

Muligheter for energieffektiv renovering av yttervegger med bruk av innvendig isolering

Case: Campus Gløshaugen ved NTNU Trondheim

Possibilities for energy-efficient renovation of
external walls using internal insulation

Case: Campus Gløshaugen at NTNU Trondheim

Trondheim Mai 2023

Erik André Johansen

Thomas Pedersen Waade

Intern veileder:

Bozena Dorota Hrynyszyn

Ekstern veileder:

David Bjelland

Prosjektnr:

2023 - 13

Rapporten er:

ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Forord

Dette er en bacheloroppgave som representerer det avsluttende arbeidet på byggingeniørstudiet ved NTNU Trondheim, våren 2023. Oppgaven tilsvarer 20 studiepoeng. Det har ikke vært nødvendig med noen form for finansiering underveis i arbeidet. Oppgaven er, sammen med to tidligere oppgaver, tenkt som grunnlag for en doktoravhandling av David Bjelland, som har fungert som vår medveileder underveis. Oppgaven ble tidlig satt til å være innvendig oppgradering, noe vi syntes var spennende. Med tanke på innhenting av informasjon kom vi til ferdig dekket bord, der har David og tidligere bachelorstudenter gjort en utmerket jobb med innhenting. Når det er sagt, var det veldig mye informasjon, tegninger og dokumenter å analysere, og dette var nok mer tidkrevende enn vi først så for oss. Etter mange arbeidstimer fikk vi til slutt god oversikt, og et resultat begynte å vokse frem. Arbeidsprosessen har vært veldig lærerik, det har vært og spesielt moro å få jobbe med en oppgave om et bygg vi etter tre år på Gløshaugen også har et forhold til.

Vi ønsker å rette en stor takk til veileder Bozena D. Hrynyszyn og medveileder David Bjelland. Tusen takk for all støtte og konstruktive innspill underveis.

Trondheim, 20.mai 2023

Sammendrag

Denne rapporten er en casestudie av Sentralbygg 1 og 2 på Campus Gløshaugen ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Byggene er to høyblokker fra 1960-tallet, og er i dag blitt emne for oppgradering. Oppgaven undersøker hvordan en kan oppgradere disse byggene ved innvendig renovering, med TEK17-standard som mål. Arbeidet er gjort ved kartlegging av relevante tegninger og dokumenter, for å få opparbeidet en oversikt over materialer, veggsjikt og opprinnelig standard. Det er også gjort en evaluering av tilstanden til materialene, og dette er gjort med ved en kombinasjon av simuleringer, observasjoner og innhenting av informasjon fra diverse kilder. Kuldebro- og diffusjonsresultater er presentert i oppgaven.

Basert på denne informasjonen er konklusjonen at det foreslås å rive de eksisterende indre ytterveggene, for så å installere et moderne sjiktsystem med innovative isolasjonsmaterialer for å minimere ekstra veggtykkelse. Denne løsningen kan redusere energitap og derfor forbedre bygningenes klimapåvirkning. Det er også fastslått at kuldebroene i bygget har stor innvirkning på byggets energiforbruk, noe etterisolering med ny og bedre isolasjon vil redusere. En annen fordel er at flere av materialene som blir demontert har stor resirkuleringsgrad.

Abstract

This report is a case study of Sentralbygg 1 and 2 located on Gløshaugen Campus at the Norwegian University of Science and Technology in Trondheim. These buildings are two high-rise buildings from the 1960s, and have recently become subject to renovation. The objective of this study is to investigate how these buildings can be upgraded through interior renovation while aiming to meet the TEK17 standards. The work is conducted by mapping relevant drawings and documents to obtain an overview of the materials, wall layers, and original standards. An evaluation of the condition of the materials has also been conducted using a combination of simulations, observations, and information obtained from various sources.

Based on this information, the conclusion is to recommend demolishing of the existing inner outer walls, and install a modern layering system with innovative insulation materials to minimize extra wall thickness. This solution can reduce energy loss and therefore better the buildings influence on the climate, which was found to be a risk in the simulations. It has also been determined that cold bridges in the building have a significant impact on the building's energy consumption, which can be reduced by reinsulating with new and better insulation materials. Another advantage is that many of the materials being dismantled have a high degree of recyclability.

Forkortelser

BRA –Bruksareal

EPD – Environmental Product Declaration

FME – Forskningsentrene for miljøvennlig energi

FN – De forente nasjoner

FoU – Forskning og utvikling

KPI – Key performance indicators

LCA – Life Cycle Assessment

NTNU – Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet

RF – Relativ fuktighet

S1 – Sentralbygg 1

S2 – Sentralbygg 2

TEK17 – Byggeteknisk forskrift

THERM – Programvare for todimensjonal varmetransportsimulering

WUFI – Programvare for simulering av varme- og fukttransport

ZEB – Zero Emission Building

ZEN – Zero Emission Neighborhood

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag	II
Abstract.....	III
Forkortelser	IV
Figur- og bildeliste.....	VIII
1 Introduksjon	1
1.1 Motivasjon.....	1
1.2 ZEB og FME ZEN	3
1.3 Case Sentralbyggene 1 og 2	5
1.4 Rammer og avgrensninger	7
2 Metode	8
2.1 Organisering	8
2.2 Kartlegging av relevant litteratur	9
2.3 Kartlegging av simuleringer.....	10
2.3.1 Befaring på sentralbyggene 1 & 2	10
2.3.2 Simuleringer i THERM og WUFI.....	10
2.3.3 Termografering.....	11
2.4 Informasjonsbibliotek.....	11
2.5 Analyse av eksisterende situasjon	12
2.5.1 Sammenligning av termograferings- og simuleringsresultater.....	12
2.5.2 Materialvurdering	12
2.5.3 Utregninger.....	12
3. Teori.....	13
3.1 Bygningsfysikk.....	13
3.2 Varme-, fukt- og lufttransport	14

3.2.1 Varmetransport	14
3.2.2 Fukt	16
3.2.3 Kuldebroer	19
3.3 Materialer	21
3.3.1 Betong.....	21
3.3.2 Kork.....	22
3.3.3 Steinull.....	22
3.3.4 Porebetong (Siporex).....	23
3.3.5 Stenderverk – impregnert trevirke	23
3.3.6 Gips.....	24
3.3.7 Diffusjonstett papp	24
3.3.8 Skumglass – FOAMGLAS	25
4. Analyse	25
4.1 Sentralbyggenes oppbygning og bæresystem	25
4.1.1 Nord- og sørvendte fasader.....	26
4.1.2 Vest- og østvendte fasader.....	27
4.2 Sentralbyggenes eksisterende tilstand.....	27
4.2.1 Simulering	27
4.2.2 Termografi.....	30
4.2.3 Monitorposisjon.....	32
4.2.4 Inndata i WUFI-simuleringer	32
4.2.5 WUFI-simulering.....	33
4.3 Eksisterende tilstand på materialer.....	36
5. Resultater	38
5.1 Resultatdrøfting.....	38
5.2 Usikkerhet og feilkilder.....	40

