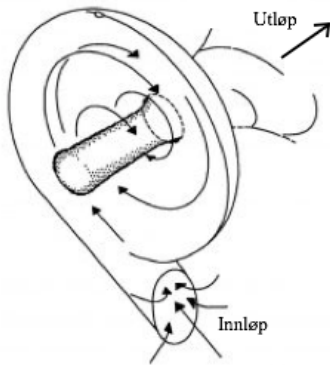
2.7.4 Regulering av videreført vannmengde

I tillegg til de tre overnevnte dimensjonerende faktorene er regulering av videreført vannmengde avgjørende for dimensjoneringen. Optimal regulering av utslippsmengden er viktig for driftssikkerheten og effektiv magasinutnyttelse. Mengderegulatoren utgjør normalt en liten del av investeringskostnaden til anlegget, men kan være helt avgjørende for anleggets drift, effektivitet og totaløkonomi (VA/Miljø-blad116 2015).

Egenskapene til en mengderegulator avhenger av type og modell. Forhold som spiller inn ved valg av type regulator er blant annet: maks/midlere vannføring, trykkehøyde, type avløpsvann (overvann/fellessystem), tilgjengelig plass og mulighet for å endre vannføring (MFT 2017). Mengderegulatoren må oppfylle funksjonskrav knyttet til driftssikkerhet, nøyaktighet og tilstoppingsrisiko. Det anbefales at regulatoren som installeres har en kapasitetsgaranti på +/- 10 % av dimensjonerende videreført vannmengde og at nøyaktigheten kan dokumenteres. Det stilles også krav til minimum strømningsstverrsnitt for å redusere risiko for tilstopping, løsning for by-pas samt krav til plassering av regulatoren slik at den på en enkel måte kan inspiseres og vedlikeholdes (VA/Miljø-blad116 2015).

Nedenfor beskrives de to mest brukte vannføringsregulatorene, virvelkammer og strupet utløp:

- **Virvelkammer:** figur 14 viser et horisontalt virvelkammer. Virvelkammeret er sirkulært med tangentielt innløp og utløp i senter. Prinsippet er å øke vannhastigheten fra innløp til utløp og la det innkommende vannet treffe vannmengdene i kammeret når trykket er høyest slik at det bremses kraftig opp. Strømningsmotstanden som etableres av vannet i kammeret avhenger av trykkhøyden. Sammenhengen mellom videreført vannmengde og trykkhøyde (regulatorens hydrauliske karakteristikk) er avhengig av kammerets utforming og er viktig å ta hensyn til når fordrøyningsanlegget skal dimensjoneres.



Figur 14: Viser et horisontalt virvelkammer med sirkulær utforming og tangentielt innløp. Hentet fra VA/Miljø-blad nr. 116, tilpasset av Rikke Bjørnland.

- **Strupet utløp:** vannføring gjennom en åpning avhenger av vanntrykk og åpningens dimensjon og utforming. Et strupet utløp vil kunne ha tilstrekkelig nøyaktighet så lenge den er kalibrert, men nøyaktigheten er normalt lavere sammenlignet med et virvelkammer. Ved små vannføringer og/eller relativt store trykkhøyder vil en tradisjonell strupeluke ha en liten åpning, noe som innebærer økt tilstopningsrisiko (MFT 2017).

I Norge er det mest vanlig med våtoppstilte virvelkammer som mengderegulator. Fordelene med virvelkammer er flere. De har høy driftssikkerhet, er svært nøyaktige (+/- 10 %), ferdig kalibrerte og har høy midlere avrenning noe som reduserer magasinvolument (BASAL). Det vil alltid foreligge en risiko for tilstopping av blader, småstein og liknende i utløpet, det er derfor fordelaktig å velge en regulator med et stort strømningsverrsnitt. De mest effektive virvelkamrene kan ha utløp med strømningsverrsnitt opp mot fem ganger så stort som et strupet utløp (VA/Miljø-blad116 2015).

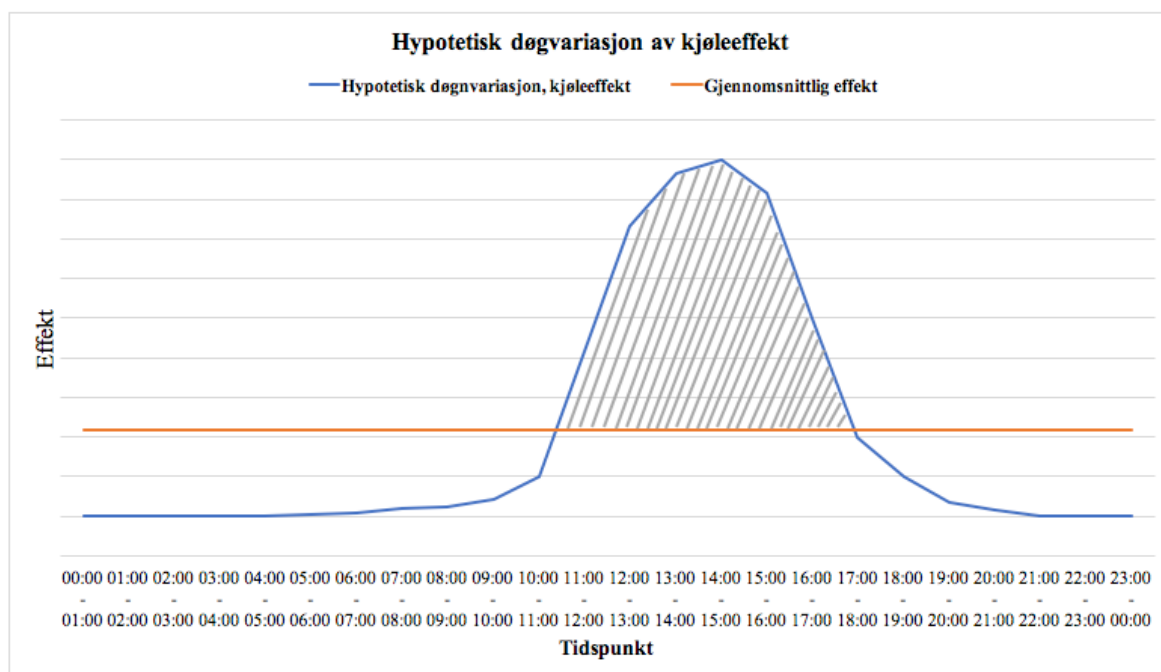
3 Konseptbeskrivelse

Som nevnt innledningsvis har både regnintensitet og hyppighet av ekstremvær økt de siste årene. Det har ført til strengere krav knyttet til overvannshåndtering på egen tomt og til vannmengden som tillates for påslipp til det underdimensjonerte offentlig ledningsnett. Magasinene dimensjoneres med store sikkerhetsmarginer noe som medfører at det installeres store fordrøyningsmagasin for håndtering av få dager med styrtregn i året. I denne oppgaven vurderes muligheten for å utnytte disse store vannmagasinene til termisk akkumulering av kjøleenergi.

Istedenfor å la fordrøyningsmagasinet renne naturlig tomt baserer konseptet seg på å holde igjen en bestemt mengde av overvannet i magasinet, eller i en del av magasinet, og utnytte dette til termisk lagring. Til dette formålet er det av flere årsaker vurdert som mest hensiktsmessig at vannmengden som skal benyttes til akkumulering skilles fra det resterende fordrøyningsmagasinet og ledes til en eller flere separate tanker. Dette tiltaket gjøres for å løse noen av de utfordringene konseptet står ovenfor.

Vannet i akkumuleringstanken(e) kjøles ned om natten, utenfor byggets driftstid når kjølebehovet i bygget er på et minimum. Den lagrede kjøleenergien kan da utnyttes på dagtid, noe som vil føre til en utjevning av døgnets effektuttak. Akkumuleringstanken(e) skal kjøles ned med størst mulig grad av frikjøling mot energibrønner, det resterende kjølebehovet må dekkes med bruk av kjølemaskiner. Et utkast med forslag til mulig systemløsning for dette konseptet er utarbeidet og ligger vedlagt (vedlegg 1). Den økte bruken av kjølemaskiner grunnet nattkjøling av tanken(e) antas ikke å medføre økt energiforbruk for bygget totalt sett. Energiforbruket øker om natten og reduseres på dagtid slik at totalen antas å være den samme.

Konseptet baserer seg på en hypotese om at døgnvariasjonen av kjøleeffekt har få, korte og høye effekttopper i sommermånedene. Døgnvariasjon av kjøleeffekt for et typisk kontorbygg antas å være formet som vist ved den blå kurven i figur 15. Den oransje linjen viser gjennomsnittseffekten over døgnet. Ved hjelp av termisk akkumulering er målet å redusere effekttoppene og minimere døgnvariasjonen av kjøleeffekt for bygget. Optimalt er det ønskelig å akkumulere så mye energi at effekttoppen kan reduseres så nær døgnets gjennomsnittseffekt som mulig, illustrert ved grått skravert område i figur 15. For å beregne mengden termisk energi (Q) i kWh som må akkumuleres for å redusere effekttoppen (grått område) summeres differansen mellom døgnvariasjonskurven (blå) og gjennomsnittslinjen (oransje) for hver time der effektforbruket ligger over gjennomsnittet. I figuren fra ca. klokken 10:00 til klokken 17:00.



Figur 15: Blå kurve viser antatt døgnavariasjon av kjøleeffekt for et typisk kontorbygg. Oransje linje viser gjennomsnittseffekten for døgnet.

Kjøleanlegg dimensjoneres for å dekke det største forventede kjølebehovet til bygget. Det investeres store summer i kjøleanlegg som kun kjøres på full kapasitet noen få dager i året. Med dette konseptet er målet at den økte graden av akkumulering muliggjør en neddimensjonering av kjøleanlegget i bygget. Effekttutjevning vil være kostnadsbesparende både med tanke på investeringskostnader av et mindre kjøleanlegg og med tanke på den direkte betalingen for effekt.

Vannet i akkumuleringstanken(e) skal kjøles ned om natten og utnyttes til kjøling av bygget på dagtid. Som sammenhengen fra formel 2 viser er beregningene av nødvendig akkumuleringsvolum avhengig av temperaturen på vannet i tanken. For en optimal bruk av konseptet må temperaturen på vannet i tanken være så lavt som mulig. Hvor stor nedkjøling som oppnås på vannet i tanken vil for dette konseptet hovedsakelig være avhengig av to faktorer: tilførsel av regnvann og bruk av kjølemaskiner.

For et døgn uten tilførsel av regnvann til akkumuleringstanken(e) vil den aktuelle temperaturdifferansen (ΔT) være differansen mellom den laveste og den høyeste temperaturen på vannet i tanken. Den laveste temperaturen vil forekomme om morgenen etter en natt med nedkjøling, og den høyeste temperaturen vil inntreffe mot slutten av byggets driftstid etter en dags utnyttelse av kjøleenergien fra lageret. Under et slikt normaldøgn vil den høyeste temperaturen på vannet i tanken være avhengig av temperaturen på vannet som tilføres tanken fra isvannsnett i bygget. Denne ligger normalt på mellom 13- 15 °C. For et døgn med ekstremnedbør, der regnvann med en høyere temperatur må tilføres tanken, vil mengde og temperatur på regnvannet samt tidspunkt på døgnet regnvannet tilføres akkumuleringstanken vil være avgjørende for temperaturdifferansen som oppnås.

For et normaldøgn uten tilførsel av regnvann vil temperaturen på vannet i tanken etter en natt med nedkjøling være avhengig av hvor mye som kan frikjøles mot brønnparken samt hvor mye kjølemaskinene benyttes. Dersom det tilføres nedbør i løpet av natten vil den laveste temperaturen som kan oppnås i tanken også her være avhengig av temperatur og mengde av regnvann samt tidspunktet det tilføres på. For å maksimere temperaturredifferansen må vannet i tanken kjøles ned til så lav temperatur som mulig. Det må gjøres en vurdering av hvor mye det er hensiktsmessig og nødvendig å kjøle ned vannet. For å unngå faseforandring bør ikke vannet kjøles ned til en temperatur lavere enn 2 °C.

3.1 utfordringer

3.1.1 Plassbegrensning

For å tilfredsstille kravene til overvannshåndteringen på tomten samt unngå å overstige den maksimale tillatte påslippsmengden til ledningsnettet må tilgjengelig kapasitet i fordrøyningsmagasinet til enhver tid være i henhold til det dimensjonerte nødvendige fordrøyningsvolumet. Dersom en bestemt vannmengde skal holdes igjen i magasinet må dette volumet komme i tillegg til det beregnet nødvendig fordrøyningsvolumet. Denne oppdimensjoneringen av magasinet vil medføre økte investeringskostnader samt være plasskrevende.

En avgjørelse det må tas stilling til er om akkumuleringstanken skal graves ned og legges under bakken eller plasseres inne i bygget. Faktorer som påvirker den avgjørelsen vil være tilgjengelig plass i bygget eller plass under bakken, samt om det er mulighet for graving og i mange tilfeller sprengning i berggrunnen. Terrengforhold og høydeforskjeller må også vurderes med tanke på videreført vannmengde og påkoblingspunkt til offentlig nett. Dersom magasinet graves ned og legges under berggrunnen vil temperaturen omkring tanken ligge stabilt på 6- 8°C gjennom året og akkumuleringstanken vil ikke ha behov for isolasjon. Dersom magasinet skal plasseres inne i bygget må akkumuleringstanken isoleres for å begrense varmetveksling med omgivelsene og holde temperaturen på vannet i tanken så lav som mulig. Isolasjon av tanken vil medføre ekstrakostnader som må inkluderes i lønnsomhetsberegningene.

3.1.2 Drift og vedlikehold

Konseptet baseres på at regnvann som normalt forsinkes og renner naturlig ut til omkringliggende masser eller til avløpsnettet skal samles, holdes igjen i en tank og sirkulere i et rørsystem før det veksles i en varmeveksler. Denne bruken av regnvannet vil kreve økt renhetsgrad, noe som kan medføre ekstra utfordringer knyttet til drift og vedlikehold. Overvann kan som nevnt inneholde uønsket avfall, partikler og miljøgifter, noe som kan skape problemer for systemet. Foruten disse ekstra utfordringene antas det at akkumuleringstanken(e) vil ha det samme drifts- og vedlikeholdsbehovet som resten av fordrøyningsanlegget. Et tiltak som kan gjøres for å bedre vannets renhetsgrad vil være å skille overvannet som faller på taket fra overvannet som faller på bakken for så lede takvannet til akkumuleringstanken(e). Dersom konseptet kan fungere tilfredsstillende ved kun å benytte

overvann fra tak i akkumuleringstanken(e) vil det kunne redusere behov og kostnader knyttet til drift og vedlikehold.

3.1.3 Styring og regulering

En utfordring konseptet står ovenfor er hvordan styring og regulering av vannmengden i akkumulatortanken(e) skal løses. Selv om systemet kun benytter seg av takvann vil regnvannet føre med seg uønskede partikler og annet avfall som medfører et vedlikeholdsbehov. For å minimere vedlikeholdsbehovet til systemet er det ønskelig med en så lav utskiftningsgrad av vannet som mulig. Et annet argument for ønsket om minimal tilførsel av nytt regnvann til tanken er optimalisering av temperaturdifferansen. Regnvann som faller på taket i sommermånedene da kjølebehovet i bygget er størst vil naturligvis ha en høy temperatur. For å holde en så lav temperatur som mulig på vannet i akkumuleringstanken er det ønskelig at minst mulig av dette varme regnvannet ledes ned i tanken.

Utfordringen ligger i å finne en løsning som optimaliserer styring og regulering slik at utskiftningsgraden av vannet i akkumuleringstanken blir lavest mulig samtidig som takvann må kunne ledes til tanken når ekstremvær inntreffer og det resterende fordrøyningsmagasinet er fylt opp. For å vurdere hvor stor denne utfordringen er i praksis og hvilke konsekvenser det vil kunne få dersom styringen ikke løses på en tilfredsstillende måte, er det blant annet interessant å se på sammenhengen mellom tidspunkt for ekstremvær og høyt kjølebehov.

3.2 Økonomiske betraktninger

For å analysere lønnsomheten av konseptet er tre ulike økonomiske betraktninger vurdert:

- Merkostnader ved omlegging til akkumuleringssystem
- Besparelser som følge av effektutjevning:
 - Besparelser knyttet til neddimensjonering av kjøleanlegg.
 - Besparelser knyttet til redusert betaling for effekt.

3.2.1 Merkostnader ved innføring av konseptet

Konseptet er basert på at et fordrøyningsmagasin uansett skal bygges og investeringskostnadene tilknyttet dette er irrelevant i lønnsomhetsvurderingen av konseptet. Kostnadene som er relevante for konseptvurderingen av konseptet vil være merkostnadene som påløper som følge av en endring fra et tradisjonelt fordrøyningsanlegg til et anlegg som inkluderer akkumulering. Denne systemendringen krever ekstra komponenter som motorventiler ved inn- og utløp fra tanken(e), isolasjon (dersom akkumuleringstanken(e) skal plasseres over bakkenivå), økt rørnett og et styringssystem. Disse komponentene sammen med kostnader for prosjektering, montering, byggeledelse og testkjøring vil utgjøre merkostnadene ved systemendringen.

Tabell 8 viser en oversikt over de nevnte forventede kostnadspostene samt et anslag over tilhørende kostnader. Kostnadsestimaterne presentert i tabellen er gjort med utgangspunkt i innføring av konseptet for caseprosjektet. Kostnader tilknyttet isolasjon, motorventiler og økning av rørnett antas å være variable og må vurderes spesifikt for hvert enkelt prosjekt.

Totalt antall tanker og antallet tanker som skal benyttes til akkumulering er under arbeidet med denne oppgaven ikke avgjort for caseprosjektet. For kostnadsestimatet presentert i tabellen legges det til grunn et totalt antall på fem tanker. Videre er det antatt at styringssystemet vil kreve motorventiler for inn- og utløp for alle tankene. I tillegg er det forutsatt at akkumuleringstanken(e) skal plasseres over bakkenivå og vil ha behov for isolasjon. Det legges også inn et påslag på 15 % for å ta høyde for uforutsette kostnader.

Tabell 8: Viser antatte merkostnadene for omgjøring av et fordrøyningsanlegg til et lagringsystem, med utgangspunkt i caseprosjektet. Kostnadene er oppgitt av samarbeidsbedrift.

Kostnadspost	kr
Prosjektering 10 % av byggekostnad	36 000
Isolasjon av tank(er)	120 000
Motorventiler innløp og utløp av tank(er)	50 000
Rørmontasje ventiler	40 000
Økning av rørnett, skille takvann og overflatevann	50 000
Styringssystem, nivåkontroll i tanker mot sentral driftskontroll med prognosestyring	100 000
Byggeledelse og testkjøring	86 000
Uforutsett 15%	72 300
SUM	554 300

I tillegg til systemendringen vil innføring av konseptet kreve at fordrøyningsmagasinet må oppdimensjoneres, noe som vil medføre ekstra kostnader. Leverandør av fordrøyningsmagasin i betong oppgir kostnaden for fordrøyningsmagasin inkludert nødvendig gravearbeid og montering til ca. 3 000 kr/m³ (Johnsen 2017).

3.2.2 Neddimensjonering av kjøleanlegg

Erfaringskostnader for kjøleanlegg er oppgitt av samarbeidsbedriftens rådgivere. Rådgiverne oppgir et anslag for investeringskostnad for et kjøleanlegg, inkludert alle relevante komponenter, til å være om lag 4 000 kr/kW (Olsen 2017). Drifts- og vedlikeholdskostnader for kjøleanlegget oppgis til ca. 3- 5 % av investeringskostnaden.

3.2.3 Effektbetaling

Total el-kostnad for en bedrift i Norge består av tre ledd og kan beregnes på følgende måte:

$$\text{➤ Total el-kostnad} = \text{Nettleie} + \text{Strømpris} + \text{Avgifter}$$

En innføring av dette konseptet innebærer etablering av et energilager, den lagrede energien skal benyttes til å jevne ut effektuttaket over døgnet. For betaling av el-kostnaden vil effektutjevning kun ha påvirkning på det variable effektleddet som er en del av nettleien. Nettleien skal dekke kostnadene ved å transportere strømmen til bygget og er en del av den totale utgiften som betales til nettselskapene (Hafslund 2017). I denne oppgaven sees det derfor bort fra de faste kostnadene som inngår i nettleien, strømprisen og avgifter. Disse kostnadene er irrelevante for vurderingen av dette konseptets lønnsomhet.

Anlegg som tilfredsstillter kravene til effektregning har i tillegg til et årlig fastbeløp og forbruksavhengig ledd basert på energiforbruk (kWh), et forbruksavhengig ledd basert på effektforbruk (kW). Effekttforbruket avregnes etter det høyeste registrerte effektuttaket hver måned (BKK 2017). Det vil si at den enkelte kunde kan redusere sin utgift ved å fordele forbruket så jevnt som mulig over døgnet de dagene man har høyest forbruk. Effekttariffen har ulik prising i ulike perioder av året, som vist i tabell 9. Størrelsen på neddimensjoneringen av kjøleanlegget vil være avgjørende for antall måneder det blir besparelser grunnet reduserte effekttopper.

Tabell 9: Oversikt over månedsbasert effekttariff for bedrifter med timemålte anlegg per 1. Januar 2017, Hafslund nett (Hafslund 2017).

Tariff per 1. Januar 2017	Pris
Fastledd	340 kr/mnd
Effektledd – vinter 1 (jan, feb og des)	150 kr/kW/mnd
Effektledd – vinter 2 (mar og nov)	76 kr/kW/mnd
Effektledd – sommer (apr – okt)	11 kr/kW/mnd
Energiledd – vinter (jan – mar og nov – des)	5,20 øre/kWh
Energiledd – sommer (apr – okt)	3,00 øre/kWh

I følge Norges vassdrag- og energidirektorat skal alle strømkunder i Norge innen 1. Januar 2019 ha startet å ta i bruk smarte strømmålere (NVE 2015). Disse nye målerne inngår i såkalte ”avanserte måle- og styringssystemer” (AMS). Målerne registrerer strømforbruket på timebasis og sender automatisk informasjon om forbruket til nettselskapet. Denne toveis-kommunikasjonen vil gi strømkundene mer nøyaktig informasjon om eget forbruk, øyeblikkspriser for kraft og nettleie samt mulighet for automatisk styring av forbruket. Nettselskapene mottar raskere og mer korrekte målerverdier noe som gir et bedre grunnlag for beløpet som skal belastes kunden (NVE 2015). Som konsekvens av denne implementeringen vil i følge seniorrådgiver i Enova, Monica Berner, nye avregningsmetoder for elektrisk energi iverksettes der fokuset på betaling for effekt blir større (Berner 2017).

4 Presentasjon av casestudiet

Arkitekttegning av det planlagte casebygget samt skjermbilder av ferdig oppført bygg fra simuleringsprogrammet IDA ICE er vedlagt i vedlegg 2.

4.1 Prosjektbeskrivelse

I tillegg til at minimumskravene i TEK10 skal oppfylles skal bygget oppføres etter passivhusstandard samt oppnå en BREEAM-NOR sertifisering ”Excellent” eller bedre. Målet for bygget er med andre ord et svært lavt energiforbruk og en miljøprofil bedre enn alle krav og forskrifter. For å oppnå dette har prosjektet stort fokus på innovasjon og ny teknologi. Tabell 10 viser et sammendrag av essensielle data og informasjon for caseprosjektet.

Tabell 10: Sammendrag av hoveddata for caseprosjektet Hasle Linje. Kilde: samarbeidsbedrift.

Hoveddata	
Beliggenhet	Hasle, Oslo
Bygningskategori	Kontorbygg
Oppvarmet BRA	Ca. 27 600 m ²
Beregnet nødvendig fordrøyningsvolum	Ca. 347,5 m ³
Maksimalt påslipp av overvann til offentlig ledningsnett	3 l/s
Planlagt oppført	2017-2019
Energimål	Passivhus standard (NS 3701)
Miljøsertifiseringsmål, BREEAM-NOR	Excellent eller Outstanding

Konkrete mål for prosjektet

- I henhold til TEK10 er krav om totalt netto energibehov for kontorbygninger 115 kWh/m² oppvarmet BRA pr. år. Simuleringer gjort i SIMIEN viser at bygget potensielt kan oppnå et årlig energibehov på 62,8 kWh/m². Med energiproduksjon fra varmepumper og solenergi, samt tekniske og bygningsmessige forbedringer har prosjektet mål om å havne under 40 kWh/m² levert energi per år. Dette skal oppnås uten at byggekostnaden øker med mer enn 3 %.
- 100 % av kjølingen skal dekkes av frikjøling og varmepumpe, med størst mulig grad av frikjøling.
- Med termisk lagring er det et mål å neddimensjonere varmepumper med 30 %.

4.2 Kjøling av casebygg

Prosjektet har mål om minimal eller ingen bruk av lokal kjøling. Komfortkjølingen i bygget skal dekkes fullstendig av frikjøling og varmepumper gjennom ventilasjon.

Ventilasjonsystemet i bygget vil være en fullverdig VAV-løsning med styring av luftmengder etter behov. Det er ønskelig med størst mulig grad av frikjøling mot energibrønnparken, og det er satt et mål om å dekke 50 % av kjølebehovet med frikjøling. Brønnparken er dimensjonert til ca. 30 brønner med en målsetting om 300 m dybde. Det vil si at det opereres med totalt 9 000 brønnmeter. Med normal energistrøm antas det et effektopptak på 2,8 W/mK.

4.3 Overvannshåndtering for casetomt

For tomten studert i casestudiet er det totale regnutsatte arealet 9 145 m², og fordelingen av ulike arealtyper er som vist i tabell 11.

Tabell 11: Angir totalt regnutsatt areal for tomten til casebygget, samt fordelingen av areal på ulike arealtyper.

Arealtype	Areal [m ²]
Asfalt	2 758
Grønt	1 964
Totalt takareal	4 423
Areal sedumtak	865
Areal tett tak	3 558
Totalt regnutsatt areal	9 145

Overvann kan håndteres med infiltrasjon, fordrøyning eller ved en kombinasjon av disse. Tomten til caseprosjektet gir ingen mulighet for infiltrasjon, noe som øker behovet for oppsamling og forsinkelse av overvannet. Overvannet på tomten skal håndteres med en kombinasjon av fire ulike metoder: regnbed, sedumtak, utvendige renner og lukkede fordrøyningsmagasin.

- Fordrøyningsanlegget knyttet til casebygget vil bestå av:
 - Fem regnbed på totalt 385 m², med en vanddybde på 0,2 m
 - Sedumtak på 865 m²
 - Utvendige renner
 - To lukkede fordrøyningsmagasin

Den fraværende muligheten for infiltrasjon på tomten gjør at alt regnvannet etter oppsamling og forsinkelse til slutt må slippes ut på det offentlige ledningsnett. Oslo kommune har for dette prosjektet godkjent et påslipp på 3 l/s fra tomten. Sedumtaket, regnbeddene og utvendige renner forsinker regnvannet og bidrar til en reduksjon av nødvendig fordrøyningsvolum. Terrengforholdene på tomten tatt i betraktning er det funnet mest hensiktsmessig at overvann fra totalt 6 485 m² av tomten ledes til et stort lukket fordrøyningsmagasin (magasin 1), og vann fra de resterende 2 667 m² ledes til et mindre lukket magasin (magasin 2). Tabell 12 viser oversikt over areal og arealtype med avrenning til magasin 1 og 2.

Tabell 12: Angir fordelingen av areal og arealtype med avrenning til fordrøyningsmagasin 1 og 2.

Magasin 1		Magasin 2	
Arealtype	Areal	Arealtype	Areal
Asfalt	1 432 m ²	Asfalt	1 326 m ²
Grønt	630 m ²	Grønt	1 343 m ²
Tette tak	3 558 m ²	Tette tak	-
Sedum tak	865 m ²	Sedum tak	-
Totalt areal	6 485 m²	Totalt areal	2 667 m²

5 Metodisk tilnærming

Dette kapitlet gjennomgår og begrunner hvilke metoder som er brukt for å fremskaffe dataene og informasjonen som ligger til grunn for å besvare oppgavens problemstilling. I kapitlet legges det også fram hvilke valg som er tatt og antakelser som er gjort for systemet. Som tidligere presentert har denne oppgaven to definerte kvantitative mål. 1. Finne ut *hvor mye* kjøleanlegg kan neddimensjoneres ved en innføring av dette konseptet. 2. Finne ut *hvor store* de økonomiske besparelsene kan bli som følge av effektutjevningen innføringen av konseptet muliggjør.

Grunnet tidsbegrensningen satt for arbeidet med oppgaven avgrenses studiet til å se på muligheten for lagring av kjøleenergi ved bruk av fordrøyningsmagasinet. Dette valget ble tatt på bakgrunn av en antakelse om at kjøleanlegg som installeres i kontorbygg i Norge er kraftig overdimensjonerte, og en antakelse om hvordan effektbehovet ved kjøling varierer over døgnet slik at effektutjevning potensielt kan gi store besparelser. Oppgavens problemstilling ble utarbeidet etter innspill fra samarbeidsbedriften og etter deres ønske om utførelse av en mulighetsstudie knyttet til denne konseptidéen.

Oppgaven omhandler generelle betraktninger rundt konseptet samt en vurdering av konseptet knyttet opp mot et konkret caseprosjekt. For å knytte problemstillingen og målene til caseprosjektet har det blitt utført energisimuleringer av bygget med simuleringstøytøyet IDA ICE. Resultatene fra simuleringene brukes som beregningsgrunnlag for å besvare hovedproblemstillingen og de kvantitative målene for oppgaven.

5.1 Metode for innsamling av kvantitative data

Konseptidéen er basert på en hypotese om kraftig overdimensjonerte kjøleanlegg i kontorbygg. For å underbygge den hypotesen samt vurdere potensialet for neddimensjonering av kjøleanlegg har det blitt gjort analyser av historiske data for faktisk effektforbruk for to kontorbygg lokalisert i Nydalen i Oslo. Data er hentet fra energioppfølgningsystemet (EOS) til disse to eksempelbyggene. De to eksempelbyggene er kontorbyggene i Nydalsveien 12 og Gjerdrumsvei 4, med oppvarmet areal på henholdsvis 12 912 m² og 8 800 m². Disse konkrete byggene ble valgt på bakgrunn av at de begge er i samme bygningskategori som casebygget. De er moderne bygg som er bygget etter dagens standarder og krav. Data fra energioppfølgningsystemet som brukes i analysene er hentet fra år 2016, da byggene var fullt utleid og i normal drift hele året (Nygård 2017). På samme måte som for det planlagte casebygget er eksempelbyggene utstyrt med et minimum av lokale kjøleenheter, og er i all hovedsak ventilasjonskjølt. Ventilasjonskjølingen er behovsstyrt og styres etter romtemperatur og CO₂-mengde. Tatt i betraktning at eksempelbyggene er i samme bygningskategori, er bygget etter de samme standardene, benytter tilsvarende kjølesystem og er lokalisert i samme klimasone som det planlagte casebygget ansees de som sammenlignbare når det kommer til spesifikt kjølebehov (effektbehov per m²).

En faktor som vil være avgjørende for hvor mye det er hensiktsmessig å neddimensjonere kjøleanlegget vil være i hvilken grad kjølebehovet kan dekkes av frikjøling mot brønnene. For å estimere frikjølingspotensialet mot brønnparken tilknyttet casebygget ble data fra EOS-loggen til energibrønnparken i Nydalen analysert. Tallene brukt i analysen er fra år 2013 da dette er det foreløpig siste året med full drift mot brønnparken, og med alle temperaturmålere intakt (Nygård 2017).

5.2 Metode for innsamling av kvalitative data

I dette mulighetsstudie skal et nytt og innovativt konsept vurderes, noe som betyr at det finnes lite kunnskap og erfaringsdata direkte relatert til problemstillingen. Innovasjon betyr at det skapes noe kvalitativt nytt, noe som innebærer at innovasjon ofte er forbundet med uforutsigbarhet og risiko (Ørstavik 2015). For å redusere uforutsigbarhet og risiko ved innføring av uprøvde konsepter bør potensielle utfordringer og svakheter kartlegges så godt som mulig på forhånd. På bakgrunn av det er det med denne oppgaven, i tillegg til de kvantitative målene, ønskelig å belyse hvilke praktiske utfordringer konseptet står ovenfor. For å vurdere om dette konseptet er praktisk mulig samt kartlegge potensielle utfordringer har informasjon blitt innhentet fra samarbeidsbedriften, rådgivende ingeniører som dimensjonerer fordrøyningsmagasin, rådgivende ingeniører som dimensjonerer kjøleanlegg og leverandører av fordrøyningsmagasin.

6 Simuleringer i IDA ICE

For å vurdere hvor mye kjøleanlegget i casebygget potensielt kan neddimensjoneres ved bruk av termisk lagring er det blitt gjort energisimuleringer av bygget. Formålet med simuleringene var å framskaffe mest mulig realistiske data for kjølebehovet til bygget, samt analysere hvordan kjølebehovet varierer på døgn- og årsbasis. Det simulerte maksimalbehovet og døgnvariasjonen til effektuttaket brukes som grunnlag for å vurdere i hvilken grad kjøleanlegget kan neddimensjoneres ved bruk av termisk lagring. Simuleringene er utført med simuleringstøytet IDA Indoor Climate Energy (ICE), versjon 4.7.1. IDA ICE ble valgt av flere årsaker, hovedsakelig grunnet at verktøyet inneholder de ønskede funksjonene for å tilfredsstille formålet med simuleringene. IDA ICE tilbyr også stor brukervennlighet og valgfrihet når det kommer til hvilket detaljnivå man ønsker å utføre simuleringene på. Casebygget som simuleres skal kjøles med behovsstyrt ventilasjon etter både CO₂-mengde og temperatur samtidig, noe som er mulig i IDA ICE versjon 4.7.1 og dermed gjør simuleringene mest mulig reelle.

6.1 Forutsetninger for simuleringer

I arbeidsperioden for denne masteroppgaven var planleggingen av casebygget i en tidlig fase. Avgjørelser knyttet til flere av faktorene som inkluderes i simuleringene var ikke tatt for dette bygget. Informasjonen det har vært mulig å framskaffe er hentet fra byggets arkitekt og fra samarbeidsbedriften. Antakelser har blitt gjort når det kommer til materialvalg i bygningskonstruksjonen, rominndeling, størrelse på serverrom og størrelse på interne laster. Antakelsene har i størst mulig grad blitt gjort i henhold til standarder og til energikravene presentert tidligere i oppgaven. Andre nødvendige forutsetninger har blitt gjort i samråd med samarbeidsbedriften.

Grunnet tidsbegrensning, ingen tidligere erfaring med bruk av dette eller andre simuleringstøytet og mangel på detaljinformasjon om bygget har det blitt gjort noen forenklinger for byggets to nederste plan og for byggets tak. I simuleringene sees det bort fra et parkeringsplan som skal ligge fullstendig under bakkenivå. Det er også gjort forenklinger knyttet til et plan som skal ligge delvis under bakkenivå. Dette planet skal trolig inneholde parkeringsplasser, lager, tekniske rom og garderober. Forenklinger har også blitt gjort når det kommer til byggets tak. For bygget er det planlagt ca. 865 m² med sedumtak og det resterende takarealet skal dekkes med solcellepaneler. Sedumtaket vil kunne bidra til økt isolasjon og dermed redusere varmetapet fra taket, denne faktoren tas det ikke hensyn til i simuleringene.

6.2 Verdier benyttet i simuleringene

6.2.1 Bygningskropp

Caseprosjektet har mål om at bygningskroppen skal tilfredsstille kravene for passivhusstandard. Tabell 13 viser oversikt over hvilke U-verdier som kreves for å oppnå passivhusstandard, samt hvilke materialvalg og tilhørende U-verdier som er benyttet i simuleringene.

Tabell 13: Oversikt over material og tilhørende U-verdier benyttet i simuleringene, samt krav til U-verdier for å oppnå passivhus standard.

Konstruksjon	Material	Krav til passivhus [W/m ² K]	Verdi i simulering [W/m ² K]
Yttervegg	Betong, steinbekledning	0,22	0,14
Innervegg	Betong kledd med gipsplater	-	2,8
Tak	Betong	0,18	0,09
Vinduer	Trelagsisolert glass	0,8	0,8

Kuldebroene i bygget skal reduseres til et minimum ved å isolere tilslutninger og gjennomføringer mellom bygningsdeler til et minimum. Målsatt normalisert kuldebroverdi for casebygget, og verdi benyttet i simuleringene, er 0,03 W/m²K.

➤ Følgende verdier er benyttet for vinduene i simuleringene:

- Solfaktor (g-verdi) = 0,4
- Intern emissivitet = 0,837
- Ekstern emissivitet = 0,837

Vindusareal brukt i simuleringene er i henhold til byggets arbeidstegninger og overskrider ikke TEK-kravet på maksimalt 20 % av byggets oppvarmede areal. Det antas ingen utvendig solavskjerming.

6.2.2 Interne varmetilskudd

➤ Personbelastning

Tabell 14 viser den prosentvise tilstedeværelsen som ligger til grunn for personbelastningen i casebygget benyttet i simuleringene. To ulike tidsplaner legges til grunn, tilstedeværelse i kantineområdet og tilstedeværelse i kontorområder. I simuleringen er det antatt at sonene resepsjon- og møtesenter, trappeoppganger, toaletter, garderober, lager og serverrom følger den samme tidsplanen for tilstedeværelse som kontorområdene.

Tabell 14: Oversikt over antatt tilstedeværelse for hhv. kontor- og kantineområder i casebygget.

Tidspunkt kontor	Tilstedeværelse kontor [%]	Tidspunkt kantineområde	Tilstedeværelse kantineområdet [%]
07.00-08.00	20	07.00- 09.00 (frokost)	10
08.00-11.00	100	09.00- 11.00	0
11.00-12.30 (lunsj)	20	11.00-12.30 (lunsj)	70
12.30-15.00	80	12.30- 07.00	0
16.00-17.00	50		
19.00-07.00	0		

For casebygget er det planlagt ca. 1550 arbeidsplasser. Det er ikke avgjort om bygget skal ha cellekontorer, åpent landskap eller en kombinasjon av disse. På bakgrunn av dette brukes standardverdier for brukertettheten i bygget. Verdiene benyttet i simuleringen er hentet fra NS3031:2014 (tabell 5).

➤ Utstyr

Tabell 15 viser oversikt over antatt bruk av utstyr for de ulike sonene i bygget og tilhørende effektbehov. Effektbehovet er beregnet ut ifra standardverdiene presentert i tabell 6. Driftstid for kontor- og kantineområder er hentet fra tabell 14.

Tabell 15: oversikt over utstyr for ulike soner i bygget med tilhørende effektbehov og driftstid.

Område	Type utstyr	Effektbehov [W]		Driftstid
Kontor	Bærbar PC	16	1 pr. pers	Som for kontor
	Skjerm	44	1 pr. pers	Som for kontor
	Kopimaskin/printer	30	2 pr. etg.	Alltid dvalemodus
Serverrom	Teknisk utstyr	50 000		Konstant
Resepsjon/møtesenter	Stasjonær PC	60	2 stk.	Som for kontor
	Kopimaskin/printer	30	1 stk.	Alltid dvalemodus
	Bærbar PC	16	1 pr. pers	Som for kontor
Kantine	Bærbar PC	16		Som for kantine
Lager	Stasjonær PC	60	2 stk.	Som for lager

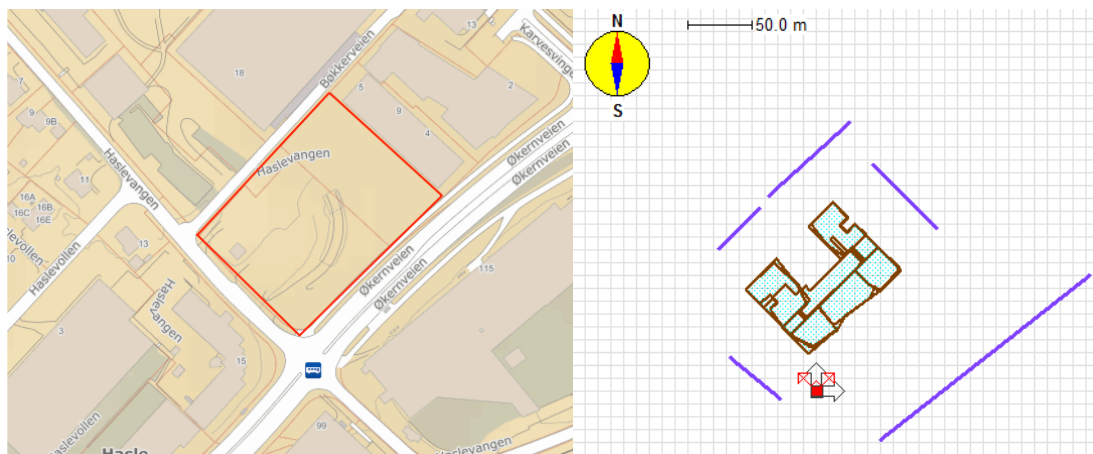
Det antas at hver bruker i kontorlandskapet har en bærbar PC og en skjerm som er i på-modus når bruker er tilstede, totalt effektbehov for disse er satt til 60 W. I simuleringene er det antatt at tilført effekt er lik avgitt varme og det forutsettes at datamaskinen er enten på eller av, aldri i ventemodus. Kopimaskiner/printere blir sjeldent slått av om natten og brukes kun i korte perioder på dagtid. På bakgrunn av det gjøres forenklingen at kopimaskinen/printereren alltid er i dvalemodus og har et effektbehov på 30 W hele døgnet.