5.3 FoU-kapittel	41
6. Konklusjon.....	42
6.1 Oppgraderingsforslag	43
Referanser	55
Vedleggsliste.....	i

Figur- og bildeliste

Figur 1: Konkretisering av ZEB-prinsippet	2
Figur 2: Sentralbyggene. Oversikt over himmelretninger	6
Figur 3: Flytskjema for arbeidsrekkefølge.....	9
Figur 4: Former for varmetransport gjennom en bygningsdel (Byggforsk, Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946, 2018).....	14
Figur 5: Dimensjonerende fukttilskudd (Byggforsk, Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater, 1999)	19
Figur 6: Modellering av brystningsvegg inkludert søyler.....	26
Figur 7: Modellering av etasjeskille mellom 6.- og 7.etasje.....	27
Figur 8: THERM-modellering brystningsvegg inkludert søyle.....	28
Figur 9: THERM-modellering brystningsvegg uten søyle	29
Figur 10: THERM-modellering etasjeskille 6.- og 7.etasje.....	30
Figur 11: Relativ fuktighet i brystningsvegg i fasade mot sør.....	34
Figur 12: Relativ fuktighet i monitorpunkt i fasade mot vest.....	35
Figur 13: Relativ fuktighet i monitorpunkt i søyler mot sør.....	35
Figur 14: ARCHICAD-modell av søyler og brystningsvegg	43
Figur 15: THERM-modellering av søyler og brystningsvegg	43
Figur 16: Relativ fuktighet og vanninnhold for brystningsvegg mot sør.....	44
Figur 17: ARCHICAD-modell av søyler og brystningsvegg, etter renovering.....	45
Figur 18: THERM-modellering av søyle og brystningsvegg, etter renovering	45
Figur 19: Relativ fuktighet og vanninnhold i brystningsvegg øvre del, mot nord.....	46

Figur 20: ARCHICAD-modell av gavlvegg	47
Figur 21 THERM-modellering av gavlvegg	47
Figur 22: Relativ fuktighet og vanninnhold i gavlvegg mot vest	48
Figur 23: ARCHICAD-modell av gavlvegg etter renovering.....	50
Figur 24: THERM-modellering av gavlvegg etter renovering	50
Figur 25: Relativ fuktighet og vanninnhold i gavl vegg øvre del, mot vest	51
Figur 26: THERM-modellering hjørne	52
Figur 27: ARCHICAD-modellering hjørne	52
Figur 28: THERM-modellering hjørne etter renovering	53
Figur 29: ARCHICAD- modellering etter renovering.....	53
Bilde 1: Oversiktsbilde campus. Sentralbyggene markert i rødt	5
Bilde 2: Campus Gløshaugen, bilde tatt fra avstand (Rosvold, 2021).....	6
Bilde 3: Termografi fra S1s østgavl, vanlig.....	31
Bilde 4: Termografi fra S1s østgavl, med farge.....	31
Bilde 5: Termografi fra S1s sydlige fasade, vanlig.....	31
Bilde 6: Termografi fra S1s sydlige fasade, med farge	31
Bilde 7: Termografi fra S1s nordlige fasade, inngang vest, med farge	32
Bilde 8: Termografi fra S1s nordlige fasade, inngang vest, vanlig	32

1 Introduksjon

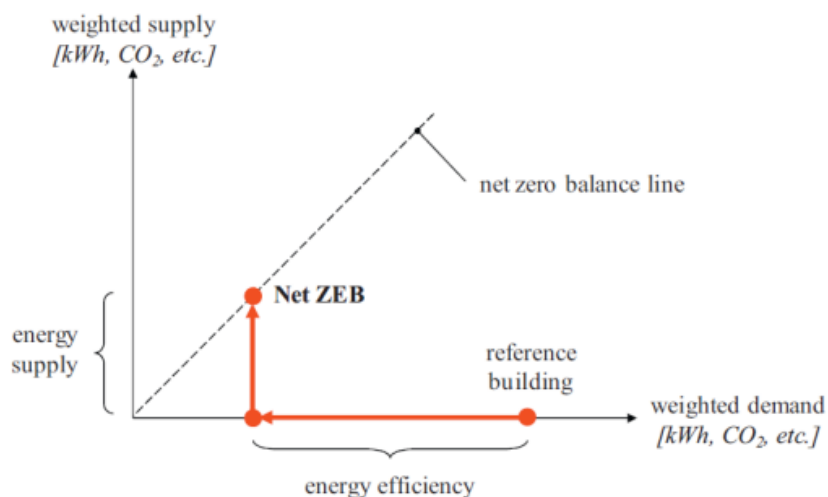
Denne oppgaven er en del av en doktoravhandling knyttet til forskningscenter FME ZEN. Avhandlingen fokuserer på Campus Gløshaugen, som er et pilotprosjekt for FME ZEN. Målet med avhandlingen er hvordan man kan oppgradere det sentrale strøket på Campus Gløshaugen, for å gjøre det til et nullutslippsområde. Denne rapporten kommer som et tilskudd for innvendig etterisolering og oppgradering av sentralbygg S1 og S2, og vil fungere som en mulighetsstudie for fremtidige oppgraderingsscenarioer. Kapitlene som følger, beskriver S1 og S2 sin nåværende oppbygning, hvilke materialer som er brukt og hvilke utbedringer som kan gjennomføres. Videre vil det presenteres hvilke avgrensinger som er satt for denne rapporten.

1.1 Motivasjon

Byggenæringen slik den drives i dag kalles ofte 40 %-næringen. Dette fordi den globalt bruker 40 % av ressursene, står for 40 % av utslippene og 40 % av energiforbruket. Norge har en visjon om å redusere klimagassutslippene med 90-95 % innen 2050¹ (Grønn Byggallianse, u.år.). Hvis denne visjonen skal nås, har byggenæringen et stort ansvar. Eldre bygg er som regel dårligere isolert enn nye bygg, og kan ha høyere luftlekkasje. Dette fører til høyere energiforbruk og dermed et større klimaavtrykk enn nødvendig.

Definisjonen av ZEB er bygninger som produserer fornybar energi for å kompensere for utslippet av klimagasser under byggingen og produksjonen av materialene. I *Figur 1* er ZEN representert grafisk, og der er det tydelig at for å oppnå ZEB må man senke energiforbruket (X-akse), og samtidig ha lik mengde energi produsert (Y-akse) for å kompensere for forbruket (ZEB, u.år).

¹ 90-95% reduksjon med 1990 som referanseår



Figur 1: Konkretisering av ZEB-prinsippet

Det finnes per i dag ingen allment akseptert definisjon av nullutslippsbygninger, verken i Norge eller internasjonalt. Innen ZEB finnes det flere nivåer som kan oppnås, og dette avhenger av hvor mye av byggets levetid som det ble kompensert for i produksjonen (Fufa, Schlanbusch, Sørnes, Inman, & Andersen, 2016). Det opereres med fem forskjellige grader av ZEB, her representert i stigende ambisjonsnivå (ZEB, u.år):

ZEB – O ÷ EQ: Bygningen produserer nok fornybar energi til å kompensere for klimagassutslippet fra drift av bygningen, men ikke for den energien som går til bruk av utstyr.

ZEB – O: Bygningens produserer nok fornybar energi til å kompensere for klimagassutslippet fra drift av bygningen.

ZEB – OM: Bygningen produserer nok fornybar energi til å kompensere for klimagassutslippet fra drift av bygningen og produksjon av byggematerialer.

ZEB – COM: Bygningen produserer nok fornybar energi til å kompensere for klimagassutslippet fra bygging, drift og produksjon av byggematerialer.

ZEB – KOMPLETT: Bygningen produserer nok fornybar energi til å kompensere for klimagassutslippet fra absolutt hele levetiden til bygningen. Det gjelder bygging, byggematerialer, drift og produksjon, samt riving og gjenvinning

I denne oppgaven vil det bli sett på materialene i fasadene på S1 og S2, med hovedfokus på innvendige oppgraderinger. Det vil si at en av føringene som er satt for rapporten er at endringene som blir forslått må kunne gjøres uten å påvirke fasadeutseende.

Ved kompensering er det lett å tenke at høyere produksjon av fornybar energi gir høyere kompensasjon. Dette er ikke alltid det beste alternativet med tanke på ZEB, eller i et miljøperspektiv. Det utslippet som er det mest miljøvennlige er det man ikke har. Det er derfor viktig å finne et scenario i oppgraderingen der det er balanse mellom disse aspektene. I denne oppgaven vil det derfor ikke fokuseres på produksjon av fornybar energi, men heller på energieffektivisering av byggene.

1.2 ZEB og FME ZEN

ZEN, “Zero Emission Neighborhoods”, er neste steg i forskingsprosjektet ZEB. Her er et nabolag definert som en gruppe bygg med en forbindelse, som deler infrastruktur i et geografisk avgrenset område (FME ZEN, What is a zero emission neighbourhood?, 2018). Et nullutslipps nabolag har som mål å redusere det felles klimagassutslippet til null over byggenes levetid², i tråd med valgt ZEB ambisjonsnivå. For et slikt nabolag er det satt syv nøkkelpunkter, der de fire første har direkte innvirkning på energiforbruk og klimagassutslipp (FME ZEN, What is a zero emission neighbourhood?, 2018):

Klimagassutslipp - Planlegge, utvikle og drifte bygninger og relevant infrastruktur mot null klimagassutslipp innen levetiden.

Energieffektivitet - Oppnå høy energieffektivitet, for deretter å “mate” energibehovet med egenprodusert fornybar energi.

Effekt - Styre energifordeling (mellom byggene) og supplere nettet utenfor nabolaget med eventuelt overskudd på en fleksibel måte.

Mobilitet - Tilrettelegge for kollektivtransport og smarte mobilitetssystemer.

Økonomi - Planlegge, utvikle og drifte nabolaget med økonomisk bærekraft, ved å minimere kostnader og driftskostnader for hele levetiden.

Romslige kvaliteter - Planlegge og plassere fasiliteter for å gi romslige kvaliteter og for å stimulere bærekraftige holdninger.

² Beregningsperioden regnes normalt over 60 år, der det forventes 60 år med bygningsdrift, og 100 år vedlikehold av infrastruktur.

Innovasjon - Utviklingen av nabolaget karakteriseres ved innovative prosesser basert på samarbeid mellom involverte parter, som fører til innovative løsninger.

For disse kategoriene er det laget et vurderingssystem for å måle hvor tilfredsstillende resultatet ble. Dette systemet er basert på målbare indikatorer, kalt KPIer. Dette gir et grunnlag på hva som skal måles og hvordan det skal dokumenteres i de forskjellige kategoriene. Eksempelvis er det to vurderingskriterier for klimagassutslipp, totalt klimagassutslipp og reduksjon av klimagassutslipp (Fufa, Schlanbusch, Sørnes, Inman, & Andersen, 2016). I vurderingen av klimagassutslipp er vurderingsmetoden fra ZEN å foretrekke, da den i tillegg til kartlegging av emisjoner også gir sammenligningsgrunnlag av reduksjon i utslippene. Dette er nyttig i planleggings- og utviklingsprosessen. Dette utføres ved å evaluere målingene opp mot et referanseprosjekt, for å se den prosentmessige nedgangen i utslipp (Fufa, Schlanbusch, Sørnes, Inman, & Andersen, 2016).

Å vurdere bygninger i et ZEN-perspektiv sammenlignet med et ZEB-perspektiv, er en langt mer kompleks prosess. I et ZEB-perspektiv er det mer konkrete og direkte faktorer som skal vurderes, samtidig som man mister konteksten og mulighetene det gir å vurdere en bygning som del av et større område. I et ZEN-perspektiv er prosessen mer kompleks, i dette tilfellet skal man finne løsninger som er miljømessige, økonomiske og sosiale for hele området, som blir speilet at de syv nøkkelpunktene (Fufa, Schlanbusch, Sørnes, Inman, & Andersen, 2016).

I Forskningscenter for nullutslippsområder i smarte byer (ZEN) utvikles det sammen med offentlige og industrielle partnere, ni pilotprosjekter. Disse skal fungere som innovasjonsknutepunkter, der forskerne, sammen med fagpersoner, eiendomsutviklere, kommuner, energiselskaper, grunneiere og brukere, tester nye løsninger for bygging, drift og bruk av områder for å redusere klimagassutslipp til null på områdenivå (FME ZEN, Pilotprosjekter, u.år). Ett av disse pilotprosjektene er "NTNU campus, Knowledge Axis i Trondheim". Pilotprosjektet fokuserer i hovedsak på tre av de syv nøkkelpunktene, herunder klimagassutslipp, energieffektivitet og romslige kvaliteter. Målet for pilotprosjektene, herunder NTNU campus, er ikke å følge den totale planen for ZEN, men heller bruke de valgte nøkkelpunktene som grunnlag i hvordan byggene passer inn på campus i sin helhet.

1.3 Case Sentralbyggene 1 og 2

Sentralbygg 1 (S1) og Sentralbygg 2 (S2) er en del av en samling bygninger på NTNU campus Gløshaugen i Trondheim. Byggene er tegnet av professor og arkitekt Karl Grevstad (Regjeringen, u.år). Byggene ble oppført mellom 1959-1961 (S1) og 1966-1968 (S2). Begge byggene består på det høyeste av 13 etasjer (pluss teknisk rom på taket) og ble bygget for



Bilde 1: Oversiktsbilde campus. Sentralbyggene markert i rødt

undervisningsformål. De har vært i bruk siden ferdigstilling. S1 og S2 er en rekke sammenkoblede bygninger som er bygget sammen med Gamle Kjemi helt nord-nordøst innenfor det markerte området, se bilde 1. Videre sør-sørøst følger S2, som består av en lavblokk, en mellomblokk, en høyblokk, etterfulgt av enda en mellomblokk. Videre følger S1 som består av en lavblokk, en høyblokk og enda en mellomblokk og søndre lavblokk. Mellom- og lavblokkene ble opprinnelig bygget med 2 etasjer, men det har i ettertid blitt bygget på én etasje, så de består i dag av 3 etasjer.

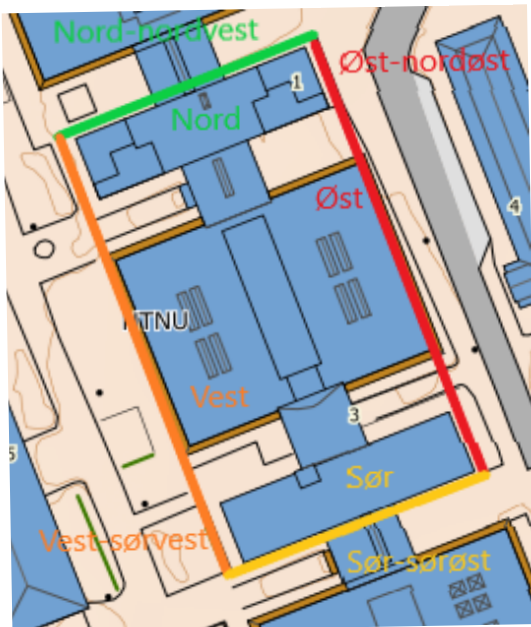
I denne oppgaven skal det fokuseres på høyblokkene i henholdsvis S1 og S2, derfor skal ikke mellom- og lavblokkene regnes med når S1 eller S2 omtales. S1 og S2 har en lysegrå farge, og følger samme fargepallett

som resten av Gløshaugen, som stort sett bærer lyse jordtoner. Et viktig element å notere, er at S1 og S2 er svært synlige, da de er betraktelig høyere enn annen bebyggelse i nærheten, se *Bilde 2*.



Bilde 2: Campus Gløshaugen, bilde tatt fra avstand (Rosvold, 2021)

S1 ligger i Alfred Getz veg 3 og benyttes i dag av blant annet Fakultet for arkitektur og design, Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse, instituttadministrasjon og Research Centre on Zero Emission Neighborhoods in Smart Cities – FME ZEN. Byggets “hovedåre”, populært kalt “flystripa”, er vernet for å bevare den høye symbolverdien denne har for tidligere og nåværende studenter ved tidligere NTH og dagens NTNU. Flystripa er vernet med verneklasse 2 (Regjeringen, u.år). Utover dette er fasaden vernet med verneklasse C, noe som gjør det utfordrende med en utvendig renovering (Trondheim Kommune, Kulturminnekartet, u.år) (Trondheim Kommune, Kriterier for A, B og C-klassifisering, 2022).