➤ Belysning

Belysningen i bygget er behovsstyrt og styres etter tidsplanene for tilstedeværelse i hhv. kontorområdene og kantineområdet (tabell 14). Installert effekt for belysning i casebygget er beregnet til $4,5 \text{ W/m}^2$. I simuleringene antas det at varmetilskuddet fra belysning er 25 % av den installerte effekten. Videre antas det at lysrørene som benyttes har et lysutbytte på 70 lumen/W.

6.2.3 Solbelastning

IDA ICE 4.7.1 tilbyr en funksjon som lar deg legge inn en detaljert beskrivelse av byggets plassering og orientering samt eventuelle skyggende objekter. Kart over tomten til det planlagte bygget ble hentet fra søketjenesten kart.finn.no og importert til programmet RX View. RX View ble benyttet til beregninger av byggets orientering samt avstander og høyde på elementer i nrområdet som kan påvirke byggets solbelastning. Bildet til venstre i figur 16 viser kart over tomten til det planlagte casebygget, det markerte området viser den tenkte plasseringen. Bildet til høyre er et skjermbilde fra IDA ICE, der byggets orientering samt skyggende objekter lagt inn. I tillegg til byggene som står oppført innenfor skyggeavstand i henhold til kartet er det lagt inn et bygg i retning nord-vest for casetomten. På denne tomten skal det i henhold til informasjon fra samarbeidsbedriften, settes opp et bygg som vil kunne påvirke solbelastningen til casebygget.



Figur 16: Bildet til venstre viser kart over tomten til det planlagte casebygget, rød firkant viser nøyaktig planlagt plassering. Bildet til høyre viser orientering og skyggeelementene lagt inn i simuleringsprogrammet.

6.2.4 Andre relevante verdier

- Klimadata: for simuleringene er det benyttet klimadata fra området Oslo/Gardermoen som kan lastes ned fra databasen i IDA ICE 4.7.1.
- Varmegjenvinner: virkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsaggregater er satt til 85 %, som er det man regner med å oppnå for casebygget.
- Lokal kjøling: prosjektet har mål om minimal lokal kjøling. Grunnet spesielt stor varmelast i det planlagte serverrommet, antatt 50 kW, legges det til grunn lokal kjøling her. Med unntak av serverrommet legges ingen lokal kjøling til grunn.
- Luftmengde: tilført luftmengde er satt til minimum $0,3 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ som tilsvarer $1,08 \text{ m}^3/\text{h}$ og maksimum $2,78 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ som tilsvarer $10,08 \text{ m}^3/\text{h}$ for alle rom utenom toaletter og garderober. For toalettene og garderoberne er maksimal tilført luftmengde økt til $4,18 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ som tilsvarer $15,048 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Settpunkter for behovsstyrt ventilasjon (VAV): settpunktene for tilluftstemperaturen er satt til å variere med byggets driftstid (kl. 07:00-17:00).
 - Minimum: 16°C utenfor driftstid og 20°C i driftstiden.
 - Maksimum: 18°C utenfor driftstid og 22°C i driftstiden.
 - CO_2 -nivå: 500- 800 ppm

7 Resultater

7.1 Effektforbruk i eksempelbygg

Data for de to eksempelbyggene er hentet fra energioppfølgingsystemet til Nydalen energisentral. Data fra år 2013, 2014, 2015 og 2016 er analysert og nøkkeltallene er oppsummert i tabell 16 for Nydalsveien 12 og tabell 17 for Gjerdrumsvei 4. For begge byggene var det høyeste målte effektuttaket den 1. Juni 2016. Faktisk effektforbruk, time for time, dette maksimaldøgnet er illustrert i figur 17 for Nydalsveien 12 og i figur 18 for Gjerdrumsvei 4.

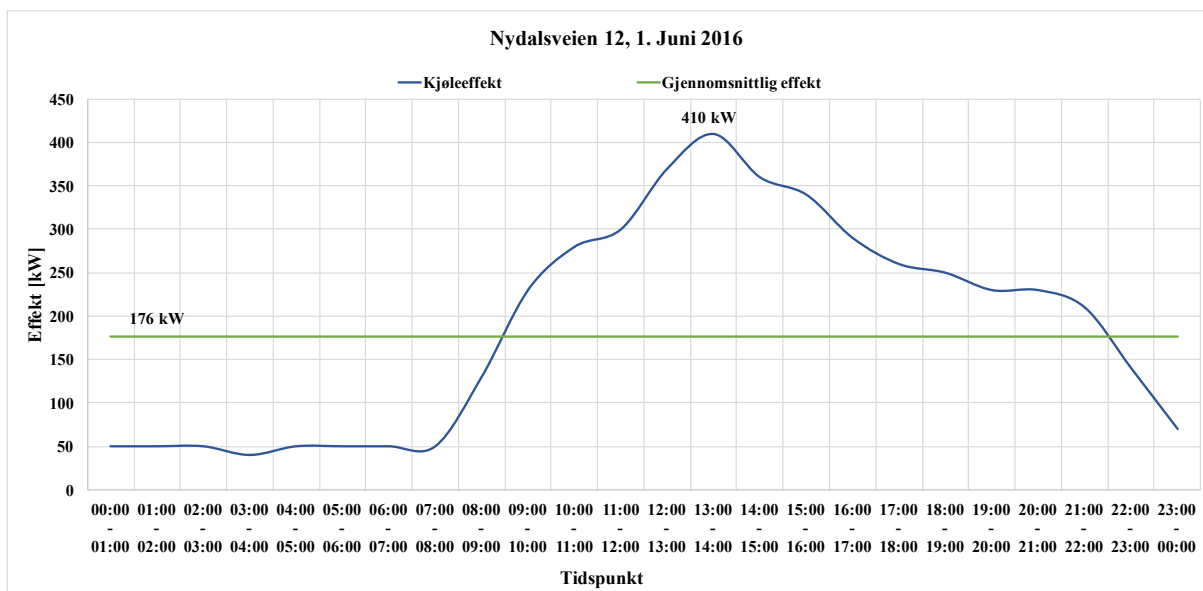
7.1.1 Nydalsveien 12

I tabell 16 oppsummeres nøkkeltall for eksempelbygget i Nydalsveien 12. Fra tabellen kommer det fram at det høyeste registrerte effektuttaket for kontorbygget er på 410 kW. Kjøleanlegget i bygget er dimensjonert for en effekt på 800 kW (Nygård 2017). Totalt oppvarmet areal i bygget (BRA) er på 12 912 m² og ut ifra det kan den installerte effekten til bygget beregnes til 62 W/ m². Data analysert for effektforbruket til bygget er fra årene 2013-2016, basert på disse dataene kommer det fram at kjøleanlegget er overdimensjonert med hele 48,75 %.

Tabell 16: Nøkkeltall for eksempelbygget i Nydalsveien 12, hentet fra byggets EOS.

Nydalsveien 12	
Bygningskategori	Kontorbygg
Totalt areal	13 950 m ²
Oppvarmet areal	12 912 m ²
Byggeår	2012
Energistandard	TEK10
Høyeste målte effektuttak (1. Juni 2016)	410 kW
Gjennomsnittlig effekt (1. Juni, 2016)	176 kW
Kjøleanlegg dimensjonert for	800 kW
Installert effekt per m²	62 W/ m ²

Figur 17 viser en grafisk framstilling av døgnvariasjonen til effektforbruket ved kjøling av kontorbygget i Nydalsveien 12. Den blå kurven viser effektuttaket, time for time, i løpet av døgnet i kW. Kurven viser effektforbruket til bygget i løpet av døgnet den 1. Juni 2016, som i henhold EOS-loggen er døgnet med det høyeste registrerte effektuttaket basert på data fra årene 2013- 2016. Den grønne linjen viser gjennomsnittseffekten over døgnet som er beregnet til 176 kW. Effekttoppen på 410 kW er markert i figuren.



Figur 17: Grafisk framstilling av døgnvariasjonen til effektforbruket ved kjøling av kontorbygget i Nydalsveien 12, den 1. Juni 2016. Data hentet fra byggets EOS.

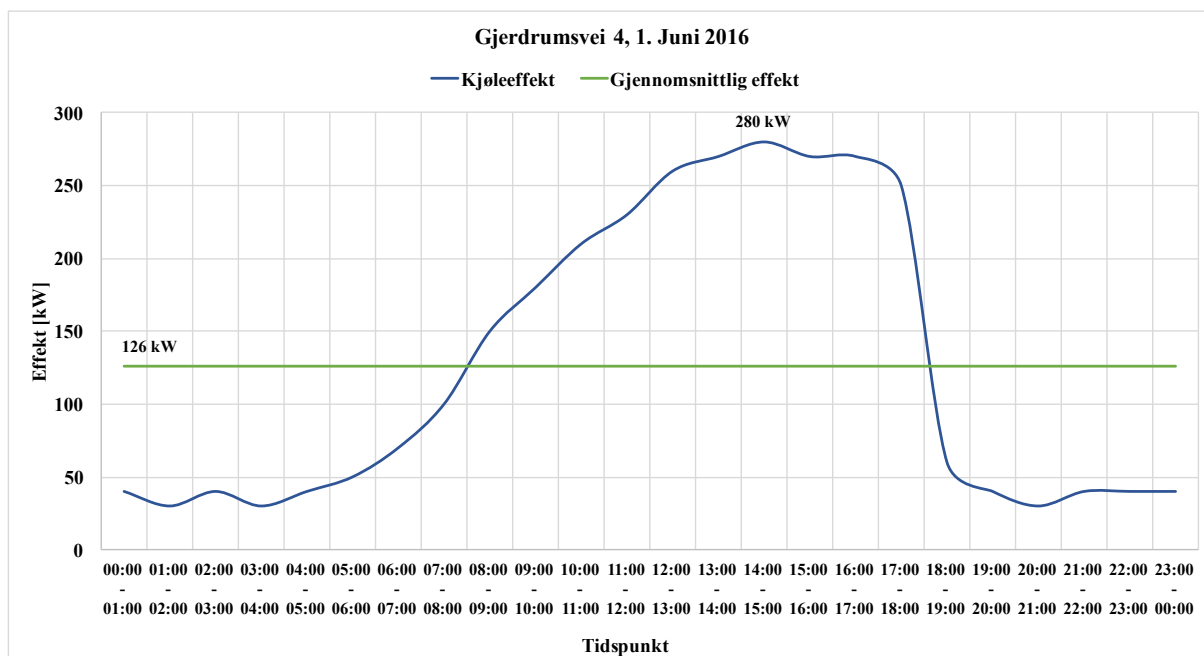
7.1.2 Gjerdrumsvei 4

I tabell 17 oppsummeres nøkkeltall for eksempelbygget i Gjerdrumsvei 4. Fra tabellen kommer det fram at det høyeste registrerte effektuttaket for kontorbygget er på 280 kW. Kjøleanlegget i bygget er dimensjonert for en effekt på 625 kW (Nygård 2017). Totalt oppvarmet areal (BRA) i bygget er på 8 800 m² og ut ifra det er den installerte effekten til bygget beregnet til 71 W/m². Data analysert for effektforbruket til bygget er fra år 2013-2016, basert på disse dataene kommer det fram at kjøleanlegget er overdimensjonert med hele 55,2 %.

Tabell 17: Nøkkeltall for eksempelbygget i Gjerdrumsvei 4, hentet fra byggets EOS.

Gjerdrumsvei 4	
Bygningskategori	Kontorbygg
Totalt areal	11 139 m ²
Oppvarmet areal	8 800 m ²
Byggeår	2002
Høyeste målte effektuttak (1. Juni, 2016)	280 kW
Gjennomsnittlig effekt (1. Juni, 2016)	126 kW
Kjøleanlegg dimensjonert for	625 kW
Installert effekt per m ²	71 W/m ²

Figur 18 viser en grafisk framstilling av døgnvariasjonen til effektforbruket ved kjøling av kontorbygget i Gjerdrumsvei 4. Den blå kurven viser effektuttaket, time for time, i løpet av døgnet i kW. Kurven viser effektforbruket til bygget i løpet av døgnet den 1. Juni 2016, som i henhold EOS-loggen er døgnet med det høyeste registrerte effektuttaket basert på data fra årene 2013- 2016. Grønn linje viser gjennomsnittseffekten over døgnet, denne er beregnet til 126 kW. Effekttoppen på 280 kW er markert i figuren.



Figur 18: Grafisk framstilling av døgnvariasjonen til effektforbruket ved kjøling av kontorbygget i Gjerdrumsvei 4, den 1. Juni 2016. Data hentet fra byggets EOS.

7.2 Økonomiske betraktninger for eksempelbygg

For begge eksempelbyggene er det beregnet hvor store de økonomiske besparelsene knyttet til investering, drift og vedlikehold potensielt kunne vært med en mer optimalisert dimensjonering av kjøleanlegget. Resultatene av disse beregningene er presentert i tabell 18 og 19.

7.2.1 Potensielle besparelser ved redusert installert effekt, Nydalsveien 12

Tabell 18 viser hvor mye kostnader knyttet til investering, drift og vedlikehold kunne vært redusert ved installasjon av et mindre kjøleanlegg for kontorbygget i Nydalsveien 12. Kjøleanlegget i bygget er i dag dimensjonert for 800 kW, og estimerte kostnader knyttet til denne investeringen er presentert i kolonne nummer to i tabellen. De fire påfølgende kolonnene i tabellen viser beregnede kostnadsreduksjoner som følge av ulike reduksjoner av installert effekt. Beregninger har blitt gjort for reduksjon på 20 % (til 640 kW), 30 % (til 560 kW), ned til den målte makseffekten på 410 kW (48,75 %) og ned den beregnede gjennomsnittseffekten for maksimaldøgnet på 176 kW (grønn linje i figur 17). Kostnadene benyttet i beregningene er hentet fra kapittel 3.2.2.

Tabell 18: Viser potensielle besparelsene ved redusert installert effekt for kontorbygget i Nydalsveien 12.

	Dimensjonert for: 800 kW	-20 % Til 640 kW	-30 % Til 560 kW	-48,75 % Til 410 kW	Til snitt 176 kW
Investeringskostnad*	3 200 000	2 560 000	2 240 000	1 640 000	705 000
Drifts- og vedlikeholdskostnader**	96 000	76 800	67 200	49 200	21 150
SUM	3 296 000	2 636 800	2 307 200	1 689 200	726 150
Besparelse ved redusert installert effekt	-	659 200	988 800	1 606 800	2 569 850

* Benyttet investeringskostnad presentert i kap. 3.2.2 på 4000 kr/kW.

** Benyttet drifts- og vedlikeholdskostnad som presentert i kap. 3.2.2 på 3 % av investeringskostnad.

7.2.2 Potensielle besparelser ved redusert installert effekt, Gjerdrumsvei 4

Tabell 19 viser hvor mye kostnadene knyttet til investering, drift og vedlikehold kunne vært redusert ved installasjon av et mindre kjøleanlegg for Gjerdrumsvei 4. Kjøleanlegget i bygget i dag er dimensjonert for 625 kW, og estimerte kostnader knyttet til denne investeringen er presentert i kolonne nummer to i tabellen. De fire påfølgende kolonnene i tabellen viser beregnede kostnadsreduksjoner som følge av ulike reduksjoner av installert effekt.

Beregninger har blitt gjort for reduksjon på 20 % (til 500 kW), 30 % (til 437,5 kW), ned til den målte makseffekten på 280 kW (55,2 %) og ned den beregnede gjennomsnittseffekten for maksimaldøgnet på 126 kW (grønn linje i figur 18). Kostnadene benyttet i beregningene er hentet fra kapittel 3.2.2.

Tabell 19: Viser hvor store besparelsene kunne vært ved redusert installert effekt for kontorbygget i Gjerdrumsvei 4.

	Dimensjonert for: 625 kW	-20 % Til 500 kW	-30 % Til 437,5 kW	-55,2 % Til 280 kW	Til snitt 126 kW
Investeringskostnad*	2 500 000	2 000 000	1 750 000	1 120 000	503 200
Drifts- og vedlikeholdskostnader**	75 000	60 000	52 500	33 600	15 096
SUM	2 575 000	2 060 000	1 802 500	1 153 600	518 296
Besparelse ved redusert installert effekt	-	515 000	772 500	1 421 400	2 056 704

* Benyttet investeringskostnad presentert i kap. 3.2.2 på 4000 kr/kW.

** Benyttet drifts- og vedlikeholdskostnad som presentert i kap. 3.2.2 på 3 % av investeringskostnad

Ved kun å ta redusert investeringskostnad og de reduserte drifts- og vedlikeholdskostnadene et mindre kjøleanlegg medfører i betraktning kunne kostnadene vært redusert med hele 1 606 800 kr, ved en optimal dimensjonering av kjøleanlegget i Nydalsveien 12 (tabell 18). De samme betraktningene viser en kostnadsreduksjon på 1 421 400 kr ved en optimal dimensjonering av kjøleanlegget i Gjerdrumsvei 4 (tabell 19). En optimal dimensjonering er dog urealistisk, men det viser at de potensielle besparelsene er store. Caseprosjektet har mål om at termisk lagring skal kunne bidra til en neddimensjonering av kjøleanlegget på 30 %. Fra tabell 18 kan det leses at en tilsvarende neddimensjonering i Nydalsveien 12 kan gi en

besparelse på 988 800 kr og fra tabell 19 kan det leses at det for Gjerdrumsvei 4 ville tilsvart en besparelse på 772 500 kr.

7.3 Frikjøling mot eksempelbrønnpark

Data fra energioppfølgingssystemet for energisentralen har også blitt benyttet til analyse av drift av en energibrønnpark. Analysene av eksempelbrønnparken har blitt gjort med formål om å kartlegge potensialet for frikjøling mot casebrønnparken.

Den analyserte eksempelbrønnparken består av 180 energibrønner som er 200 m dype, det vil si at parken opererer med 36 000 brønner. Varmeuttak fra brønnparken foregikk i år 2013 i periodene 1. Januar til 13. Mai og 6. Oktober til 31. Desember. Varmetilførsel (frikjøling) foregikk de resterende dagene i året, 14. Mai til 5. Oktober, totalt 20 uker. Se vedlegg 3 for figur som viser energibalansen i brønnparken gjennom hele år 2013.

- Total varmetilførsel (frikjøling) i 2013 var 2 988 300 kWh.
- Gjennomsnittlig varmetilførsel per uke: 149 415 kWh
- Gjennomsnittlig effektuttak per uke: 889 375 W

Sammenhengen vist med formel 1 (kapittel 2.3) brukes til beregning av gjennomsnittlig varmeledningsevne for eksempelbrønnparken.