Figur 2: Sentralbyggene. Oversikt over himmelretninger

S2 ligger i Alfred Getz veg 1 og huser i dag Institutt for matematiske fag, Instituttet for industriell økonomi og teknologiledelse, samt arbeidsplasser for studenter. Tidligere har bygget rommet blant annet mekanikk, ren og anvendt matematikk, psykologi og tegnesaler. Planer fra 1965 viser at det i utgangpunktet var planlagt tre sentralbygg, men dette ble riktignok aldri gjennomført. “Flystripa” i S2, er i likhet med S1 vernet med verneklasse 2 (Regjeringen, u.år). Også S2s fasade er vernet med verneklasse C (Trondheim Kommune, Kulturminnekartet, u.år) (Trondheim Kommune, Kriterier for A, B og C-klassifisering, 2022).

S1 og S2s fasader vender mot henholdsvis nord-nordvest og sør-sørøst for langsiden, og øst-nordøst og vest-sørvest for gavlveggene, se *Figur 2* for oversikt. Fasadene vil heretter bli kalt henholdsvis nord-, sør-, øst- og vestfasadene for enkelhets skyld.

1.4 Rammer og avgrensninger

Denne oppgaven er som tidligere nevnt avgrenset til innvendige oppgraderinger i høyblokkene S1 og S2. Fasadene på blokkene skal forbli urørte, og alle oppgraderinger skal kunne utføres fra innsiden. Med innvendige menes innsiden av blokkenes yttervegger. Innvendige skille-, bære- eller lettvegger skal ikke inkluderes i utregninger og forslag. Vinduer mot det fri, og kuldebroene i disse blir ikke inkludert. Det er heller ikke gjort beregninger for tak, eller gulv mot grunn. Vegger mot grunn (kjeller), og vegger på “flystripa” er heller ikke vurdert. Videre skal det gjøres kvalifiserte antagelser omkring byggemåte eller byggematerialer på steder det ikke finnes tilfredsstillende dokumentasjon og det ikke er mulighet for å vurdere visuelt.

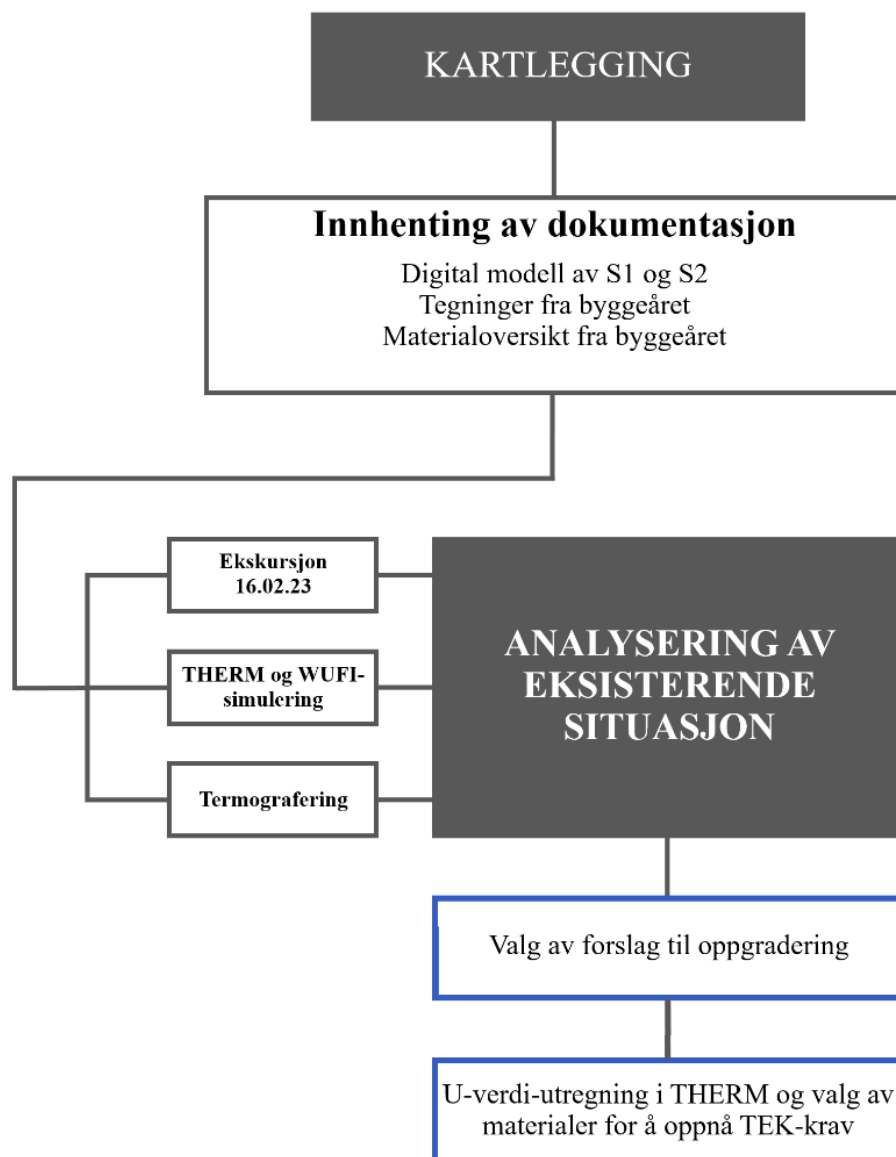
Selv om oppgaven er knyttet til FME ZEN, som tar for seg effektene av oppgraderingene i et større geografisk område, vil det i denne oppgaven kun gjøres vurderinger isolert for S1 og S2. I en ZEN byggeprosess er et av målene å redusere CO₂-avtrykket. Det samme fokuset vil det være i denne oppgaven, men på bygningsnivå fremfor nabolagsnivå. Målet for oppgaven er å energieffektivisere S1 og S2 på en så klimavennlig måte som mulig, og samtidig skape et tilfredsstillende resultat for byggenes bruksområde. Utover dette vil ikke ZEB kravene prioriteres.

2 Metode

I dette kapitlet blir fremgangsmåten for oppgaven presentert, både hvordan det ble planlagt fra starten, og hvordan arbeidet ble utført. I følge Byggforsk er det viktig å kartlegge blant annet den sjiktvis oppbygningen av veggene og isolasjonstykkelsen tidlig i en planleggingsfase for etterisolering (Byggforsk, Etterisolering av betongvegger, 2014). Kartleggingen ble i dette tilfellet delt inn i to deler, først innsamling av relevant teoretisk materiale, og deretter undersøke visuelt om den teoretiske informasjonen stemmer med den faktiske situasjonen.

2.1 Organisering

Arbeidet startet med å skape en oversikt over målet og avgrensingene for oppgaven. I tillegg startet innsamlingen av relevant litteratur fra blant annet medveileder, Byggforsk og andre relevante kilder. I tillegg har det vært forsøkt å finne hvilke egenskaper byggematerialene fra byggeåret har hatt da disse var oppført. Der det ikke er funnet konkrete verdier, er det gjort kvalifiserte antagelser eller tilnærminger. Videre ble det brukt mye tid på valg av byggemetode og materialer, eksempelvis isolasjonsmateriale. Under følger et enkelt flytskjema over arbeidet (*Figur 3*).



Figur 3: Flytskjema for arbeidsrekkefølge

2.2 Kartlegging av relevant litteratur

Første del av kartleggingen gikk ut på å samle inn relevant litteratur fra medveileder, samt innhenting av tilgjengelig dokumentasjon på nett. Medveileder satt på store mengder dokumentasjon, og deler av kartleggingen gikk med til å sortere dette. Litteraturen inneholdt originale byggetegninger, tegninger av veggsjikt, samt plantegninger og snitt. I tillegg ble det gitt tilgang til en digital modell av S1 og S2. Disse tegningene og modellene i felleskap er blitt brukt som grunnlag for materialer, tykkelser og videre utregninger i denne oppgaven.

2.3 Kartlegging av simuleringer

I kartleggingens andre del ble informasjonen som ble hentet inn i første del brukt til videre kartlegging. Kartleggingen besto av ekskursjon, simulering av eksisterende situasjon i THERM og WUFI.

2.3.1 Befaring på sentralbyggene 1 & 2

Befaringen 16.02.23 fant sted for å undersøke om bygget stemte overens med informasjonen funnet i dokumentasjonen fra medveileder. Underveis ble det tatt mål av ytterveggene for å undersøke nettopp dette. Videre ble det notert generelle inntrykk om temperatur, om luftkvalitet i byggets forskjellige etasjer, i tillegg til målinger. Byggets yttervegger ble også inspisert visuelt, og fotografert. Underveis i ekskursjonen ble funnene diskutert fortløpende med veileder og medveileder.

2.3.2 Simuleringer i THERM og WUFI

Simulering av eksisterende tilstand ble i hovedsak gjort i programmene THERM og WUFI. For å undersøke temperaturendringen gjennom ytterveggene ble THERM benyttet. THERM gir en teoretisk fremstilling av temperaturendring, U-verdier og varmekraft (U.S Department of energy, 2017). Fremstillingen i THERM er gjort på bakgrunn av materialeegenskapene som blir lagt inn, ytre forhold og grenseverdier. Den simulerte overflatetemperaturen på betongen innvendig bør derfor være tilnærmet lik temperaturen funnet ved termografering. For beregningene ble det satt en antatt innendørs temperatur på 20°C og en utendørs temperatur på -2°C.

For analyser av temperatur og fukttransport er dataprogrammet WUFI Pro 6.3 benyttet. Programmet er utviklet av Fraunhofer institutt for bygningsfysikk, og skal gi en realistisk beregning av fukt- og varmetransport i ikke-stasjonære modellerte bygningsdeler (Geving, Beregningsverktøy for fukt- og varmetransport i bygningskomponenter, 2016). WUFI bruker reelle klimadata for simuleringen og inkluderer ytre påvirkninger som slagregn, stråling, temperatur, relativ fuktighet og damptrykk i beregningene. Beregningsresultater fra programmet kan brukes til å analysere den hygrotermiske situasjonen i ulike bygningsdeler.

Analysen av den eksisterende konstruksjonen er gjort ved å bruke antatte materialer og oppbygging ut fra detaljtegninger av sentralbyggene. Klimadata er hentet fra programmets eget klimadataregister, som inneholder værdata målt i Trondheim. I analysene av oppgraderingsforslag er materialdata hentet fra produktdatablader.

Videre ble de simulerte verdiene brukt til å sammenligne med resultatene fra termografering, samt til beregning av kuldebroverdier og energibruk.

2.3.3 Termografering

Termografering er en type fotografi der kameraet fanger opp infrarød stråling. Kameraet tar et bilde hvor de infrarøde strålene er gjort om til temperaturer, og temperaturforskjellen vises ved hjelp av ulike farger (Lavenergiprogrammet, 2017). Dette brukes for å undersøke overflatetemperaturen i bygg, samt for å undersøke om det finnes kuldebroer utover det forventede. Termografering bør ideelt sett utføres ved lave utetemperaturer, og på dager der bygget ikke varmes opp nevneverdig av solen for å unngå at dette påvirker resultatene. I dette tilfellet lot det seg ikke å hente inn termograferingsinstrument, det vil si at termograferingene brukt i denne oppgaven er hentet inn fra tidligere prosjekter.

2.4 Informasjonsbibliotek

Under arbeidet med oppgaven er det blitt brukt store mengder litteratur fra forskjellige programmer, utregninger og artikler. Alle disse filene er samlet i et informasjonsbibliotek. I biblioteket ligger originalfilene til simuleringsprogrammene, sammen med en samling filer fra byggenes opprinnelige byggeplan. Det ligger også noe litteratur som ikke er brukt i oppgaven direkte, men som kan være nyttig til videre arbeid. Informasjonsbiblioteket er tilgjengelig hos veileder og inneholder følgende:

- Digital modell av S1 og S2
- Simuleringer og utregninger med originalfil
- Termograferingsmateriale
- Kartlegginger, materialer og størrelser
- Artikler og relevant regelverk for oppgradering
- Dokumenter og tegninger fra medveileder

Filer det er referert til i oppgaven finnes i informasjonsbiblioteket. Filnavnene brukt i oppgaven er de samme som i biblioteket, så det skal være lettere å finne. Det må presiseres at informasjonsbiblioteket kun inneholder filer, ikke linker til filer fra internett som det er gjort rede for i referanselisten.

2.5 Analyse av eksisterende situasjon

Etter innhenting av grunnleggende informasjon om oppbygningen og den bygningsfysiske- og materialtekniske tilstanden til byggene, kunne informasjonen analyseres. Analyseringen ble gjort i tråd med beskrivelsen de neste kapitlene.

2.5.1 Sammenligning av termograferings- og simuleringsresultater

Simuleringen, gjort i THERM, ga en teoretisk representasjon av den opprinnelige tilstanden til byggene. Etter sammenligning av bildene fra termograferingen og THERM-resultatene ble vurderingene av eksisterende tilstand endret der etter.

2.5.2 Materialvurdering

Fokus under materialvurderingen har vært hvorvidt det er mulig å gjøre oppgraderingen mer miljøvennlig. Dette er gjort med en forståelse av at flere av veggens materialer ikke skal beholdes. Det ble derfor kartlagt hvor i avfallshierarkiet en kan håndtere de forskjellige materialene. Materialene som ikke skal beholdes er:

- Mineralull: Mineralullen fra bygningsåret må byttes ut for at ytterveggene skal kvalifisere til moderne regelverk.
- Kork: Kork ble benyttet som isolasjonsmateriale på innsiden av byggenes søyler. Kork innehar en for høy varmekonduktivitet til å nå dagens krav uten stor tykkelse, og er derfor hensiktsmessig å fjerne og resirkulere.
- Diffusjonstett papp: Diffusjonstett papp er benyttet som et diffusjonstett sjikt i byggenes langsider. Diffusjonstett papp har for lav dampmotstand for å tilfredsstille moderne tetthetskrav, og bør derfor byttes ut med et materiale med høyere diffusjonstetthet.
- Gips: Gips montert på 60-tallet som må demonteres for å få tilgang til veggens indre vil det være urealistisk å anta at kan beholdes.

Videre ble det undersøkt hvorvidt de forskjellige materialene kunne enten gjenvinnes eller resirkuleres. Dette er redegjort for i kapittelet om materialer.

2.5.3 Utrekninger

Varmetekniske simuleringer er gjort med utgangspunkt i at S1 og S2 er en skallkonstruksjon uten kuldebroer. Kuldebroene i bæresystemet utgjør et tilleggstrap. Kuldebroverdier ble regnet ut separat, ved hjelp av simuleringsresultater i THERM, mens U-verdiene til den kuldebrofrie konstruksjonen kunne tas rett fra simuleringen. Utrekningen av kondensrisiko og fukttransport

ble gjort i WUFI, og ble brukt til å vurdere konstruksjonens utgangspunkt. Disse resultatene fra WUFI simulering finnes i vedlegg 3 og i informasjonsbiblioteket.