- Følgende inndata er benyttet:

$$L = 36\,000 \text{ [m]}$$

$$\Delta T = 5 \text{ [K]}$$

$$P = 889\,375 \text{ [W]}$$

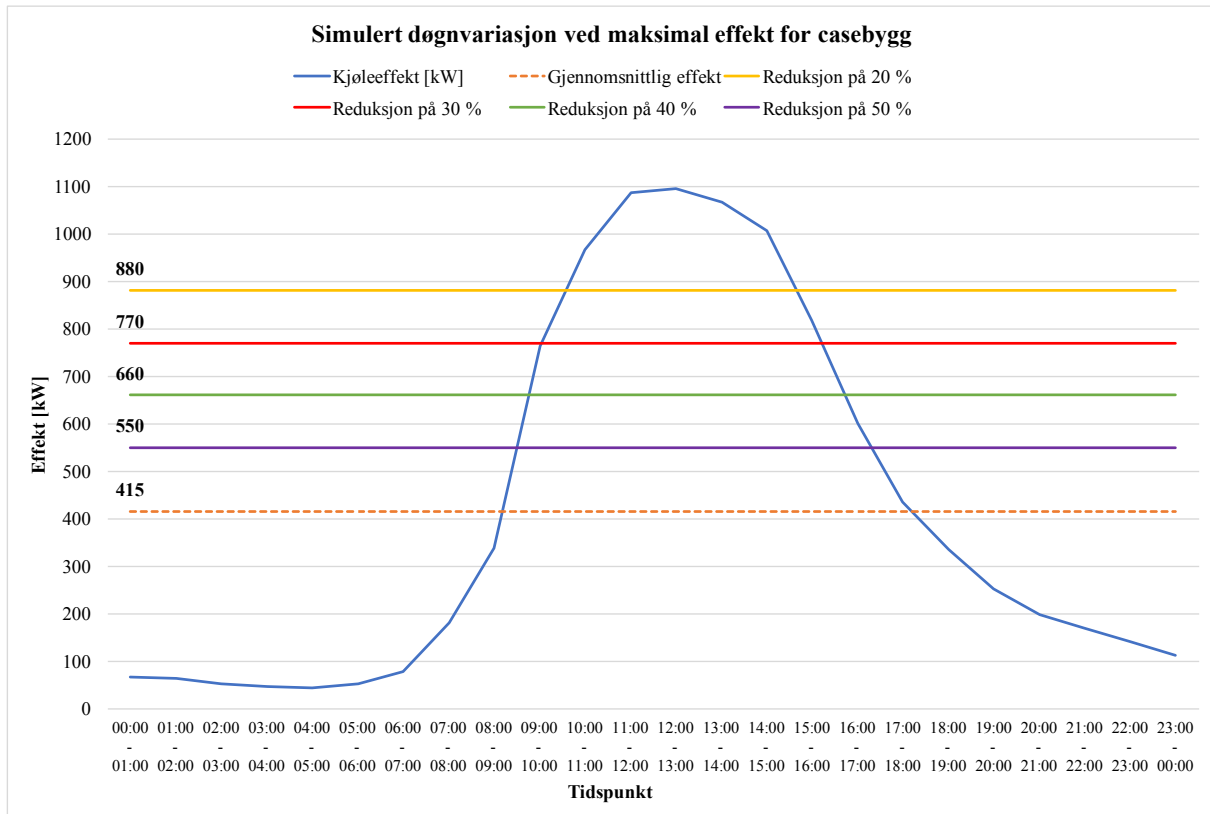
Beregningene viser en gjennomsnittlig varmeledningsevne i berggrunnen på 4,94 W/mK. I denne beregningen er det forutsatt en temperaturdifferanse (ΔT) på 5 grader mellom vannet som føres ned i brønnen og vannet som kommer i retur.

7.4 Casestudiet

7.4.1 Maksimalt effektuttak og døgnvariasjon

Resultat av en årssimulering av effektbehovet til casebygget viser et maksimalt effektuttak på 1 100 kW som inntreffer den 1. August ca. klokken 12:00. Den blå kurven i figur 19 viser døgnvariasjonen av kjøleeffekt, time for time, for dette maksimaldøgnet. De fire heltrukne horisontale linjene viser effektnivået for henholdsvis 20 %, 30 %, 40 % og 50 % under maksimaleffekten på 1 100 kW. Den stiplede oransje linjen er plassert på 415 kW som er den gjennomsnittlige effekten over døgnet. Den gule linjen er plassert på 880 kW og viser effektnivået ved en reduksjon på 20 %. Den røde linjen er plassert på 770kW og viser effektnivået 30 % under makspunktet. Den grønne linjen er plassert på 660kW og viser

effektnivået 40 % under makspunktet. Den lilla linjen er plassert på 550kW og viser effektnivået 50 % under makspunktet.



Figur 19: Resultat av årssimulering av kjøleeffekt for casebygget, simulert med IDA ICE. Den blå kurven viser døgnvariasjonen til effektuttaket ved maksimaldøgnet. Horisontale linjer viser effektnivået ved ulike reduksjoner.

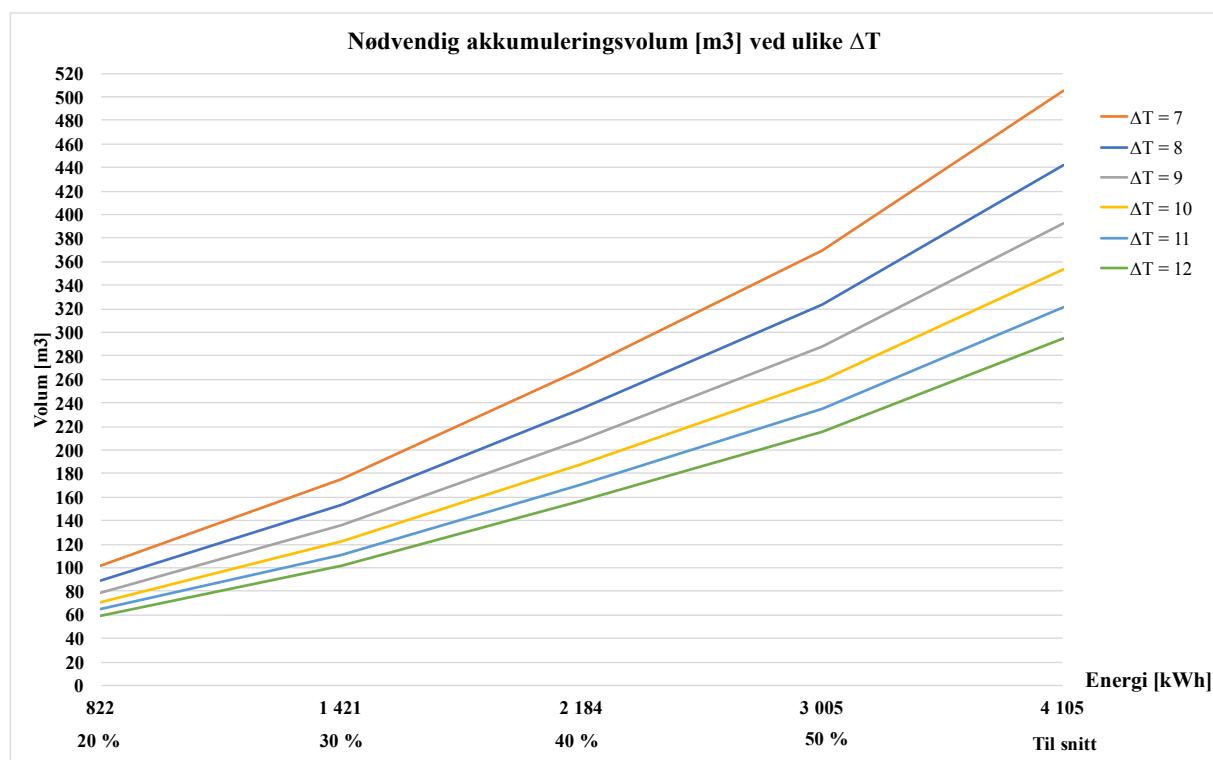
7.4.2 Nødvendig akkumuleringsvolum

Hovedmålet med innføringen av konseptet er å kunne neddimensjonere det kostbare kjøleanlegget i bygget ved bruk av et vannmagasin som termisk lager. For beregning av den vannmengden som vil være nødvendig for å kunne redusere effekttoppen benyttes sammenhengen vist med formel 2 i kapittel 3.1. Energimengden i kWh er beregnet som beskrevet i kapittel 3.1 ved å summere avvikene mellom blå kurve og horisontal farget linje for hver time der den blå kurven ligger høyere enn linjen i figur 19. Tabell 20 viser de beregnede energimengdene [kWh] som må akkumuleres for å redusere effekttoppen med hhv. 20 %, 30 %, 40% 50 % og helt ned til døgnjennomsnittseffekten.

Tabell 20: Viser energimengdene som må akkumuleres for å kunne jevne ut effekttoppen til ulike nivåer.

Neddimensjonering	Energimengde, [kWh]
20 %	822
30 %	1421
40 %	2184
50 %	3005
Til gjennomsnitt	4105

Som sammenhengen i formel 2 viser er den nødvendige vannmengden som kreves for akkumulering av de ulike energimengdene avhengig av hvilken temperaturdifferanse (ΔT) som oppnås. Figur 20 viser nødvendig akkumuleringsvolum [m^3] ved ulike temperaturdifferanser (ΔT), beregnet med formel 2 (kapittel 3.1). Verdiene brukt i beregningene presenteres i sin helhet i vedlegg 4. Energimengdene langs den horisontale akse er verdiene presentert i tabell 20. Oransje kurve viser sammenhengen mellom nødvendig vannvolum og de ulike energimengdene dersom en temperaturdifferanse (ΔT) på 7 grader oppnås. Mørk blå kurve viser det tilsvarende for ΔT lik 8 grader, grå for ΔT lik 9 grader, gul for ΔT lik 10 grader, lys blå for ΔT lik 11 grader og grønn for ΔT lik 12 grader.



Figur 20: Viser nødvendig vannvolum for akkumulering av ulike energimengder ved ulike temperaturdifferanser.

7.4.3 Beregnet frikjølingspotensial

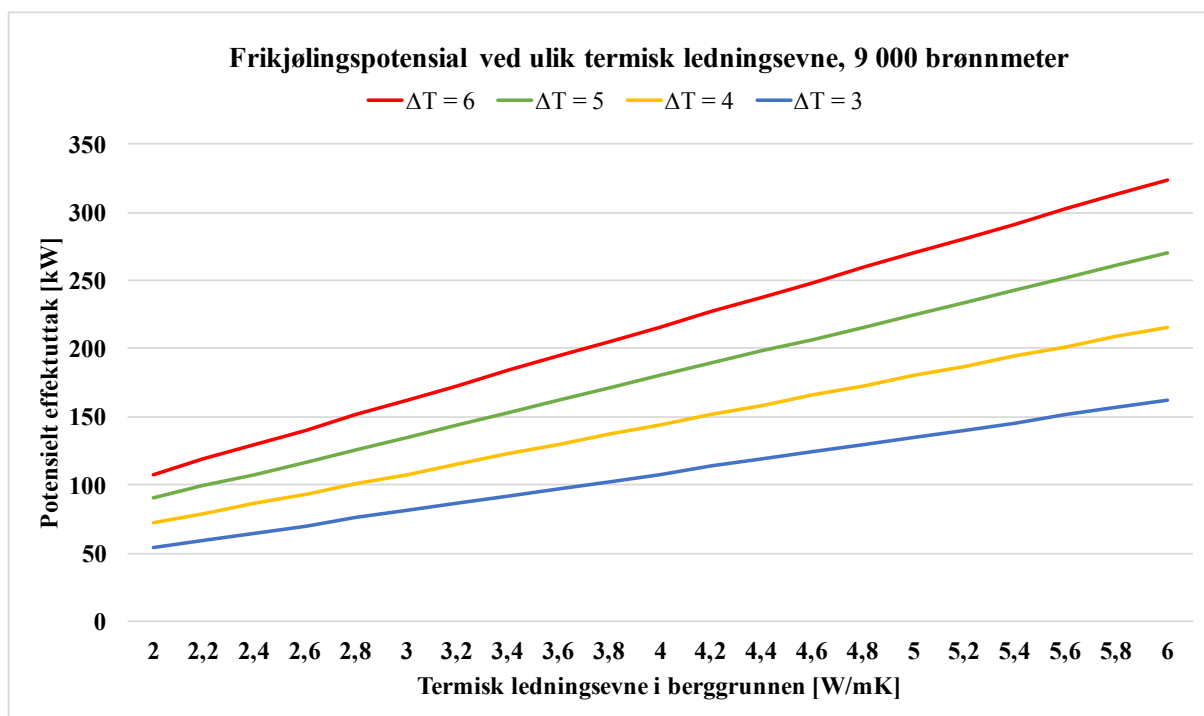
For å optimalisere konseptet må temperaturen på vannet i tanken kjøles til en lavest mulig temperatur i løpet av natten. Denne kjølingen gjøres ved bruk av kjølemaskiner og ved hjelp av frikjøling mot energibrønnene. For at kjølingen skal gjøres så energieffektivt som mulig ønskes størst mulig grad av frikjøling. Den planlagte brønnparken tilknyttet casebygget er dimensjonert til 30 brønner med en målsetting om en dybde på 300 m. Det vil si at det opereres med totalt 9 000 brønnmeter. Med normal energistrøm antas en gjennomsnittlig ledningsevne på 2,8 W/mK. Temperaturen på vannet fra isvannsnett som føres ned i brønnene antas å være ca. 14°C ved starten av en frikjølingsperiode, men det må tas høyde for at temperaturen vil synke til ca. 12°C. Med en temperatur i berggrunnen på 6- 8 °C, er det rimelig å anta en returtemperatur på 8- 10°C. Grunnet variasjoner og usikkerheter knyttet til hvilke temperaturer som oppnås er det blitt gjort beregninger for flere ulike temperaturdifferanser (ΔT). Tabell 21 viser resultatene av beregnet frikjølingspotensial mot brønnparken for en varierende temperaturdifferanse (ΔT) på mellom tre og seks grader.

Beregningene er gjort med bruk av formel 1 og med antatt ledningsevne på 2,8 W/mK og 9 000 brønnmeter.

Tabell 21: Viser oversikt over beregnet frikjølingspotensial for energibrønnparken tilknyttet casebygget for ΔT på 3-6 grader, ledningsevne på 2,8 W/mK og 9 000 brønnmeter.

ΔT	Frikjølingspotensial [kW], 9 000 brønnmeter
6	151
5	126
4	101
3	76

I kapittel 2.3 oppgis det at varmeledningsevnen i fjell kan variere mellom 2- 6 W/mK. Resultatene av beregningene for eksempelbrønnparken viste en oppnådd gjennomsnittlig varmeledningsevne på 4,94 W/mK ved ΔT på 5 grader. Høyere ledningsevne gir høyere effektuttak noe som vil gi prosjektet økt grad av frikjøling. Det er ikke blitt gjort undersøkelser i forkant av antakelsen på 2,8 W/mK for casebrønnparken, og det er knyttet usikkerhet til hvorvidt denne verdien er korrekt. Grunnet denne usikkerheten er det blitt gjort beregninger for potensielt effektuttak ved ulike termiske ledningsevner for en brønnpark på 9 000 brønnmeter. Resultatet av disse beregningene er illustrert i figur 21. Figuren viser potensielt effektuttak [kW] for en varierende varmeledningsevne i berggrunnen på mellom 2- 6 W/mK med en konstant temperaturredifferanse (ΔT). Rød linje beskriver potensielt effektuttak for ulike verdier for varmeledningsevne når ΔT holdes konstant lik 6 grader, grønn for ΔT lik 5 grader, gul for ΔT lik 4 grader og blå for ΔT lik 3 grader.



Figur 21: Viser potensielt effektuttak [kW] for termisk ledningsevne på 2-6 W/mK når temperaturredifferansen (ΔT) holdes konstant for 9 000 brønnmeter.

Antatt en varmeledningsevne i berggrunnen som varierer mellom 2- 6 W/mK og forutsatt at det oppnås en ΔT på mellom tre og seks grader resulterer det i et varierende effektuttak på mellom 54 kW og 324 kW, for en brønnpark med 9 000 m. Alle verdier benyttet i beregningene av potensielt effektuttak presenteres i sin helhet i vedlegg 5.

7.4.4 Overvannshåndtering for casetomt

Hvilke krav som stilles til overvannshåndteringen på casetomten samt hvilke løsninger som velges til fordrøyningen vil ha betydning for virkningen av konseptet. For caseprosjektet tillater Oslo kommune en maksimal videreført vannmengde på 3 l/s fra tomten til påslipp på det offentlige ledningsnettet. Tabell 22 viser en oversikt over inndata benyttet i Basals beregningsverktøy for beregning av nødvendig fordrøyningsvolum for caseprosjektet. Tabellen viser værdata og avrenningskoeffisienter benyttet i beregningene.

Tabell 22: Viser en oversikt over værdata og avrenningskoeffisienter som brukes i Basals beregningverktøy for nødvendig fordrøyningsvolum for caseprosjektet.

Værdata og avrenningskoeffisienter	
Fylke	Oslo
Målestasjon	Blindern
Gjentaksintervall	20 år
Klimafaktor	20 %
Gjennomsnittlig videreført vannmengde	70 % av maks.
Maks videreført vannmengde	3 l/s
Avrenningskoeffisienter (ϕ)	
Tette tak	0,9
Sedumtak	0,75
Asfalt	0,8
Grønt	0,5

Med inndata for arealtyper presentert i tabell 11, arealfordelingen presentert i tabell 12, værdata og avrenningskoeffisientene presentert i tabell 22 gir Basals beregningverktøy et nødvendig fordrøyningsvolum for totalt regnutsatt areal på 347,5 m³. Basals beregningverktøy benytter regnvelopmetoden med konstant utløp ved dimensjonering av nødvendig fordrøyningsvolum. Tabell 23 angir hvordan det totale nødvendige fordrøyningsvolumet fordeles på de to lukkede fordrøyningsmagasinene. Tabellen viser også samt hvor mye tiltakene regnbed og utvendige renner bidrar til forsinkelse av regnvannet og dermed redusert magasineringsbehov.

Tabell 23: Viser fordelingen av nødvendig fordrøyningsvolum på de to lukkede magasinene (magasin 1 og 2) samt hvor mye regnbed og utvendige renner bidrar til forsinkelse og dermed redusert magasineringsbehov.

Magasin 1		Magasin 2	
Nødvendig fordrøyningsvolum	269,9 m ³	Nødvendig fordrøyningsvolum	77,5 m ³
Fordrøyningsvolum regnbed	- 28 m ³	Fordrøyningsvolum regnbed	- 49 m ³
Utvendige renner	-	Utvendige renner	- 12 m ³
Fordrøyningsvolum magasin 1	241,9 m³	Fordrøyningsvolum magasin 2	16,5 m³

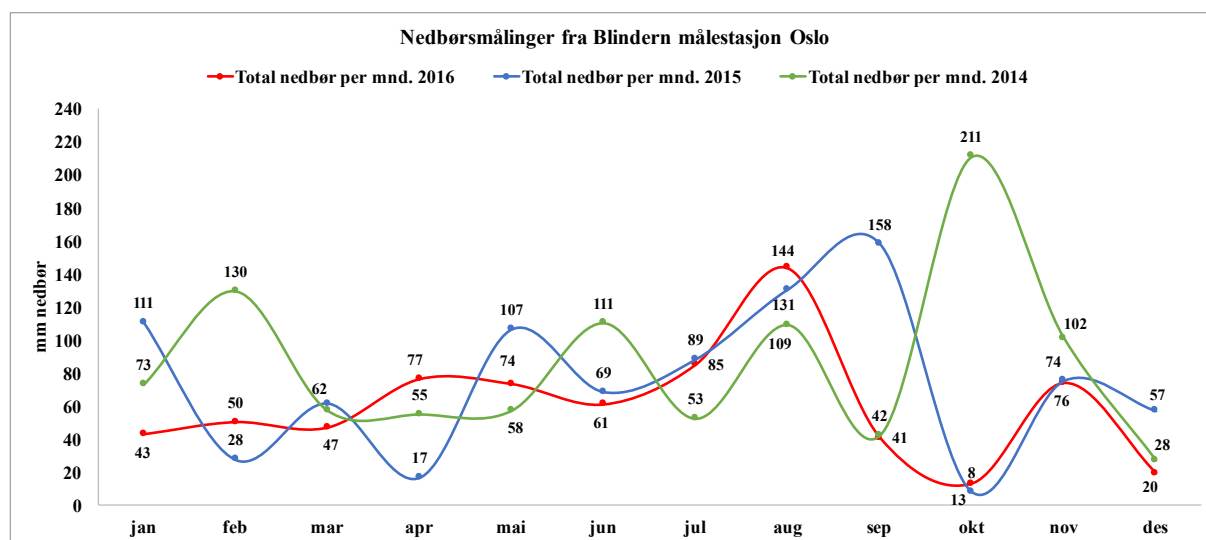
Relevant for konseptvurderingen knyttet til caseprosjektet er volumet av det store fordrøyningsmagasinet (Magasin 1), på om lag 242m³, da dette er magasinet som vil være tilknyttet akkumuleringstanken(e).

7.4.5 Kjølebehov og nedbørsmengder på årsbasis

Kartlegging av når på året kjølebehovet er størst, når på året ekstremværet inntreffer samt hvordan disse tidspunktene sammenfaller er relevant for konseptvurderingen.

7.4.5.1 Årsvariasjon av nedbør

Figur 22 viser et plott av total nedbør hver måned i 2014, 2015 og 2016 målt ved Blindern målestasjon i Oslo. Verdiene er presentert på tabellform i vedlegg 6. Nedbørsdata er hentet fra meteorologisk institutts søketjeneste eKlima (eKlima 2017). Grønn kurve viser total nedbør hver måned i 2014, blå kurve for 2015 og rød kurve for 2016.

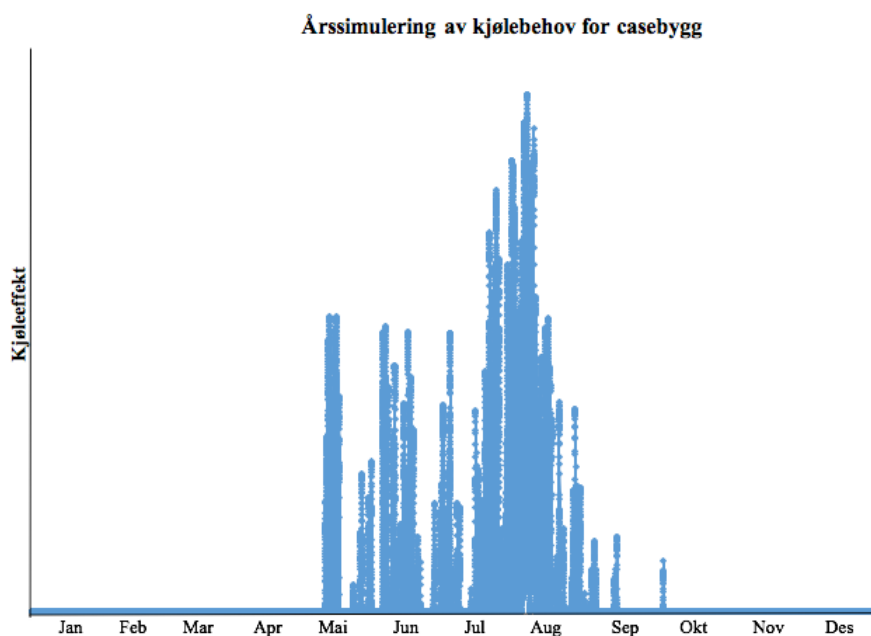


Figur 22: Viser total nedbør hver måned i 2014 (grønn), 2015 (blå) og 2016 (rød) målt ved Blindern målestasjon i Oslo.

Fra målingene kommer det fram at det er stor variasjon i den månedlige totale nedbøren de tre siste årene. Det er svært uforutsigbart og vanskelig å forutse når ekstremvær vil inntreffe. En observasjon gjort ut fra nedbørsmålingene er at august skiller seg ut som en måned med relativt store nedbørsmengder, på henholdsvis 144 mm (år 2016), 131 mm (år 2015) og 109 mm (år 2014) hvert år de tre foregående årene.

7.4.5.2 Årsvariasjon av kjølebehov

Resultat av årssimuleringen av kjølebehovet til casebygget (figur 23), viser at kjøleperioden primært foregår fra midten av mai og til begynnelsen av september. Fra simuleringen kan det observeres at kjølebehovet er størst i månedsskiftet mellom juli og august, og de aller største effektuttakene er registrert i begynnelsen av august. Resultatene fra simuleringen viser at den høyeste effekttoppen i mai er på 479 kW, i juni er den 463 kW, i juli 1 004 kW og for august på 1 104 kW.



Figur 23: Resultat av årssimulering av kjølebehov for casebygg. Simulering gjort i IDA ICE.

Resultatene fra nedbørsmålingene og det simulerte kjølebehovet viser at august er en måned det kan forventes både stor nedbørsmengde og stort kjølebehov. Uforutsigbarheten knyttet til når ekstremvær inntreffer samt resultatene som viser at ekstremvær og maksimalt kjølebehov kan inntreffe samtidig er en faktor det må tas hensyn til ved dimensjonering og regulering av fordrøyningsanlegget.

7.4.6 Økonomiske betraktninger

Tabell 24 viser en oversikt over de økonomiske betraktningene gjort i konseptvurderingen for caseprosjektet. De tre økonomiske betraktningene presentert i kapittel 3.2 er vurdert:

1. Merkostnadene ved innføring av konseptet
2. Besparelser knyttet til neddimensjonering av kjøleanlegg
3. Besparelser knyttet til redusert betaling for effekt

Kostnadene for oppdimensjoneringen av magasinet avhenger volumet som skal legges til magasinet. Til beregning av kostnadene for en oppdimensjonering av fordrøyningsmagasinet er volumet brukt i beregningene forutsatt at det oppnås en ΔT på 10 grader (figur 20). Gitt den forutsetningen kreves et akkumuleringsvolum på 71 m³ for en 20 % effektreduksjon, 122 m³ for 30 %, 188 m³ for 40 %, 259 m³ for 50 % og 354 m³ for en effektreduksjon helt ned til gjennomsnittseffekten på 415 kW. I beregningene legges det til grunn en fullstendig

oppdimensjonering der hele det nødvendige akkumuleringsvolumet legges til det beregnede fordrøyningsvolumet. Hvorvidt en så stor oppdimensjonering er nødvendig drøftes i diskusjonskapittelet.

Ved beregningene av kostnadene for effektbetaling er det tatt utgangspunkt i resultatet fra simuleringene av effektbehovet til casebygget. Bedriftene betaler for det høyeste registrerte effektuttaket hver måned, størrelsen på neddimensjoneringen vil derfor være avgjørende for antallet måneder det blir besparelser grunnet reduserte effekttopper. På bakgrunn av resultatet fra årssimuleringen av effektbehovet (figur 23) viser det seg at en neddimensjonering på 20 %, 30 %, 40 % og helt ned til 50 % kun vil gi en besparelse knyttet til effektbetaling i månedene juli og i august. Dersom det neddimensjoneres helt ned til gjennomsnittseffekten på 415 kW vil det kunne gi en besparelse knyttet til effektbetaling i samtlige måneder i kjøleperioden, mai til og med august.

Resultatet av de økonomiske betraktningene er presentert i tabell 24 og viser et positivt resultat på henholdsvis 140 657 kr for en neddimensjonering på 20 %, 439 058 kr for ned dimensjonering på 30 %, 695 158 kr for en neddimensjonering på 40 %, 936 258 kr for en neddimensjonering på 50 % og 1 211 222 kr for en neddimensjonering ned til gjennomsnittseffekten på 415 kW. De prosentvise neddimensjoneringene er sett i forhold til den simulerte maksimaleffekten til casebygget på 1 100 kW.

Tabell 24: Viser en oversikt over de økonomiske betraktningene gjort i konseptvurderingen for caseprosjektet, alle verdier i kr.

	Maks 1 100 kW	-20 % 880 kW	-30 % 770 kW	-40 % 660 kW	-50 % 550 kW	Gj.snitt 415 kW
Investeringskostnad	4 400 000	3 520 000	3 080 000	2 640 000	2 200 000	1 660 000
Drifts- og vedlikeholdskostnader *	132 000	105 600	92 400	79 200	66 000	49 800
SUM	4 532 000	3 625 600	3 172 400	2 719 200	2 266 000	1 709 800
Besparelse grunnet red. installert effekt	-	906 400	1 359 600	1 812 800	2 266 000	2 822 200
Kostnad effektbetaling**	8387	7429	7429	7429	7429	4565
Besparelse red. effekt	-	958	958	958	958	3828
Totale besparelser	-	907 358	1 360 558	1 813 758	2 266 958	2 826 028
Merkostnad systemendring	-	554 300	554 300	554 300	554 300	554 300
Merkostnad oppdimensjonering***	-	212 400	367 200	564 300	776 400	1 060 500
Totale merkostnader	-	766 700	921 500	1 118 600	1 330 700	1 614 800
SUM	-	140 657	439 058	695 158	936 258	1 211 222

* Benyttet en drifts- og vedlikeholdskostnad tilsvarende 3 % av investeringskostnaden.

** Antar en kjølefaktor (COP) på 4 for kjølemaskinene.

*** Volumet brukt i beregningene forutsettes en oppnådd temperaturdifferanse (ΔT) på 10 grader.

7.4.7 Oppsummert resultat og mål for caseprosjektet

Av prosjektbeskrivelsen (kapittel 4.2) kommer det fram at caseprosjektet har et mål om å neddimensjonere kjøleanlegget med 30 % ved bruk av termisk akkumulering. Tabell 25 viser et sammendrag av resultatene for caseprosjektet ved en neddimensjonering på 30 %.

Tabell 25: Viser et sammendrag av resultatene for caseprosjektet ved en neddimensjonering av kjøleanlegget på 30 %.

Oppsummert resultat for neddimensjonering på 30 %	
Installert effekt	770 kW
Energimengde som må akkumuleres	1 421 kWh
Nødvendig akkumuleringsvolum ved $\Delta T = 10$	122 m ³
Besparelse som følge av redusert installert effekt	1 359 600 kr
Besparelse knyttet til redusert effektbetaling	958 kr
Merkostnad ved systemendring	-554 300 kr
Merkostnad for oppdimensjonering av magasinet	-367 200 kr
Resultat av økonomiske beregninger	439 058 kr

8 Diskusjon

Konseptet som vurderes i denne oppgaven baserer seg på en ny kombinasjon av kjente løsninger, overvannshåndtering med bruk av lukkede fordrøyningsmagasin, termisk lagring i vann og kjøling av kontorbygg. Resultatene viser at under gitte forutsetninger vil løsningen være praktisk mulig å gjennomføre og økonomisk lønnsom. For å avgjøre om konseptet bør gjennomføres må konseptets potensielle utfordringer og svakheter vurderes.

Resultatene viser at caseprosjektets mål, om en neddimensjonering av kjøleanlegget på 30 % ved utnyttelse av et fordrøyningsmagasin til termisk lagring, under gitte forutsetninger både er praktisk mulig og økonomisk lønnsomt. Beregningene som ligger til grunn for disse resultatene bygger på en forutsetning om at det simulerte kjølebehovet til bygget på døgn- og årsbasis er tilnærmet lik det faktiske forbruket bygget vil ha. Energimengden som må akkumuleres for å kunne jevne ut effektuttaket til det målsatte nivået beregnes ut fra den simulerte kjøleeffektkurven. Videre forutsettes det i beregningene av nødvendig vannvolum at vannet i tanken kjøles ned til 4 °C i løpet av natten.

8.1 Døgnvariasjon av kjøleeffekt

En avgjørende forutsetning for beregningene i denne oppgaven er den simulerte maksimaleffekten og døgnvariasjonen av effektbehovet ved kjøling av bygget. Utgangspunktet både for arbeidet med denne masteroppgaven og for konseptidéen i seg selv er en hypotese om hvordan effektbehovet for kjøling i et kontorbygg varierer over døgnet. Ved sammenligning av den hypotetiske kurven for døgnvariasjon av kjøleeffekt og den simulerte kurven for casebygget viser det seg at kurven for casebygget er flatere og bredere enn den hypotetiske. Med andre ord er det simulerte kjølebehovet til casebygget både større og spredt over flere av døgnet timer enn antatt i hypotesen.

For å få et bedre vurderingsgrunnlag i denne oppgaven har det faktiske effektforbruket til to eksisterende bygg blitt analysert. Studeres kjølekurvene til de to eksempelbyggene framkommer det også her at kurvene er bredere og det faktiske effektforbruket er spredt over flere timer enn antatt. Faktorer som kan påvirke kjølebehovet til å strekke seg over flere av døgnet timer, utenfor byggets driftstid, kan for eksempel være høy luftfuktighet eller solbelastningen bygget utsettes for. Ved sammenligning av kurvene må det tas i betraktning at dataene fra EOS-loggen til eksempelbyggene ikke er verifiserte og at forenklinger har blitt gjort i simuleringene av casebygget.

Lagt til grunn at den simulerte kjølekurven er tilnærmet lik byggets faktiske effektbehov vil dette resultatets avvik fra hypotesen få konsekvenser for de påfølgende beregningene. Kombinasjonen av høy maksimaleffekt og et spredt kjølebehov gjør at energimengden som må akkumuleres for å oppnå den målsatte neddimensjoneringen av kjøleanlegget i casebygget ble større enn først antatt.

8.2 Konseptvurdering

8.2.1 Lagring av kjøleenergi

Mengden termisk energi som kan utnyttes fra den nedkjølte vannmengden avhenger av hvilken temperatur vannet har. Det økte behovet for akkumulering kan tilfredsstilles ved enten å øke vannvolumet, senke temperaturen på vannet eller ved en kombinasjon av disse. For caseprosjektet skal fordrøyningsanlegget plasseres inne i bygget grunnet høydeforskjellen til påkoblingspunktet til det offentlige ledningsnettet. Når anlegget ikke graves ned og plasseres under bakken med en stabil omgivelsestemperatur vil akkumuleringstankene få behov for isolasjon. I beregningene tas det ikke hensyn til varmeveksling med omgivelsene. Til tross for isolasjon rundt tankene vil i praksis noe termisk energi gå tapt fra lageret. I beregningene forutsettes kjøling av tanken ned til en temperatur på 4°C i løpet av natten. I denne forutsetningen er det lagt inn en sikkerhetsmargin da det i praksis vil det være mulig å kjøle vannet helt ned til ca. 2°C, uten fare for faseforandring. Ved en nedkjøling til 2°C muliggjøres lagring av en større energimengde i den samme vannmengden. Ved å ha denne muligheten kan man kompensere for eventuelle varmetap eller øke effektuttaket dersom det er nødvendig. Forutsetningen om en nattkjøling ned til 4°C vil ved normal drift, uten tilførsel av regnvann, ikke være noe problem å få til i praksis ved bruk av frikjøling og kjølemaskiner. Dette vil være driftssituasjonen for alle døgn i kjøleperioden der nedbørsmengden ikke overstiger kapasiteten til det resterende fordrøyningsanlegget. Vurdering av konseptet for driftssituasjonen ved ekstremvær følger under.

8.2.2 Vurdering av konseptet ved ekstremvær

I en situasjon med ekstremnedbør der kapasiteten til de resterende fordrøyningstankene overskrides må overskuddsvannet tilføres akkumuleringstanken(e). Tilførselen av varmt regnvann vil øke temperaturen på vannet i lagringstanken og dermed svekke lagerets evne til å kjøle bygget ved en senere anledning. Den verst tenkelige situasjonen som kan oppstå for energilageret vil være dersom ekstremvær inntreffer og varmt regnvann må ledes til akkumuleringstanken slik at vannet varmes opp kort tid før kjølebehovet i bygget nærmer seg maks. Når aktiviteten i kontorbygget og solbelastningen øker utover formiddagen vil ikke vannet i akkumuleringstanken ha den forutsatte temperaturen på 4°C og lageret kan ikke benyttes til kjøling i den grad det er tenkt. Dersom denne situasjonen skulle inntreffe, og det har blitt foretatt en for stor neddimensjonering av kjøleanlegget i bygget, vil konsekvensen kunne bli at innetemperaturen ikke kan kjøles ned til under 26°C, som i henhold til TEK10 er anbefalt. Dette er ikke en ønskelig situasjon og det bør gjøres en vurdering av konseptet i forbindelse med dette scenarioet. Ytterligere analyser og beregninger må gjøres for å kartlegge hvor stor risikoen er for at situasjonen inntreffer, hvor ofte kan den forekomme og hvor høy vil innetemperaturen potensielt kunne bli. I henhold til veilederen for TEK10 §13-4. Termisk inneklime, bør overskridelse av den anbefalte maksimaltemperaturen på 26°C kunne aksepteres i varme sommerperioder med utelufttemperatur over dimensjonerende utetemperatur (TEK10 2012).

Nedbørsmengde og tidspunkt for når ekstremvær inntreffer er vanskelig å forutsi, og dersom kjølemaskinene har vært i bruk hele natten og kjølt vannet ned til 4°C er det svært uheldig at

varmt regnvann tilføres tanken. Hyppig og sporadisk tilførsel av regnvann til akkumuleringstanken vil føre til en mindre temperaturredifferanse (ΔT), et økt behov for bruk av kjølemaskinene og dermed en mindre energieffektiv løsning. Behovet for komfortkjøling i kontorbygg i Norge er hovedsakelig i perioden mai til og med august. Resultatene fra nedbørsmålingene i Oslo for 2016 viser at det falt lite nedbør i mai og juni, mer i juli og store nedbørsmengder i august. Sett nedbørsmålingene fra Blindern målestasjon for 2016 (eKlima 2017) i sammenheng med årssimuleringen av kjølebehovet til casebygget kommer det klart fram at det er en reell mulighet for at det verst tenkelige scenarioet, der ekstremnedbør sammenfaller med maksimalt kjølebehov, kan oppstå. Tatt i betraktning at nedbørsmengde er en svært uforutsigbar faktor medfører avhengighet av denne usikkerhet i forhold til stabilitet og pålitelighet for lagring og leveranse av kjøleenergi.

Tiltak for optimalisering ved ekstremvær

En god løsning for styring og regulering av regnvannet vil kunne redusere denne usikkerheten og graden av konseptets avhengighet av nedbør, noe som vil kunne øke stabiliteten og påliteligheten til energilageret og kjøleleveransen. For å optimalisere konseptet er det ønskelig å finne en løsning for styring slik at en fast vannmengde holdes igjen og sirkuleres i systemet mesteparten av tiden, og tilførsel av nytt regnvann begrenses til kun de største nedbørsperiodene. For å begrense tilførselen av regnvann til akkumuleringstankene må styringssystemet sørge for at den delen av fordrøyningsanlegget som ikke brukes til akkumulering alltid fylles opp til maksimal kapasitet før lagertankene tas i bruk. En nøyaktig mengderegulator skal sørge for at påslippet fra fordrøyningsanlegget til det offentlige ledningsnett til enhver tid vil være lik kommunens tillatte mengde på 3 l/s. Styringssystemet må sørge for å etterfylle denne vannmengden kontinuerlig. Et slikt styringssystem vil kreve måling av vannstand og motorventiler ved inn- og utløp i alle tanker. Denne ekstrakostnaden er medregnet i de økonomiske betraktningene i oppgaven.

Et tiltak som kan gjøres for å optimalisere utnyttelsen av lageret på dagtid dersom varmt regnvann må tilføres tanken når byggets kjølebehov er stort, er å utforme tanken slik at tilførselen av regnvann skaper minimal omrøring i tanken. I henhold til VA/Miljø-blad nr. 103 kan lukkede fordrøyningsmagasin utformes slik at omrøringen av vannet i tanken blir minst mulig dersom det er en ønsket funksjon for magasinet. I bladet argumenteres det for minimal omrøring for å oppnå bunnfelling slik at ikke uønskede partikler går i nødoverløpet (VA/Miljø-blad103 2012). I en rapport publisert av SINTEF Byggforsk i 2008 med tittelen "Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus" beskrives prinsippet rundt temperatursjiktning i en akkumulatortank tilkoblet et solvarmeanlegg. I en akkumulatortank der varmt vann tilføres i øvre del av tanken og det er lite omrøring vil kaldt vann, grunnet høyere tetthet, synke til bunnen og det vil oppnå ulike temperatursjikt i tanken. Ved bruk av et fordrøyningsmagasin som termisk lager vil målet, på samme måte som for lagertanken tilknyttet solvarmeanlegget, være å hente ut vann med så lav temperatur som mulig fra bunnen av tanken (Andresen 2008). Ved bruk av dette tiltaket må det tas i betraktning at i bunnen av et fordrøyningsmagasin med lite omrøring vil det kunne samle seg slam og andre uønskede partikler, dette til tross for bruk av forbehandlingskammer eller andre tiltak. For å

sikre seg mot videreføring av disse stoffene kan ikke utløpet plasseres helt i bunnen av magasinet, men må heves noe.