3. Teori

Dette kapittelet beskriver den nødvendige teorien som en trenger for å ha et innblikk i hvordan den hygroteermiske situasjonen i ytterveggene mot luft i S1 og S2 er per dags dato, og hvordan en energieffektivisering vil påvirke de ulike konstruksjonsdelene. Den bygningsfysiske teorien er hovedsakelig anskaffet fra bøkene Bygningsfysikk Grunnlag av Jan Vincent Thue og Praktisk bygningsfysikk av Stig Geving.

3.1 Bygningsfysikk

Varmetransport i bygningskonstruksjoner er en sentral utfordring innenfor bygningsfysikk. Varmetransport skjer når det overføres varmeenergi fra et område med høy temperatur til et område med lavere temperatur. Det er tre hovedtyper av varmetransportmekanismer i bygningskonstruksjoner: konduksjon, konveksjon og stråling.

Konduksjon oppstår når varmeenergi overføres gjennom et fast materiale, eksempelvis en vegg, et gulv eller et tak. Varmetransporten skyldes at varme overføres fra molekylene i det varme området til molekylene i det kalde området. Konveksjon oppstår når varmeenergi overføres gjennom væsker eller gasser, for eksempel luft, og skjer når oppvarmet luft stiger og kald luft synker. Stråling skjer når varmeenergi overføres gjennom elektromagnetiske bølger, som fra sollys som treffer en vegg eller fra en ovn som sender ut varmestråling.

Uønsket varmetap og varmeøkning i en konstruksjon kan føre til økte energikostnader og dårligere inn klima. Derfor er det viktig å minimere varmetransport i bygningskonstruksjoner. Det finnes flere metoder for å redusere varmetransport, som inkluderer å legge til isolasjon i vegger, gulv og tak for å begrense konduksjon, samt å forsegle dører og vinduer for å hindre konveksjon. Andre metoder inkluderer bruk av materialer med høyere termisk motstand, som lavemitterende glass i vinduer og reflekterende overflater for å redusere strålingsvarme.

For å redusere varmetransporten i bygningskonstruksjoner ytterligere, kan avanserte teknikker som dynamisk termisk simulering og termografi benyttes. Dynamisk termisk simulering kan brukes til å analysere og optimalisere bygningskonstruksjoner og termiske egenskaper før de bygges eller renoveres, mens termografi kan brukes til å påvise varmelekkasjer i eksisterende bygninger.

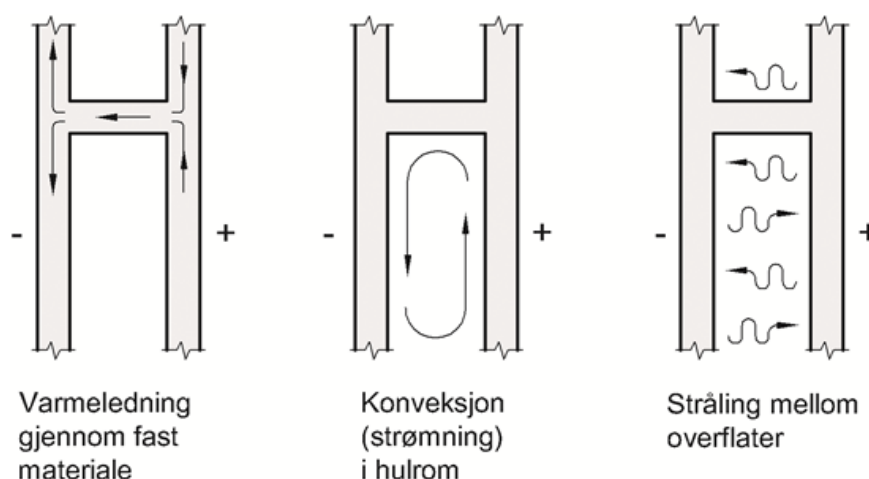
Generelt er det å redusere varmetransporten en viktig faktor for å opprettholde en stabil innetemperatur og redusere energikostnader i bygningskonstruksjoner. Derfor er det viktig å bruke avanserte metoder og teknikker, for å optimalisere termiske egenskaper og begrense varmetap og varmeøkning i bygninger.

3.2 Varme-, fukt- og lufttransport

Varmetapet gjennom bygningskroppen er knyttet til byggets energiforbruk, og ved å kunne regne på temperaturfordeling og varmestrøm har man et grunnlag for å beregne og finne kritiske temperaturer i de ulike sjiktene på bygget. Kritiske sjikt er i denne oppgaven beregnet som steder der det er fare for at kondens og muggvekst kan oppstå. Byggets varmetap er også avhengig av andre faktorer som blant annet varmetap gjennom ventilasjon, varmetilskudd fra sol og utsyr, belysning, energibehov for kjøling og tekniske installasjoner. (Geving, Praktisk Bygningsfysikk, 2021, s. 17)

3.2.1 Varmetransport

Varmetapet mot det fri sammen med varmetapet mot uoppvarmede soner betegnes som transmisjonstap. Varmetapet i yttervegger skjer gjennom vegger, vinduer, dører og kuldebroer og er ansett som viktige i denne oppgaven. Når varmen transporteres gjennom ytterveggen vil den passere faste materialer som treverk og betong, og porøse materialer som mineralull og kork. Transmisjonen gjennom disse materialene skjer ved tre ulike transportformer som er varmeledning, konveksjon og stråling.



Figur 4: Former for varmetransport gjennom en bygningsdel (Byggforsk, Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946, 2018)

Gjennom betong og treverk, som er faste materialer med poresystem, skjer varmeledningen gjennom en kombinasjon av ledning, konveksjon og stråling. Men i praksis er det vanlig å beregne disse materialene som homogene, og at varmen strømmer igjennom som ren ledning. Størrelsen på varmeledningen er avhengig av materialets varmeledningsevne, heretter betegnet som varmekonduktiviteten λ eller lambda-verdien (Geving, Praktisk Bygningsfysikk, 2021, s. 22). Lambda-verdien til et bestemt materiale brukes til å beregne varmeisolasjonsevnen, og uttrykkes sammen med tykkelsen d , som definerer et sjikts varmemotstand R :

$$R = \frac{d}{\lambda} \left(\frac{m^2 K}{W} \right)$$

I et materialsjikt kan varmemotstanden benyttes sammen med temperaturene på utsiden og innsiden av sjiktet, henholdsvis T_1 og T_2 til å beregne varmestrømmen q gjennom sjiktet per kvadratmeter:

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{(T_2 - T_1)}{R} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

I de fleste tilfellene består bygningsdeler av flere parallelle sjikt, og dermed summeres de ulike sjiktene varmemotstand til en total varmemotstand, R_{Total} , som inkluderer de ulike sjiktene sammen med varmeovergangsmotstandene på innvendig og utvendig overflate gitt som R_{si} og R_{se} . Den totale varmemotstanden, R_{Total} , er dermed et mål på en gitt konstruksjonsdels motstand mot varmetransport. Ved beregning av varmestrøm er det vanlig å bruke den inverse verdien av varmeovergangsmotstanden, som blir betegnet som materialets U -verdi:

$$U = \frac{1}{R_{total}} + \Delta U \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

U -verdi er materialets varmegjennomgangskoeffisient, som er et standardisert mål som angir motstanden av varmestrøm i en bygningsdel, der R_{total} er den totale varmemotstanden. ΔU er et korreksjonsbidrag som beregnes etter regler gitt i NS-EN ISO 6946 og inkluderer korreksjoner for luftåpninger, festemidler som går gjennom isolasjonen og nedbør på omvendte tak (Byggforsk, Beregning av U -verdier etter NS-EN ISO 6946, 2018). Ved mer komplekse konstruksjonsdeler med sammensatte sjikt, er det gitt en metode i NS-EN ISO 6946 som går ut på å beregne to verdier for varmemotstand, der den ene verdien blir beregnet slik at den gir for stor varmemotstand og den andre gir for lav varmemotstand. Den faktiske varmemotstanden vil da ligge et sted mellom disse to verdiene, og ved å beregne gjennomsnittet av disse får man en verdi som er tilnærmet lik den reelle verdien:

$$R_{total} = \frac{R_{total, \text{\textit{\textit{\textit{}}}}}}{2} \left(\frac{m^2 K}{W} \right)$$

Når den øvre grenseverdien beregnes, deler man konstruksjonen opp i ulike felt uten varmeveksling mellom feltene. De ulike feltene kan eksempelvis være bare bindingsverket i en vegg og bare isolasjonen i det andre feltet, og deretter beregnes et arealveid gjennomsnitt av disse verdiene. Den nedre grenseverdien beregnes som en sammensetning av de ulike materialene, med lik varmestrøm gjennom hele snittet av konstruksjonen (Geving, Praktisk Bygningsfysikk, 2021, s. 27).

I tillegg til varmeledning gjennom materialer, kan det oppstå luftstrømmer i svært porøse materialer, som mineralull. Luftstrømmen oppstår når det er temperaturdifferanse på hver side av materialsjiktet, og dermed stiger lufta på den varme siden og synker på den kalde siden og danner en sirkulær luftstrøm. Denne luftstrømmen i materialet betegnes som naturlig konveksjon, og blir forsterket i luftespalter der det ikke er noen materialer som kan bremse luftstrømmen (Geving, Praktisk Bygningsfysikk, 2021, s. 29).

I luftespalter oppstår varmeledning også gjennom langbølget stråling fra varm til kald side, siden den varme siden sender ut en større langbølget stråling enn den kalde siden, noe som resulterer i en netto varmetransport. Strålingsmengden er avhengig av de ulike materialenes emissivitet ϵ , der flater med stor emissivitet sender ut mer stråling enn flater med lav emissivitet (Geving, Praktisk Bygningsfysikk, 2021, s. 30).

3.2.2 Fukt

Ulike skandinaviske undersøkelser på byggskader konkluderer at mellom 60 og 80% av skadene på konstruksjoner er forårsaket av fukt (Thue J. V., 2016, s. 289). Fukt i bygg har en rekke ulike kilder, men i denne oppgaven er fuktkildene begrenset til: nedbør, byggfukt og fuktighet i luft inne og ute. Siden Sentralbyggene er relativt høye i forhold til omliggende bygg, kommer de øvrige etasjene til å bli utsatt for et mer ekstremt klima med vind og slagregn, noe som kan føre til større risiko for byggfukt gjennom kapillærsuging i materialene og veskestrømning gjennom lekkasjer, enn de nedre etasjene. Fukten transporteres til bygg gjennom fire hovedmekanismer som blir beskrevet i *tabell 1*.

Fase	Transportmekanisme	Drivkraft
------	--------------------	-----------

Væske	Kapillærsug	Kapillærsuging skjer gjennom en sorpsjonsprosess når et tørt porøst materiale kommer i kontakt med en fri vannflate. Sorpsjonseffekten oppstår av “umettede” elektrostatiske krefter i poreveggene trekker til seg vannmolekyler (Thue J. V., 2016, s. 320).
Væske	Gravitasjon	Tyngdekraften driver vann gjennom lekkasjepunkter og inn i konstruksjonsdeler.
Vanndamp	Konveksjon	Differanse i luftas totaltrykk på grunn av temperaturforskjeller fører til fukttransport gjennom luftstrømning.
Vanndamp	Vanndampdiffusjon	Når vann er i dampfasen vil forskjellene i damptrykket gå mot en utjevning, og dermed kommer vanndampmolekyler til å trenge seg inn i tørre porøse materialer når disse utsettes for fuktig luft (Thue J. V., 2016, s. 323).

Tabell 1: Drivkrefter for fukttransport

I situasjoner der materialer ikke utsettes for direkte påkjenninger fra vann og konveksjon, er den dominerende fukttransporten gjennom diffusjon (Thue J. V., 2016, s. 326). Ved å gjennomføre overslagsberegninger, kan man vurdere konstruksjonens fuktegenskaper og få en oversikt over hvordan fukten transporteres gjennom ulike materialer i konstruksjonen. Transporten av fukt gjennom vanndampdiffusjon er avhengig av materialet, der transporten skjer fortere i luft enn i faste og porøse materialer. Hastigheten av fukttransport gjennom diffusjon bestemmes av materialets vanndamppermeabilitet δ_p , som kan brukes sammen med tykkelse d til å beregne materialsjiktets dampmotstand Z :

$$Z = \frac{d}{\delta_p} \left(\frac{m^2 s Pa}{kg} \right)$$

Ved stasjonære endimensjonale forhold kan man foreta praktiske diffusjonsberegninger for å kontrollere om det vil dannes kondens i en bestemt konstruksjon. Ved å anta at damptrykkforskjellene fordeler seg proporsjonalt med sjiktens dampmotstand Z_j kan de aktuelle damptrykkene p_v i konstruksjonen beregnes.

$$\Delta p_{v,i} = \frac{Z_i}{Z_{tot}} \cdot \Delta p_{v,tot}$$

De aktuelle damptrykkene, kombinert med temperaturene i sjiktene, kan sammenlignes med metningsinnholdet i lufta og oppdage om det er risiko for kondensasjon i de ulike sjiktene. Risikoen for kondensering oppstår hvis det beregnede damptrykket overstiger metningstrykket for den aktuelle temperaturen (Thue J. V., 2016, s. 332). Ved slike praktiske, endimensjonale beregninger oppstår det en rekke ulike usikkerhetsmomenter, da dampmotstandstall som brukes i beregninger kan variere. Videre vil oppstått kondensering føre til en sterk økning av permeansen og gir økt fukttransport bort fra punkter der fukt har kondensert (Thue J. V., 2016, s. 335). På grunn av disse usikkerhetsmomentene er det mere gunstig å gjennomføre dynamiske fuktanalyser. Disse analysene er blitt gjennomført i dataprogrammet WUFI, som gjør det mulig å simulere situasjoner time for time gjennom lengre tidsperioder.

Det absolutte innholdet av vanndamp i lufta kan beregnes på ulike måter, der de vanligste er å enten se på vanndampens partialtrykk p_v målt i pascal eller luftas vanndampinnhold v målt i gram per kubikkmeter luft. Det maksimale vanndampinnholdet i lufta er avhengig av luftas temperatur, der det maksimale vanninnholdet synker sammen med temperaturen. Ut fra dette er det vanlig å se på den relative luftfuktigheten RF, som er luftas fuktighet relativt til metningsinnholdet i prosent:

$$RF = \frac{p_v}{p_{sat}} \cdot 100\% \approx \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100\%$$

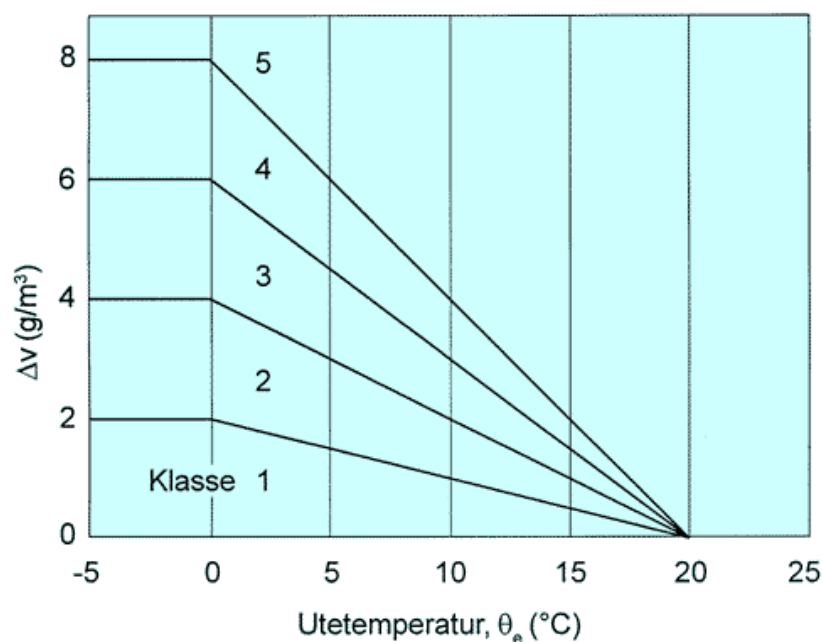
I uteluft er den relative luftfuktigheten avhengig av klimaet, og generelt er luftas RF lavest på sommeren og høyest på vinteren. Dette er sterkt knyttet til utetemperaturen, men luftas RF kan være høy ved regnvær og tåke på sommeren. Når RF er 100% har luftfuktigheten nådd sitt metningspunkt og kommer til å begynne å kondensere.