I teorien vil dette tiltaket kunne bidra til en økt ΔT , og dermed bedre utnyttelsen av lageret for en kort periode når varmt regnvann må tilføres tanken. Hvor mye det vil utgjøre i praksis er derimot svært usikkert. I henhold til rapporten fra SINTEF Byggforsk er temperatursjiktningen best i høye og smale tanker (Andresen 2008). Tanker med større areal gir større overflateareal til varmeveksling mellom det varme og det kalde vannet i tanken, og dermed mindre tydelige temperatursjikt. Fordrøyningsmagasinet som skal utnyttes til akkumulering vil utvilsomt ha et større volum og areal enn en normal akkumulertank. Hvor stort arealet vil bli avhenger av hvor stort volum som er nødvendig for akkumulering, antall tanker vannvolumet skal fordeles på og den tilgjengelige plassen til tanken. En annen viktig faktor som skiller akkumuleringen ved dette konseptet fra normale sjiktede akkumulertanker er temperaturdifferansen mellom det varme tilførte vannet og det kalde nedkjølte vannet i bunnen. Den største temperaturdifferansen som antas å kunne oppstå i fordrøyningsmagasinet vil være ved tilført regnvann på ca. 20°C en varm sommerdag der vannet i tanken har blitt nedkjølt til ca. 4°C. Hvorvidt denne temperaturdifferansen er tilstrekkelig for å oppnå temperatursjiktning i en stor akkumuleringstank er usikkert.

8.2.3 Frikjølingspotensial

I vurderingen av hvor mye kjøleanlegget i bygget kan neddimensjoneres vil en avgjørende faktor være i hvor stor grad frikjøling vil bidra til å dekke byggets og lagertankens kjølebehov. Det potensielle effektuttaket fra energibrønner avhenger som vist av berggrunnens varmeledningsevne og temperatur. Som Norges geologiske undersøkelse (NGU) ved Reitan angir ligger temperaturen i berggrunnen dypere enn 20 meter under overflaten normalt rundt årsmiddeltemperaturen, som for Blindern målestasjon i Oslo ligger på 5,7°C (Reitan 2015). Dette gjelder for normal, urørt, berggrunn. For en energibrønnpark vil temperaturen påvirkes av varmeuttak og varmetilførsel fra vannet som sirkulerer i brønnene. I følge en rapport publisert av SINTEF i 2004 vil brønntemperaturen i løpet av et år kunne variere mellom 5°C og 20°C (Stene 2004). I praksis vil hverken varmeledningsevnen til fjellet eller temperaturen i berggrunnen være konstant over døgnet eller året, dermed vil heller ikke effektuttaket fra brønnparken som avhenger av disse være konstant. I rapporten trekkes det frem at perioder med stor varmetilførsel (frikjøling) vil øke temperaturen i brønnparken (Stene 2004). En økt brønntemperatur vil øke temperaturen på returvannet slik at den oppnådde temperaturdifferansen (ΔT) mellom vannet som føres ned og vannet som pumpes opp fra brønnene vil avta i løpet frikjølingsperioden.

For bygg med stort oppvarmingsbehov er det vanlig å tilføre brønnparken overskuddsvarme fra ulike kilder, som for eksempel avtrekksluft etter varmegjenvinneren i ventilasjonssystemet. Dette gjøres med den hensikt å kompensere for et stort varmeuttak ved å ”lade” opp brønnparken. For å oppnå størst mulig grad av frikjøling må temperaturen i berggrunnen holdes så lav som mulig. I henhold til rapporten vil et tiltak som kan gjøres for å øke potensialet for frikjøling være å kvitte seg med denne overskuddsvarmen f.eks. ved bruk av tørrkjølere (Stene 2004). Unødvendig oppvarming av brønnene bør unngås.

I tillegg til brønntemperaturen vil berggrunnens varmeledningsevne være avgjørende for effektoverføringen. I følge NGU varierer varmeledningsevnen normalt mellom 2 W/mK og 4,5 W/mK, men kan bli opp mot 6 W/mK dersom kvartsinnholdet i berggrunnen er stort (NGU 2016). NGUs rapport som kartlegger energipotensialet i berggrunnen i Bærum kommune har målt bergartsprøver fra Akershus og funnet en variasjon i varmeledningsevnen på mellom 2,1 W/mK og 3,7 W/mK (Midttømme et al. 2000). Beregningene for eksempelbrønnparken viste, under de gitte forutsetningene, en gjennomsnittlig varmeledningsevne på 4,94 W/mK for parken over sommeren i 2013. Analyse av eksempelbrønnparken ble gjort for å skape et bedre grunnlag for å kunne si noe om hvilket effektuttak som kan forventes fra casebrønnparken. Til tross for at eksempelbrønnparken og den planlagte casebrønnparken er lokalisert i samme landsdel er det ikke dermed gitt at berggrunnens egenskaper er de samme for disse stedene. NGUs rapporter som kartlegger varmeledningsevnen i henholdsvis Bærum kommune og Hedmark fylke viser store variasjoner innenfor begrensede geografiske områder. Uten videre undersøkelser kan det ikke fastslås hvorvidt varmeledningsevnen og det potensielle effektuttaket til casebrønnparken vil bli sammenlignet med det oppnådde effektuttaket til eksempelbrønnparken.

Forutsatt en temperaturdifferanse (ΔT) på mellom tre og seks grader viser de presenterte resultatene et varierende effektuttak på mellom 54 kW og 324 kW for den planlagte brønnparken tilknyttet casebygget. Resultatet viser et stort sprik mellom det høyeste og det laveste effektuttaket som kan forventes fra frikjølingen. I disse beregningene er den største verdien brukt for varmeledningsevne lik 6 W/mK. En verdi som i følge NGU ligger godt over normalen, men som kan forekomme ved høyt kvartsinnhold. På bakgrunn av at det ikke er gjort noen geologiske undersøkelser for det aktuelle området vet man ikke noe om berggrunnens kvartsinnhold og bør derfor legge til grunn en forventet varmeledningsevne nærmere normalen. I presentasjonen av caseprosjektet oppgir det en antatt gjennomsnittlig varmeledningsevne på 2,8 W/mK, en verdi som er tilnærmet lik gjennomsnittet av de målte verdiene i Bærum kommune (2,9 W/mK). Legges de målte verdiene for varmeledningsevnen til berggrunnen i Bærum kommune til grunn vil effektuttaket kunne variere mellom 54 kW og 200 kW, forutsatt en temperaturdifferanse på mellom tre og seks grader, og 9 000 brønnmeter. Forutsatt den antatte varmeledningsevnen på 2,8 W/mK vil effektuttaket variere mellom 76 kW og 151 kW for casebrønnparken, for en varierende ΔT på mellom tre og seks grader.

Som en konsekvens av at den beregnede nødvendige energimengden til akkumulering ble større enn antatt må temperaturen på vannet i tanken kjøles ned til et lavere nivå enn først antatt, for å begrense størrelsen på tanken til hva som er hensiktsmessig i praksis. Når temperaturen på vannet i tanken er kjølt så lavt at den er tilnærmet lik returtemperaturen fra brønnparken (minimum ca. 8°C) vil ikke tanken kunne kjøles ytterligere ved hjelp av frikjøling, og kjølemaskinene må ta over. Kravet om en temperatur ned mot 4°C begrenser mulighetene for frikjøling av akkumuleringstanken.

I vurderingen av hvor stor del av kjølebehovet til akkumuleringstanken som kan dekkes av frikjøling må det tas med i betraktningene at kontorbygget vil ha et kjølebehov om natten også. For casebygget er det eksempelvis planlagt et serverrom som vil ha et antatt døgnkontinuerlig kjølebehov på ca. 50 kW. Dimensjoneringen av kjøleanlegget er avhengig av i hvilken grad frikjøling bidrar med å dekke kjølebehovet. Denne oppgavens beregninger og funn lagt til grunn viser at det vil være reelt å forvente et gjennomsnittlig effektuttak på ca. 100 kW, men at det er knyttet usikkerhet til hvordan effektuttaket varierer utover i kjøleperioden grunnet økt temperatur i brønnparken. Tatt i betraktning at bygget vil ha et kjølebehov på ca. 50 kW utenfor driftstid vil de resterende ca. 50 kW være bidraget til kjøling av akkumuleringstanken. For å øke frikjølingspotensialet kan det være et alternativ å øke antallet energibrønner. Her må det gjøres en avveining mellom gevinsten av den økte frikjølingseffekten og kostnaden ved å utvide brønnparken.

8.2.4 Vurdering av konseptet for et normaldøgn

Det største effektbehovet til bygget vil være dimensjonerende for kjøleanlegget og akkumuleringstanken, og dermed danne grunnlaget for lønnsomhetsberegningene. De største effekttoppene forekommer kun noen få dager i året, resultatene fra årssimuleringen av casebygget viser at effektbehovet for eksempel kun overstiger 1 000 kW tre dager i året. På bakgrunn av det kan det være interessant å vurdere virkningen av konseptet for et mer gjennomsnittlig døgn i kjøleperioden.

Resultatet fra årssimuleringen viser at fra kjøleperiodens start i mai til midten av juli ligger de største effektuttakene jevnt rundt ca. 400 kW. Med utgangspunkt i det simulerte effektbehovet til casebygget i juni kan det observeres et gjennomsnittlig effektuttak på 108 kW hele måneden sett under ett. Det største effektuttaket i juni er i henhold til simuleringene på 463 kW. Timesmålingene for dette maksimaldøgnet viser et gjennomsnitt på 143 kW. Med bruk av de samme beregningsmetodene som tidligere resulterer det i en nødvendig energimengde til akkumulering på 1 129 kWh for å jevne døgnvariasjonen helt ned til gjennomsnittsverdien. En effektutjevning som tilsvarer en reduksjon på om lag 70 %. Med det tilgjengelige vannvolumet på 122 m³ vil dette kreve en nedkjøling til 6°C om natten. Gitt disse forutsetningene kan det observeres at selv for en stor effektreduksjon har ikke vannet i akkumuleringstanken behov for å kjøles lenger ned enn 6°C for et normaldøgn. For et døgn med så liten variasjon i effektbehov vil bygget også ha et lavere kjølebehov om natten. Redusert behov for nedkjøling av tanken samt redusert kjølebehov i bygget om natten gjør at frikjøling vil kunne bidra i større grad for disse normaldøgnene.

Tatt gjennomsnittet på 108 kW for juni, og forutsatt effektbehov om natten på 40- 50 kW, i betraktning vil lageret i stor grad kunne kjøles ved hjelp av frikjøling. Når effektbehovet stiger på formiddagen vil det fortrinnsvis dekkes av frikjøling mot brønnparken, når behovet overstiger det potensielle effektuttaket fra brønnene tas lageret i bruk. For disse døgnene er det rimelig å anta at frikjøling i kombinasjon med lagertanken(e) vil kunne dekke en svært stor del, muligens hele, kjølebehovet til casebygget.

8.2.5 Praktiske utfordringer

➤ **Oppdimensjonering og plassbegrensning**

Dersom både ønsket om å ha en bestemt vannmengde i akkumuleringstanken til enhver tid og ønsket om å kunne ha tilgjengelig kapasitet til fordrøyning når ekstremværet inntreffer skal oppnås, må fordrøyningsanlegget oppdimensjoneres. Det må tas stilling til hvor mye det er nødvendig samt hensiktsmessig å oppdimensjonere det beregnede fordrøyningsvolumet. Her må balansen mellom nødvendig vannmengde som skal holdes igjen i tanken og nødvendig tilgjengelig kapasitet optimaliseres. Oppdimensjoneringen bør holdes til et minimum med tanke på både kostnader og plassbegrensning, et godt system for styring og regulering kan bidra til det.

For å avgjøre hvilket volum det totale fordrøyningsanlegget skal ha bør det utføres en risikoanalyse. Konsekvensen av en underdimensjonering av fordrøyningsmagasinet vil være at magasinet ikke har kapasitet til å ta imot regnvannet som kommer og dette overvannet må håndteres på andre måter for å unngå flom. Dersom overvann og avrenning ikke håndteres på en god måte kan det oppstå skadevirkninger på byggverk, helse og miljø. I NOUs rapport ”Overvann i byer og tettsteder” fra 2015 anslår utvalget at de totale skadekostnadene som skyldes overvann i Norge er i størrelsesorden 1,6 til 3,6 milliarder kroner hvert år. Dersom utviklingen av skadekostnader følger samme trend i tiden framover vil skadene, uten forebyggende tiltak, medføre kostnader i størrelsesorden 45 til 100 milliarder i løpet av de neste 40 årene (NOU 2015). Den maksimale tillatte påslippsmengden til det offentlige ledningsnettets kan ikke overstiges. Forutsatt ingen mulighet for infiltrasjon på tomten, som for caseprosjektet, gjør det at tømning av fordrøyningsmagasinet ikke kan gjøres raskere enn det er dimensjonert for, selv ved ekstremvær.

I henhold til treleddsstrategien for overvannshåndtering utredet i NOUs rapport er forsinket avrenning gjennom fordrøyning ledd nummer to i den strategiske prosessen (NOU 2015). Med andre ord er dimensjonering av fordrøyningsmagasin kun et ledd i en prosess som inkluderer flere tiltak som vil være avgjørende for overvannshåndteringen på tomten. Hele det aktuelle nedbørsfeltet må kartlegges og flere faktorer må tas i betraktning ved valg av den mest hensiktsmessige løsningen for overvannshåndtering for hele tomten sett under ett. For det regnutsatte arealet på tomten tilknyttet casebygget er det som nevnt ingen mulighet for infiltrasjon slik at det første steget i overvannsstrategien blir sett bort fra.

Nødvendig fordrøyningsvolum for regnutsatt areal dimensjoneres etter VA/Miljøblad nr. 69 der den mest brukte metoden er regnvelopmetoden med konstant utløp (VA/Miljø-blad69 2015). Denne metoden tar mange faktorer i betraktning og inkluderer sikkerhetsmarginer i flere av parameterne, blant annet ved bruk av klimafaktor og høye avrenningsfaktorer. Ved dimensjonering av fordrøyningsmagasin er det som nevnt hverken økonomisk hensiktsmessig eller praktisk mulig å sikre seg fullstendig mot overbelastning. For å begrense et potensielt skadeomfang ved ekstremvær bør fokus derfor rettes mot det tredje og siste steget i strategien; trygg avledning til resipient. Det regnutsatte arealet på tomten og områdene rundt må kartlegges og det må legges til rette for sikre flomveier som leder overvannet til områder der det kan utgjøre mindre skade (NOU 2015)

Resultatene for beregning av størrelsen til magasin 1 for caseprosjektet gir et volum på 242 m³, og beregnet nødvendig vannvolum til termisk lagring på 122 m³. Dersom hele akkumuleringsvolumet skal legges til fordrøyningsvolumet vil det kreve en relativt stor oppdimensjonering av fordrøyningsanlegget, noe som vil medføre store kostnader og kan skape plassproblemer. Det beregnede nødvendige fordrøyningsvolumet på 242 m³ er, sammen med de andre nevnte tiltakene (sedumtak, regnbed og utvendige renner), dimensjonert for å håndtere alt overvannet på casetomten. Konseptet baserer seg på at tanken(e) som skal benyttes til akkumulering også skal kunne benyttes til fordrøynning, i de største nedbørsperiodene. En fullstendig oppdimensjonering der hele akkumuleringsvolumet legges til fordrøyningsvolumet vil dermed være unødvendig.

Grunnet lite erfaring med optimalisering av dimensjoneringsmetoder, det potensielt store skadeomfanget ved underdimensjonering samt usikkerhet knyttet til fremtidige klimaendringer foreligger det en risiko som må tas hensyn til ved en minimering av størrelsen til fordrøyningsmagasinet. Tatt i betraktning sikkerhetsmarginene inkludert i beregningsmetoden og forutsetningen om akkumuleringstankenes fordrøyningskapasitet vil det ikke være nødvendig med en fullstendig oppdimensjonering av anlegget. I hvert enkelt tilfelle bør det utføres en utredning av hele det aktuelle nedbørsområdet sett under ett med fokus på mulighetene for sikre flomveier og egnede resipienter for mottakelse av overskuddsvann. Dersom det er gode muligheter for avledning til egnede resipienter på tomten til casebygget kan en mulig mindre oppdimensjonering av anlegget forsvares.

➤ **Drift og vedlikehold**

Det kommer fram av rapporten "Veileder for lokal overvannshåndtering" publisert av COWI i 2013 at overvann i urbane områder kan tilføres en rekke ulike forurensninger som partikler, næringsalter, miljøgifter og veisalt (Åstebøl et al. 2013). De forurensende stoffene kommer fra ulike kilder, men forekommer i stor grad som et resultat av infrastruktur i nærområdet. Forurensningsmengden i overvannet som føres til fordrøyningsmagasinet vil i henhold til rapporten være avhengig av andelen tette flater i nedbørsområdet, som bestemmes av blant annet befolkningstetthet og trafikkmengde. I rapporten sammenlignes forurensningsgraden i overvann fra tak med overvann fra en høytrafikkert vei. I denne sammenligningen betraktes takvann som tilnærmet rent, mens veivann har høyere forurensning ved høyere trafikk tetthet (Åstebøl et al. 2013).

Når det kommer til drift og vedlikehold av et kombinert fordrøynings- og akkumuleringssystem er det tilknyttet enkelte usikkerheter grunnet lite erfaring med denne typen bruk av regnvann. For caseprosjektet består 48 % av det regnutsatte arealet av tak, i dette tilfellet vil akkumuleringstanken(e) kunne få tilførsel av en tilfredsstillende vannmengde ved kun å benytte seg av takvann. I henhold til COWIs veileder for lokal overvannshåndtering vil takvannet være så rent at det vil være rimelig å anta at det ikke vil skape større problemer for systemet. I følge VA/Miljøblad nr. 104 vil regnvann videreført fra takflater kunne inneholde blader og kvister, noe som kan by på tilstopningsproblemer. Blader, kvister og andre liknende objekter øker tilstopningsrisikoen i mengderegulatoren, spesielt ved små

strømningstverrsnitt. For økt driftssikkerhet og redusert tilstopningsrisiko anbefales montering av en sil eller liknende ved takrennens nedløp (VA/Miljø-blad104 2012).

For å redusere usikkerhet knyttet til denne innovative metoden for bruk av regnvann anbefaler produktsjef i Basal Sogge Johnsen at akkumuleringstanken utstyres med et forbehandlingskammer, slik at hovedvekten av alt uønsket avfall samles opp og holdes igjen i dette kammeret (Johnsen 2017). Konseptet baserer seg på en forutsetning om at byggene dette er aktuelt for uansett skal ta i bruk fordrøyningsmagasin til håndtering av overvann på tomten. Det innebærer vedlikeholdstiltak som inspeksjon av tanker og kummer samt tømning og rengjøring av sandfang og slamlommer. Inspeksjon av tanker og tømning/rengjøring av forbehandlingskammer, sandfang og slamlommer må gjøres regelmessig for hele fordrøyningsanlegget. For caseprosjektet vil innføringen av konseptet innebære et tillegg på en eller to tanker til det eksisterende fordrøyningsanlegget. Det ekstra vedlikeholdet det vil medføre antas å være minimalt.

8.2.6 Økonomiske betraktninger

For caseprosjektet vurderes lønnsomheten ved innføring av konseptet for neddimensjonering av kjøleanlegget med henholdsvis 20 %, 30 %, 40 %, 50 % og en neddimensjonering helt ned til 415 kW. Resultat av de økonomiske beregningene viser at under de gitte forutsetningene vil en innføring av konseptet, for caseprosjektet, være lønnsomt for alle de vurderte alternativene. Resultatet viser at en innføring av konseptet vil kunne utgjøre en besparelse på 439 058 kr ved en neddimensjonering av kjøleanlegget for caseprosjektet til det målsatte nivået på 30 %.

Resultatene av de økonomiske beregningene viser at konseptets totale lønnsomhet hovedsakelig avhenger av tre faktorer: størrelsen på neddimensjoneringen av kjøleanlegget, størrelsen på oppdimensjoneringen av fordrøyningsmagasinet og størrelsen på merkostnadene ved systemendringen.