Vanndampinnholdet i innelufta bestemmes mye av tilstanden på lufta som blir tatt inn gjennom ventilasjonsanlegget, størrelsen på ventilasjonsanlegget og de ulike fukttilskuddene fra personer og bruk av bygget.

Fukttilskuddet Δv i bygg beregnes ved å måle temperatur og RF på inne- og utelufta, og deretter lese av fuktinnholdene i et luftfuktighetsdiagram.

$$\Delta v = v_{inne} - v_{ute}$$

Det innvendige fukttilskuddet ved beregninger deles inn i fem ulike klasser, der klassen bestemmes ut fra antatt bruksområde for bygningen. For kontorer er det beregnet at fukttilskuddet er relativt lavt og plasseres i klasse 2.



Figur 5: Dimensjonerende fukttilskudd (Byggforsk, Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater, 1999)

Fukttilskudd klasse	Bygningstype
1	Lager
2	Kontor, butikk
3	Bolig med få beboere
4	Bolig med mange beboere, idrettshall, kjøkken og kantine
5	Spesielle bygninger: vaskeri, bryggeri, svømmehall

Tabell 2: Fukttilskudds-klasser til ulike bygningstyper (Byggforsk, Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater, 1999)

Ut fra figuren kan man se at det maksimale fukttilskuddet i de ulike klassene er avhengig av utetemperaturen og synker når utetemperaturen er over 0 grader. Dette er fordi det er vanlig at beboere og brukere av bygget oftere begynner å åpne vinduer og lufte, og denne økte ventilasjonen fører til lavere innvendig luftfuktighet. (Byggforsk, Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater, 1999)

3.2.3 Kuldebroer

Deler av bygningskroppen der varmemotstanden er betydelig lavere enn i den omliggende konstruksjonen, blir betegnet som kuldebroer. Kuldebroene bidrar til en vesentlig større

varmestrøm lokalt, og dermed et større varmetap enn i andre deler av konstruksjonen. I større kuldebroer kan overflatetemperaturen bli så lav at det fører til kondensering på innsiden av konstruksjonen. Kuldebroer kan deles inn i to hovedkategorier, der langstrakte kuldebroer betegnes som lineære kuldebroer og kuldebroer med begrenset utstrekning betegnes som punktkuldebroer (Geving, Praktisk Bygningsfysikk, 2021, s. 31).

I beregninger karakteriseres det ekstra varmetapet fra lineære kuldebroer som kuldebroverdi ψ , som gir en verdi gitt i W/(mK) og multipliseres med lengden på den aktuelle kuldebroen l_k , og Punktkuldebroer χ , oppgis med en verdi gitt i W/K. For å finne tilleggsvarmetapet fra kuldebroer, summerer man konstruksjonens U-verdi uten kuldebroer U_0 med bidragene fra lineære og punktvis kuldebroer. Dermed kan tilleggsvarmetapet fra kuldebroer beregnes ved formelen:

$$U = U_0 + \frac{\sum_k \psi_k \cdot l_k}{A} + \frac{\sum_j \chi_j}{A} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

De lineære kuldebroene er hovedsakelig de kuldebroene som fører til størst varmetap i konstruksjoner, da disse har generelt høyere kuldebroverdi, i tillegg til at de strekker seg over et høyt antall løpemeter. Lengden på lineære kuldebroer måles på innsiden av bygget, i skjæringspunktet mellom bygningsdelen og klimaskjermen. Punktkuldebroer er typisk tilslutninger der kuldebroen har liten utstrekning, som søyler og gjennomføringer. Størrelsen på kuldebroverdien er avhengig av to ulike bidrag, materialbidrag og geometrisk bidrag. Materialer med høy varmeledningsevne, som for eksempel søyler og dekker av betong, er typiske konstruksjonsdeler som gir større kuldebroverdier. Hvis det er forskjeller på geometrien på konstruksjonsdeler, fører dette til større kuldebroverdier, siden forskjeller i innvendig og utvendig areal fører til større avkjølings- eller oppvarmingsareal, for eksempel i hjørner (Byggforsk, Kuldebroer. Typer, konsekvenser og bruk av normalisert kuldebroverdi, 2019).

Kuldebroer kan identifiseres på eksisterende bygg ved hjelp av termisk fotografering, der kameraet fanger den termiske strålingen fra bygningen og måler overflatetemperaturen på konstruksjonsdeler, og man kan dermed se hvor det er varmelekkasje i bygningsskallet.

3.3 Materialer

FNs bærekraftsmål nr.12 er “Ansvarlig forbruk og produksjon” (FN-sambandet, 2023). Dette er én av 17 bærekraftsmål som FN har utarbeidet for å stoppe klimaendringene, utrydde fattigdom og kjempe mot ulikheter, innen 2030. Av disse er mål nr.12 å sikre bærekraftige forbruks- og produksjonsmønstre.

Den beste formen for avfallshåndtering er redusering av avfall, det vil si å ikke kaste materialer om det ikke er strengt nødvendig. Etter redusering kommer metodene gjenbruk, resirkulering, kompostering, brenning og deponering, i stigende rekkefølge med tanke på miljøkostnaden (Peng, Scorpio, & Kibert, 1997). Dette vil si at det å unngå å produsere avfall, er mer miljøvennlig enn å produsere, uavhengig av sirkulærhetsgraden. Kort oppsummert er det viktig å vurdere mulighetene for å unngå produksjon av avfall, fremfor å rive og bygge nytt.

Dagens overforbruk av fossile og ikke-fornybare ressurser i byggebransjen er ikke bærekraftig, verken for miljøet, eller med tanke på å nå FNs bærekraftsmål nr.12.

3.3.1 Betong

Betong er et blandingsprodukt, sammensatt av sement, tilslag, vann og tilsetningsstoffer. Betong finnes i mange forskjellige kvaliteter, til forskjellige bruksområder. Egenskapene varierer mye basert på sammensetningen av blandingen (Byggforsk, Betong. Typer, egenskaper og bruksområder, 2016). Betong er det mest brukte byggematerialet i vår tid, regnet i volum, og er brukt i alt fra broer til skyskraperne. Generelt sett har betong gode egenskaper mot trykk, og svært dårlige egenskaper mot strekk. I konstruksjoner der betong utsettes for store mengder strekk benyttes armering, ofte i form av stålstenger – og/eller nett. Betong har en oppgitt varmekonduktivitet på 2,0 W/(mK) uten armering, og anslagsvis 2,5 W/(mK) om den er armert. Fuktig betong kan ha høyere varmekonduktivitet. Dette er naturlig, i og med at fukt har direkte innvirkning på et materials lambdaverdi.

Vann spiller en stor rolle i nedbrytningen av betong, som i de