➤ **Potensiell besparelse ved redusert installert effekt**

Forutsatt at kostnaden på 4 000 kr/kW for installert effekt er reell vil størrelsen på neddimensjoneringen av kjøleanlegget være den faktoren som har den desidert største påvirkningen på den totale lønnsomheten til konseptet. Installert effekt vil i disse lønnsomhetsbetraktningene være en svært sensitiv parameter, relativt små endringer vil gi store utslag. Drifts- og vedlikeholdskostnader er oppgitt til 3- 5 % av investeringskostnaden for kjøleanlegg. Tatt i betraktning at denne kostnadsposten er avhengig av den avgjørende investeringskostnaden vil prosentandelen som legges til grunn kunne bli utslagsgivende i lønnsomhetsberegningene. Med det tatt i betraktning er den laveste prosentandelen (3 %), lagt til grunn for beregningene i denne oppgaven.

➤ **Kostnad ved oppdimensjonering av fordrøyningsmagasin**

Forutsatt en kostnad på 3 000 kr/m³ vil størrelsen på oppdimensjoneringen av fordrøyningsmagasinet også kunne bli en utslagsgivende faktor for den totale lønnsomheten. De presenterte resultatene som inkluderer alle de økonomiske betraktningene forutsetter en

fullstendig oppdimensjonering der hele akkumuleringsvolumet legges til fordrøyningsvolumet. Som diskutert ovenfor bør flere analyser og risikovurderinger legges til grunn for å bestemme den mest hensiktsmessige størrelsen på det totale fordrøyningsanlegget. En fullstendig oppdimensjonering vil under de gitte forutsetningene være unødvendig. En mindre oppdimensjonering vil redusere kostandene til konseptet betraktelig. Eksempelvis vil en oppdimensjonering på 100 m³ istedenfor 122 m³ redusere denne kostnadsposten med 67 200 kr. Vurderes en oppdimensjonering på 80 m³ til å være tilstrekkelig kan kostnaden reduseres med hele 127 200 kr.

➤ **Merkostnader ved systemendring**

I anslaget som er gjort for merkostnadene for konseptet er det tatt utgangspunkt i innføring av konseptet for caseprosjektet. Enkelte av kostnadspostene vil som nevnt variere for andre prosjekter. Mengden isolasjon som kreves vil være avhengig av størrelsen på tanken(e) som skal benyttes til akkumulering. Denne kostnadsposten vil være irrelevant i tilfeller der magasinet skal graves ned under bakkenivå og dermed ikke ha isoleringsbehov. Antall motorventiler til inn- og utløp vil være avhengig av antallet tanker som skal benyttes i fordrøyningsystemet, som vil variere med størrelsen på fordrøyningsanlegget til prosjektet. Nødvendig økning av rørnett ved innføring av konseptet skyldes hovedsakelig ønsket om å skille ut takvannet og lede det til akkumuleringstanken(e), noe som er en prosess som normalt ikke gjøres i et fordrøyningsanlegg og utgjør derfor en merkostnad. Kostnadene som påløper som følge av en økning av rørnett vil være avhengig av hvor mange ekstra rørmeter som er nødvendig, noe som vil være avhengig av avstandene på tomten.

Det vil alltid være knyttet noe usikkerhet rundt kostnader for et nytt og uprøvd konsept. Dette konseptet baserer seg hovedsakelig på en kombinasjon av kjente løsninger som kun tar i bruk kjente og velprøvde komponenter. De oppgitte erfaringskostnadene samarbeidsbedriften har for disse komponentene er det derfor rimelig å anta at er reelle. Ved innføringen av et nytt konsept bør det alltid tas høyde for at uforutsette ting kan oppstå, noe som kan medføre økte kostnader. For caseprosjektet tas dette hensyn til med et påslag på 15 % på de beregnede merkostnadene. Hvorvidt dette er tilstrekkelig er det vanskelig å si noe om uten å teste ut konseptet. I beregningene av merkostnadene ved innføring av konseptet for caseprosjektet er det ikke tatt hensyn til en eventuell økning av vedlikeholdskostnader. Dette begrunnes i antakelsen om at konseptet ikke vil medføre vesentlige endringer i vedlikeholdsrutinene som uansett må utføres og kostnader tilknyttet dette vil være irrelevante for konseptvurderingen.

➤ **Effektkostnad**

Resultatene viser at de potensielle besparelse knyttet til den direkte effektbetalingen, slik avregningssystemet er i dag, er svært liten. Prisen på det variable effektleddet er lav for sommermånedene da kjøleeffekttoppene inntreffer (Hafslund 2017). Selv med en betydelig effektutjevning vil ikke disse besparelsene være utslagsgivende i vurderingen av konseptets totale lønnsomhet. Den igangsatte implementeringen av AMS vil i henhold til opplysning fra Enova medføre nye avregningsmetoder med økt fokus på betaling for effekt. Med timesmålinger som verktøy og med den hensikt å redusere toppbelastningen på strømmettet ved å innføre et nytt betalingssystem, vil det etter all sannsynlighet gjøre besparelsene ved

effektutjevning større i framtiden. Prisen på effekt vil etter all sannsynlighet fremdeles være lavest om sommeren og det er vanskelig å forutsi hvor stor påvirkning et nytt betalingssystem vil utgjøre for den totale lønnsomheten ved effektutjevning for dette konseptet.

8.2.7 Forslag til videre arbeid

I tillegg til nevnte analyser og tester som bør gjennomføres for å redusere usikkerheter knyttet til det uprøvde konseptet, kan muligheten for faseforandring i energilageret vurderes ved videre arbeid. Som Rosvold og Hofstad trekker fram i sin artikkel er energitetthet, eller mengden termisk energi per volumenhet, en av de viktigste egenskapene til et energilager (Rosvold & Hofstad 2013). Ved faseforandring vil man få muligheten til en vesentlig økning i lagringskapasitet, per volumenhet. I henhold til rapporten ”Hensiktsmessige varme- og kjøleløsninger i bygninger” utarbeidet av Stene og Smedegård for COWI i 2013 finnes det mange typer termiske kjølelager hvor bruk av faseendingsmateriale (PCM) tas i bruk. PCM-elementer kan kjøles ned i løpet av natten og fryses ved f.eks. 10°C. På dagtid absorberes varme og elementene smelter og avgir kjøling når behovet nærmer seg effekttoppen på dagtid (Stene & Smedegård 2013). Ønsket om økt lagringskapasitet i et begrenset volum gjør prinsippet om faseforandring interessant for dette konseptet. Ytterligere utredninger knyttet til hvordan det skal løses i praksis samt økonomiske betraktninger må utføres før dette kan vurderes som et mulig tiltak.

8.3 Overdimensjonerte kjøleanlegg

I henhold til rapporten av Stene og Smedegård vil skjerpede fremtidige energikrav føre til kortere ekvivalent driftstid for klimakjøling i nye kontorbygg. Dette vil øke dellastproblematikken som mange kjøleanlegg har i dag. Denne utviklingen gjør at det må legges vekt på å utforme kjølesystemet slik at det kan dekke nødvendig kjølebehov med høy effektfaktor (COP) i så stor del av driftsområdet som mulig (Stene & Smedegård 2013). Et alternativ for å løse dette problemet kan være å dimensjonere kjølemaskinene kun for dekning av grunnlasten og ta i bruk et termisk kjølelager for spisslastdekning. Konseptet analysert i denne oppgaven bygger på en hypotese om sterkt overdimensjonerte kjøleanlegg i kontorbygg, og som konsekvens av det et stort potensial for økonomiske besparelser. Energilagring ved bruk av fordrøyningsmagasin har til hensikt å muliggjøre neddimensjonering og dermed bedre utnyttelse av kjøleanlegget.

I rapporten ”Kartlegging av mekanisk kjøling i nye kontor- og forretningsbygg” publisert av SINTEF i 2001 er det oppgitt at gjennomsnittlig installert effekt for kjøling av kontorbygg ligger på mellom 30- 100 W/m² (Thyholt & Dokka 2001). Den installerte effekten for eksempelbyggene er på henholdsvis 62 W/m² for Nydalsveien 12 og 71 W/m² for Gjerdrumsvei 4, og ligger dermed godt innenfor den oppgitte normalen. Analysene av data fra byggenes EOS-logger viser at begge byggene hadde et faktisk forbruk på om lag 32 W/m². Nøyaktigheten rundt de analyserte dataene fra EOS-loggene bør verifiseres. Til tross for at dataene kan være noe unøyaktige er differansen i disse tilfellene så stor at det kan sies med sikkerhet at kjøleanleggene i disse to eksempelbyggene er overdimensjonerte.

Hovedårsaken til overdimensjonerte kjøleanlegg er de store sikkerhetsmarginene som legges på grunnet utilstrekkelig data og informasjon til å anslå byggets faktiske effektbehov med større nøyaktighet. Spesielt når det skal utføres energieffektiviseringstiltak på eksisterende bygg er ofte den tilgjengelige informasjonen om bygget utilstrekkelig, og som en konsekvens av det legges det til grunn store sikkerhetsmarginer. I følge rapporten utarbeidet av Erichsen og Horgen på oppdrag fra Statsbygg, "Kjøling i bygg" fra 2011, er det mangelfull og overfladisk håndtering av store interne varmetilskudd som er hovedårsaken til avvik mellom teoretisk beregnet og faktisk forbruk av energi til kjøling (Ørnes 2011). I dag benyttes standardverdiene fra NS 3031:2014 for å dokumentere bygningers energiytelse opp mot myndighetskrav. I henhold til rapporten er grunnlaget for fastsettelse av de standardiserte inndataene for internlastene brukt i NS3031:2014 relativt tynt. Standardverdiene er satt på grunnlag av for lite reelle erfaringsdata og tar ikke hensyn til variasjoner innad i bygningskategorien (Ørnes 2011). Standardene er basert på W/m^2 og tar dermed ikke hensyn til at rom innad i samme bygningskategori kan ha svært ulike bruksområder og belastning fra interne varmetilskudd. Som analysene av de to byggene i Erichsen og Horgens rapport viser utgjør dette spesielt store avvik der det er satt av egne rom til IT og IKT systemer. I henhold til NS3031:2014 legges arealet til disse rommene sammen med arealet for byggets øvrige rom og det benyttes en felles standardverdi for effekt til utstyr og driftstid. Det er ingen tvil om at utelatelse av den normalt store varmelasten utstyret i et serverrom tilfører vil medføre store avvik mellom teoretisk beregnet og faktisk kjølebehov.

Som det framkommer av rapporten og i NS 3031:2014 er standardverdiene kategorisert etter bygningstype og er gjeldene for alle bygg innenfor samme bygningskategori (standard.no 2014). Kjølebehovet for kontorbygg vil i praksis ikke være likt for alle bygg. Beregninger etter standardene vil gi et generalisert og mer gjennomsnittlig resultat som vil kunne avvike fra det faktiske spesifikke forbruket til bygget. Til beregning av kjølebehov i nye bygg finnes det ulike digitale verktøy som kan tas i bruk. Simuleringsprogrammer er i stadig utvikling og får stadig flere funksjoner og økt detaljgrad. Ved å utføre simuleringer vil mer detaljert informasjon om byggets spesifikke behov kunne framskaffes. Økt detaljinformasjon og kunnskap om bygget vil redusere behovet for tillagte sikkerhetsmarginer og muliggjøre en mer optimal dimensjonering av byggets kjøleanlegg.

Resultat av simuleringene av effektbehovet til casebygg viser et maksimalt effektuttak på 1 100 kW, fordelt på byggets oppvarmede areal (BRA) på 27 600 m^2 tilsvarer det et spesifikt effektbehov på om lag 41 W/m^2 . Kun basert på sammenligning med effektbehovet per kvadratmeter for eksempelbyggene, på 32 W/m^2 , ser dette ut til å kunne være et realistisk resultat. Eksempelbyggene er som nevnt valgt ut blant annet fordi de er bygget etter dagens standarder for energikrav. I henhold til erfaringer gjort av samarbeidsbedriften kan kjølebehov per kvadratmeter (spesifikt kjølebehov) for bygg av ulike størrelser sammenlignes dersom de er bygget etter samme standarder (Olsen 2017). Det som derimot kan være utslagsgivende for en slik sammenligning er variabel solbelastning, byggets orientering og solavskjerming (Olsen 2017). Disse faktorene kan ha stor innvirkning på det enkelte byggets kjølebehov og må vurderes ved en slik sammenligning.

8.4 Metodisk tilnærming

8.4.1 Innsamling av kvantitative data

For å nå de kvantitative og de kvalitative målene i denne oppgaven ble ulike metoder tatt i bruk. Kvantitative data brukt i analysene ble hentet fra EOS-loggene til to ulike kontorbygg og en energibrønnpark. Tilgang til EOS, opplysninger om de valgte byggene og driften av byggene for de analyserte periodene ble gitt av eiendomsforvalteren. Eksempelbyggene ble plukket ut på bakgrunn av at de ansees for å være gjennomsnittlige kontorbygg med normal drift for bygg i denne kategorien. Dette var ønskelig for på best mulig måte å kunne underbygge hypotesen om overdimensjonerte kjøleanlegg i kontorbygg, og for å kunne sammenligne byggene med casebygget. Tallene hentet og analysert fra energioppfølgingssystemet er ikke verifiserte i forbindelse med arbeidet med denne masteroppgaven. Dataene fra systemet har blitt overvåket og kontrollert daglig siden den tilknyttede energisentralen ble tatt i bruk (i 2013), og ingenting tyder på feil ved systemet eller de målte verdiene.

Eksempelbyggene ble valgt ut blant annet fordi de er bygget etter dagens standarder for energikrav. I henhold til erfaringer gjort av samarbeidsbedriften kan kjølebehov per kvadratmeter for bygg av ulike størrelser sammenlignes dersom de er bygget etter samme standarder. Noe som derimot kan være utslagsgivende for en slik sammenligning er byggets orientering, den variable solbelastningen det kan medføre og hvordan solavskjermingen håndteres (Olsen 2017). Disse faktorene kan ha stor innvirkning på det enkelte byggets kjølebehov og må vurderes ved en slik sammenligning. For å få et bedre vurderingsgrunnlag kunne det vært gjort analyser av flere bygg. Casebygget planlegges til ca. 27 600 m², noe som er vesentlig større enn de to analyserte eksempelbyggene. For et bedre datagrunnlag kunne det vært gjort analyser av data for bygg i ulike størrelser for å se om byggets størrelse har påvirkning på graden av overdimensjonering. Analyse av flere og større bygg ble ikke gjort grunnet tidsbegrensning samt begrenset tilgang på data.

Det er begrenset med erfaringer og erfaringsdata knyttet til frikjølingspotensial mot energibrønner. Til tross for at den analyserte eksempelbrønnparken er lokalisert i samme geografiske område som den planlagte brønnparken til caseprosjektet vil det ikke dermed si at varmeledningsevnen i berggrunnen er den samme. Det skulle vise seg at berggrunnens egenskaper kan ha store variasjoner innenfor relativt små områder. På bakgrunn av dette funnet og at ingen geologiske forundersøkelser er gjennomført for det aktuelle geografiske området ble ikke resultatene fra eksempelbrønnparken brukt som vurderingsgrunnlag for frikjølingspotensialet til casebrønnparken. Ytterligere forundersøkelser, eksempelvis en termisk responstest, bør gjennomføres for et mer nøyaktig estimat på potensielt effektuttak for casebrønnparken.

Innsamling av tallene for priser og kostnader som ligger til grunn for de økonomiske betraktningene er gjort etter samtale med ulike fagpersoner. Kostnadsestimatet rådgiveren oppga for anleggelse av fordrøyningsmagasin var i samsvar med kostnaden leverandøren av fordrøyningsmagasin oppga. Samarbeidsbedriften har bistått med erfaringstall for

investeringskostnad for kjøleanlegg og merkostnadene tilknyttet innføringen av konseptet. Med mer tilgjengelig tid kunne kostnadsinformasjon vært innhentet fra flere informanter for å kunne gjøre et sikrere anslag.

8.4.2 Innsamling av kvalitative data

For å redusere uforutsigbarhet og risiko ved innføring av innovative og uprøvde konsepter bør potensielle utfordringer og svakheter kartlegges på forhånd. Et mål med dette mulighetsstudie er å belyse hvilke utfordringer konseptet står ovenfor slik at uforutsigbarhet og usikkerhet reduseres. Selve konseptidéen er nyskapende og det finnes ingen konkrete erfaringer med akkurat denne løsningen. For en best mulig kartlegging av fremtidige utfordringer med konseptet ble informasjon innhentet fra fagpersoner innen ulike fagområder. Konseptidéen er basert på en kombinasjon av kjente teknologier og løsninger. Lukkede fordryningsmagasin til overvannshåndtering, termisk lagring i vann og kjøling av bygg er alle fagområder der det finnes mye kunnskap og erfaring. Utvelgelse av de utfordringene som vurderes i oppgaven ble gjort etter innspill fra leverandør av fordryningsmagasin, rådgiver innen vann og avløp og fra samarbeidsbedriften.

Det er på best mulig måte forsøkt å avdekke samt vurdere de største praktiske utfordringene konseptet vil møte. Til tross for dette bør det tas i betraktning at en test av systemet vil kunne avdekke uforutsette problemer og bør derfor gjennomføres før man eventuelt tar konseptet til neste fase.

8.4.3 Simuleringer

Grunnet forenklingene som har blitt gjort er modellen som benyttes i simuleringene er en relativt standardisert modell. Grunnet mangel på detaljinformasjon om bygningskroppen og bruksområde for de ulike sonene i bygget har standardverdier blitt benyttet ved behov. Denne bruken av standardverdier gjør at modellen er mer generalisert og mindre spesifikk for casebygget enn det som optimalt vil være ønskelig for energisimuleringene. For mer nøyaktige beregninger av kjølebehovet til casebygget ville det vært nødvendig med ytterligere informasjon om rominndeling og funksjonsområder for de ulike sonene i bygget. Eksempelvis hvordan de ca. 1550 arbeidsplassene i bygget skal fordeles på cellekontorer og større åpne rom med flere plasser. Brukertettheten og de ulike kontorløsningene vil kunne påvirke det interne varmetilskuddet. Brukstiden til alle de interne varmelastene i simuleringene er avhengig av de to tidsplanene for tilstedeværelse for hhv. kontor og kantineområde. Alle soner i bygget, med unntak av det avsatte kantineområde, følger den satte tidsplanen for tilstedeværelse i kontorområdene. I tillegg til den forenklingen antas det også i simuleringene at tilstedeværelsen i bygget er lik alle dager, mandag til fredag, hele året (med unntak av fridager). Dette er også en forenkling som vil være forskjellig fra virkeligheten. I tillegg til generaliseringer knyttet til de interne lastene kan også de nevnte forenklingene knyttet til planene under bakkenivå påvirke kjølebehovet.

Solbelastningen bygget utsettes for har også stor påvirkning på kjølebehovet. Byggets orientering og avstander til omkringliggende bygninger er lagt til i simuleringsmodellen etter beste evne, ved bruk av kart og avstandsmålinger. Denne metoden ble vurdert som den mest hensiktsmessige metoden tilgjengelig, men nøyaktigheten vil ikke være optimal.

I simuleringene er det heller ikke tatt hensyn til energitap knyttet til distribusjon av kjøleenergien. Denne forenklingen kan føre til at det reelle effektbehovet er noe større enn det resultatene av simuleringene viser.

9 Konklusjon

Resultatene i denne oppgaven viser at under de gitte forutsetningene vil neddimensjonering av kjøleanlegg i kontorbygg ved utnyttelse av fordrøyningsmagasin for regnvann til termisk akkumulering være praktisk mulig og lønnsomt. Videre anbefales det at flere analyser og testing av systemet gjennomføres for å redusere usikkerhetene rundt dette innovative konseptet.

Resultatet fra årssimuleringen av effektbehovet til casebygget viste en effekttopp på om lag 1 100 kW. Med den simulerte døgnvariasjonskurven for kjølebehovet dette maksimaldøgnet lagt til grunn ble den nødvendige lagringskapasiteten til det termiske lageret beregnet til ca. 1 421 kWh, for å nå caseprosjektets mål om en neddimensjonering av kjøleanlegget på 30 %. Forutsatt en nattkjøling av tanken ned til 4°C vil denne akkumuleringen kreve et vannvolum på ca. 122 m³.

Som konsekvens av det beregnede behovet for nedkjøling av tanken helt ned til 4°C begrenses muligheten for frikjøling mot energibrønnene. Under gitte forutsetninger viser resultatene i denne oppgaven at det er rimelig å forvente et effektuttak som vil variere mellom 76 kW og 151 kW fra energibrønnparken tilknyttet casebygget.

Resultatene av de økonomiske beregningene viser at konseptets totale lønnsomhet hovedsakelig avhenger av tre faktorer: størrelsen på neddimensjoneringen av kjøleanlegget, størrelsen på oppdimensjoneringen av fordrøyningsmagasinet og merkostnadene for systemendringen. Resultatet viser at en innføring av konseptet vil kunne utgjøre en besparelse på 439 058 kr ved en neddimensjonering av kjøleanlegget til det målsatte nivået på 30 %.

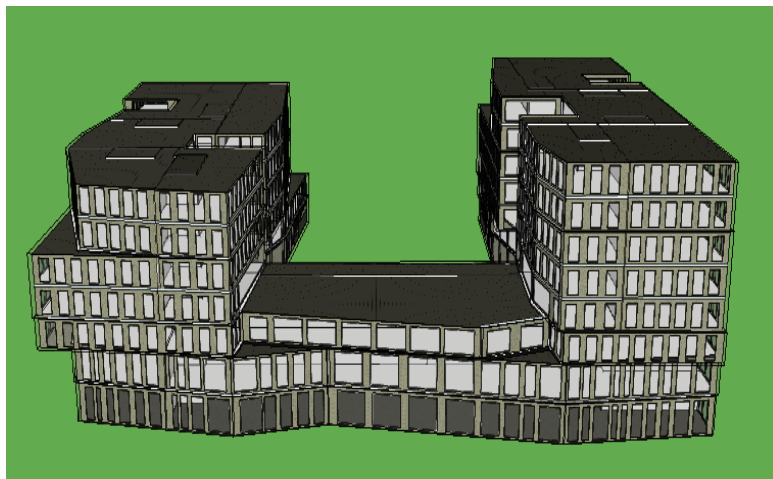
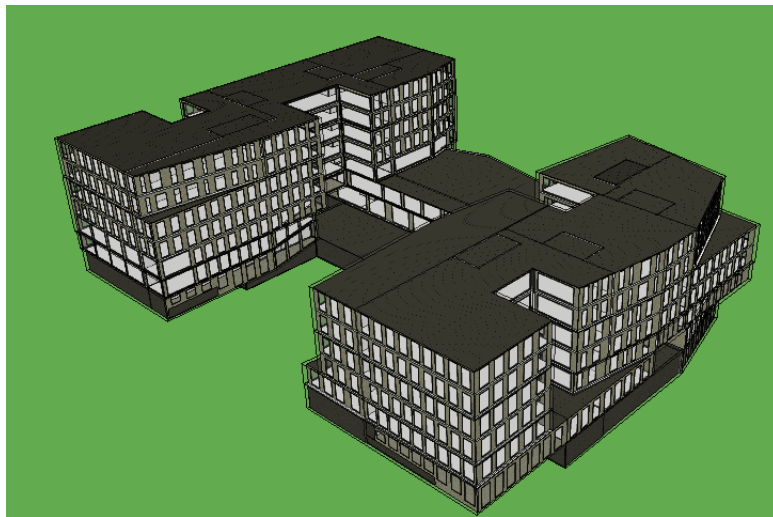
10 Referanser

- Andresen, I. (2008). Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon. 44 s.
- Åstebøl, S. O., Robba, S., Stenvik, G., Kristoffersen, H. V. & Olsen, S. B. (2013). På lag med regnet - Veileder for lokal overvannshåndtering. 60 s.
- BASAL. *Storm serien*. Tilgjengelig fra: <http://www.basal.no/produktlosninger/199/storm-serien> (lest 7. Februar 2017).
- BASAL. (2012). Produktkatalog. 100 s.
- BASAL. (2017). *Beregningsprogram for overvannshåndtering*. Tilgjengelig fra: <http://beregning.basal.no/overvannshandtering/view/index.php>.
- Berner, M. (2017). *Seniorrådgiver i ENOVA*. Pers. med.
- BKK. (2017). *Strømnettet*. Tilgjengelig fra: <https://www.bkk.no/nettleie> (lest 1. januar 2017).
- Braskerud, B. & Paus, K. (2013). Regnbed - Flomdemping i små urbane nedbørsfelt. 4 s.
- BREEAM-NOR. (2015). *Norges ledende verktøy for miljøklassifisering av bygg*. Tilgjengelig fra: <http://ngbc.no/breeam-nor/>.
- BREEAM-NOR. (2016). BREEAM-NOR for nybygg 2016. 349 s.
- eKlima. (2017). *Tilgang til Meteorologisk institutts vær- og klimadata fra historiske data til sanntidsobservasjoner*. Tilgjengelig fra: http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL.
- ENOVA. (2013). *Spørsmål og svar fra Enova*. Tilgjengelig fra: <http://www.bygg.no/article/52845>.
- fornybar.no. (2016). *Teknologier for lagring av energi*. Tilgjengelig fra: <http://www.fornybar.no/overforing-og-lagring-av-energi/lagring-av-energi/teknologier-for-lagring-av-energi-top>.
- Hafslund. (2017). *Priser på nettleie - bedrift*. Tilgjengelig fra: https://www.hafslundnett.no/priser/nettleiepriser_bedrift/15558 (lest 1. januar 2017).
- Hilmo, B. O., Kalskin, R. & midttømme, K. (2000). Grunnvarme som energikilde. NGU-Norges Geologiske Undersøkelse. 6 s.
- Johnsen, S. (2017). *Produktsjef Basal*. Pers. med
- MFT. (2017). *Mer om mengderegulering*. I: AS, M.-o. F. (red.). Tilgjengelig fra: <http://mft.no/mer-om-mengderegulering/> - mengdereg1.

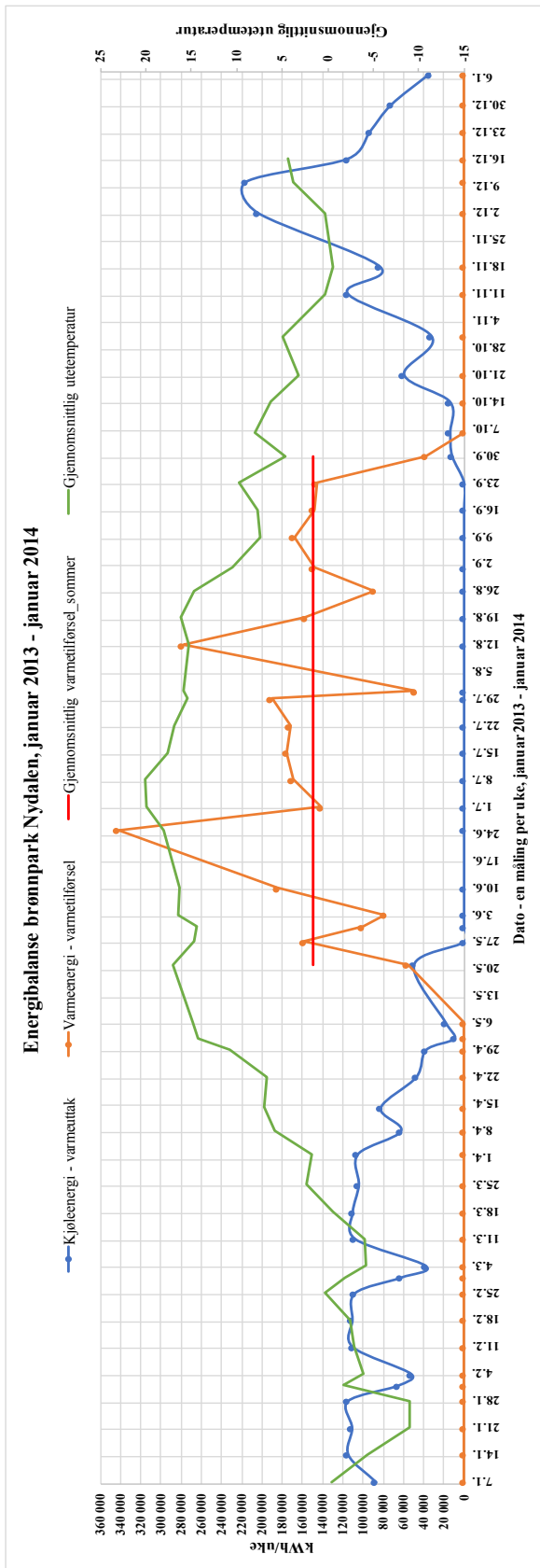
- Midttømme, K., Hilmo, B. O., Skarphagen, H. & Nissen, A. (2000). Kartlegging av energipotensialet i berggrunnen på kartblad Bekkestua, Bærum kommune: Varmeledningsevnen til bergarter.
- NGU. (2016). *Grunnvarme*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/fagomrade/grunnvarme> (lest 09.01.2015).
- NOU. (2015). Overvann i byer og tettsteder. 276 s.
- Novakovic, V., Hanssen, S. O., Thue, J. V., Wangestein, I. & Gjerstad, F. O. (2007). *ENØK i bygninger - Effektiv energibruk*, b. 3. 476 s.
- NVE. (2015). *Smarte strømmålere (AMS)*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/sluttbrukermarkedet/smartestrommalere-ams/> (lest 27.10.2015).
- Nygård, B. (2017). *Eiendomssjef i Avantor*. Pers. med.
- Olsen, T. (2017). *Teknisk Direktør i AF Energi og Miljøteknikk*. Pers. med.
- Ørnes, I. R. (2011). Kjøling i bygg. 108 s.
- Ørstavik, F. (2015). *Innovasjon*. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/innovasjon> (lest 20. April 2015).
- Oslo, k. (2013). Strategi for overvannshåndtering i Oslo 2013 - 2030. I: Kommune, O. (red.). 15 s.
- Regjeringen.no. (2015). *Fakta om nye energikrav til nybygg*: Regjeringen.no. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/plan-bygg-og-eiendom/plan--og-bygningsloven/bygg/innsikt/faktaark-om-nye-energikrav-til-nybygg/id2461620/>.
- Reitan, E. P. (2015). *Temperatur i fjell*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/sporengeolog/temperatur-i-fjell>.
- Rosvold, K. A. & Hofstad, K. (2013). *Energilagring*. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/energilagring>.
- standard.no. (2012). NS3037: Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Yrkesbygninger. 24 s.
- standard.no. (2014). NS3031: Beregning av bygningers energiytelse. 100 s.
- Stene, J. (2004). SINTEF Energy Research. 45 s.
- Stene, J. & Smedegård, O. Ø. (2013). Hensiktsmessige varme- og kjøleløsninger i bygninger. 163 s.
- TEK10. (2012). §13-4. *Termisk innneklima, veiledning til TEK10*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggeregler/tek/3/13/ii/13-4/>.

- TEK10. (2016). *Byggteknisk forskrift kapittel 14*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggeregler/tek/3/14/14-1/>.
- Thyholt, M. & Dokka, A. G. L. T. H. (2001). Kartlegging av mekanisk kjøling i nye kontor- og forretningsbygg. 36 s.
- VA-miljøblad107. (2013). Grønne tak. 6 s.
- VA/Miljø-blad69. (2015). Overvannsdammer. Beregning av volum. *VA-miljøblad*. VA-miljøblad.
- VA/Miljø-blad84. (2015). Klimaendringer og avløpssystemer. 4 s.
- VA/Miljø-blad85. (2008). Overvann. Valg av dimensjonerende gjentakintervall. 4 s.
- VA/Miljø-blad103. (2012). Lukkede fordrøyningsanlegg for avløp felles eller spillvann. 5 s.
- VA/Miljø-blad104. (2012). Fordrøyning av overvann. *VA-miljøblad*. 6 s.
- VA/Miljø-blad116. (2015). Mengderegulering i avløpsteknikken. 6 s.
- Wavin. (2016). *XL-Rør tredoblet kapasiteten i vannføring*. Tilgjengelig fra: <http://no.wavin.com/web/nyheter/show-news-on/xlror-tredoblet-kapasiteten-i-vannforing.htm> (lest 21. oktober 2016).
- Wavin, N. (2017). *Inspiserbar overvannskassett Q-Bic*. Tilgjengelig fra: <http://no.wavin.com/web/systemer/overvann/fordroyning-og-infiltrasjon/inspiserbar-overvannskassett-qbic.htm>.
- yr.no. (2017). *Målestasjon Oslo Blindern - Været som var*. Tilgjengelig fra: [https://www.yr.no/sted/Norge/Oslo/Oslo/Oslo_\(Blindern\)_m%C3%A5lestasjon/almanakk.html](https://www.yr.no/sted/Norge/Oslo/Oslo/Oslo_(Blindern)_m%C3%A5lestasjon/almanakk.html).

Vedlegg 2: Det øverste bildet viser arkitekttegningen av det planlagte casebygget. De to nederste bildene viser skjermbilder fra det ferdige oppførte bygget i simuleringprogrammet IDA ICE.



Vedlegg 3: Viser energibalansen i eksempelbrønnparken for et år med normal drift (2013). Den oransje kurven viser varmetilførselen (frikjølingen) mot brønnparken. Den røde horisontale linjen viser gjennomsnittlig varmetilførsel for ukene med behov for komfortkjøling.



Vedlegg 4: Alle verdier benyttet i beregningene av nødvendig akkumuleringsvolum. Kolonnen lengst til høyre viser vannvolumet [m³] som kreves for lagring av energimengdene, i kolonnen til venstre, og temperaturdifferanser (ΔT) på mellom 7 og 12. Resultatene er vist grafisk i figur 20 i kapittel 7.4.2.

Q [kWh]	Q [kJ]	ΔT	Cp [kJ/kgC]	m [kg]	m [m ³]
822,5	2960820,0	7	4,18	101190,0205	101,2
1421,1	5115960,0	7	4,18	174844,8394	174,8
2183,6	7860960,0	7	4,18	268658,92	268,7
3005,3	10818972,0	7	4,18	369752,9733	369,8
4104,5	14776369,2	7	4,18	505002,365	505,0
822,5	2960820,0	8	4,18	88541,26794	88,5
1421,1	5115960,0	8	4,18	152989,2344	153,0
2183,6	7860960,0	8	4,18	235076,555	235,1
3005,3	10818972,0	8	4,18	323533,8517	323,5
4104,5	14776369,2	8	4,18	441877,0694	441,9
822,5	2960820,0	9	4,18	78703,34928	78,7
1421,1	5115960,0	9	4,18	135990,4306	136,0
2183,6	7860960,0	9	4,18	208956,9378	209,0
3005,3	10818972,0	9	4,18	287585,6459	287,6
4104,5	14776369,2	9	4,18	392779,6172	392,8
822,5	2960820,0	10	4,18	70833,01435	70,8
1421,1	5115960,0	10	4,18	122391,3876	122,4
2183,6	7860960,0	10	4,18	188061,244	188,1
3005,3	10818972,0	10	4,18	258827,0813	258,8
4104,5	14776369,2	10	4,18	353501,6555	353,5
822,5	2960820,0	11	4,18	64393,64941	64,4
1421,1	5115960,0	11	4,18	111264,8978	111,3
2183,6	7860960,0	11	4,18	170964,7673	171,0
3005,3	10818972,0	11	4,18	235297,3467	235,3
4104,5	14776369,2	11	4,18	321365,1414	321,4
822,5	2960820,0	12	4,18	59027,51196	59,0
1421,1	5115960,0	12	4,18	101992,823	102,0
2183,6	7860960,0	12	4,18	156717,7033	156,7
3005,3	10818972,0	12	4,18	215689,2344	215,7
4104,5	14776369,2	12	4,18	294584,7129	294,6

Vedlegg 5: Verdier benyttet i beregningene av potensielt effektuttak fra energibrønnpark med 9 000 brønnmeter. Resultatene er vist grafisk i figur 21 i kapittel 7.4.3.

k	l	ΔT	P [W]	P [kW]	30 brønner
2	300	3	1800	1,8	54
2,2	300	3	1980	1,98	59,4
2,4	300	3	2160	2,16	64,8
2,6	300	3	2340	2,34	70,2
2,8	300	3	2520	2,52	75,6
3	300	3	2700	2,7	81
3,2	300	3	2880	2,88	86,4
3,4	300	3	3060	3,06	91,8
3,6	300	3	3240	3,24	97,2
3,8	300	3	3420	3,42	102,6
4	300	3	3600	3,6	108
4,2	300	3	3780	3,78	113,4
4,4	300	3	3960	3,96	118,8
4,6	300	3	4140	4,14	124,2
4,8	300	3	4320	4,32	129,6
5	300	3	4500	4,5	135
5,2	300	3	4680	4,68	140,4
5,4	300	3	4860	4,86	145,8
5,6	300	3	5040	5,04	151,2
5,8	300	3	5220	5,22	156,6
6	300	3	5400	5,4	162
2	300	4	2400	2,4	72
2,2	300	4	2640	2,64	79,2
2,4	300	4	2880	2,88	86,4
2,6	300	4	3120	3,12	93,6
2,8	300	4	3360	3,36	100,8
3	300	4	3600	3,6	108
3,2	300	4	3840	3,84	115,2
3,4	300	4	4080	4,08	122,4
3,6	300	4	4320	4,32	129,6
3,8	300	4	4560	4,56	136,8
4	300	4	4800	4,8	144
4,2	300	4	5040	5,04	151,2
4,4	300	4	5280	5,28	158,4
4,6	300	4	5520	5,52	165,6
4,8	300	4	5760	5,76	172,8
5	300	4	6000	6	180
5,2	300	4	6240	6,24	187,2
5,4	300	4	6480	6,48	194,4
5,6	300	4	6720	6,72	201,6
5,8	300	4	6960	6,96	208,8
6	300	4	7200	7,2	216

k	l	ΔT	P [W]	P [kW]	30 brønner
2	300	5	3000	3	90
2,2	300	5	3300	3,3	99
2,4	300	5	3600	3,6	108
2,6	300	5	3900	3,9	117
2,8	300	5	4200	4,2	126
3	300	5	4500	4,5	135
3,2	300	5	4800	4,8	144
3,4	300	5	5100	5,1	153
3,6	300	5	5400	5,4	162
3,8	300	5	5700	5,7	171
4	300	5	6000	6	180
4,2	300	5	6300	6,3	189
4,4	300	5	6600	6,6	198
4,6	300	5	6900	6,9	207
4,8	300	5	7200	7,2	216
5	300	5	7500	7,5	225
5,2	300	5	7800	7,8	234
5,4	300	5	8100	8,1	243
5,6	300	5	8400	8,4	252
5,8	300	5	8700	8,7	261
6	300	5	9000	9	270
2	300	6	3600	3,6	108
2,2	300	6	3960	3,96	118,8
2,4	300	6	4320	4,32	129,6
2,6	300	6	4680	4,68	140,4
2,8	300	6	5040	5,04	151,2
3	300	6	5400	5,4	162
3,2	300	6	5760	5,76	172,8
3,4	300	6	6120	6,12	183,6
3,6	300	6	6480	6,48	194,4
3,8	300	6	6840	6,84	205,2
4	300	6	7200	7,2	216
4,2	300	6	7560	7,56	226,8
4,4	300	6	7920	7,92	237,6
4,6	300	6	8280	8,28	248,4
4,8	300	6	8640	8,64	259,2
5	300	6	9000	9	270
5,2	300	6	9360	9,36	280,8
5,4	300	6	9720	9,72	291,6
5,6	300	6	10080	10,08	302,4
5,8	300	6	10440	10,44	313,2
6	300	6	10800	10,8	324

Vedlegg 6: Viser oversikt over total nedbør hver måned i årene 2014, 2015 og 2016 målt ved Blindern målestasjon i Oslo. Tall hentet fra meteorologisk institutts søketjeneste eKlima (eKlima 2017). Verdiene er illustrert grafisk i figur 22 i kapittel 7.4.5.1.

Måned	Total nedbør [mm] 2016	Total nedbør [mm] 2015	Total nedbør [mm] 2014
Januar	43,0	111,0	73,1
Februar	50,4	27,7	129,8
Mars	47,1	61,8	57,5
April	76,5	16,9	55,2
Mai	73,5	106,6	57,5
Juni	61,1	68,7	110,5
Juli	85,3	88,5	52,6
August	143,7	130,7	109,4
September	41	158,3	42,4
Oktober	13,2	8,3	211,3
November	74,2	75,5	101,5
Desember	19,5	57,2	27,5



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway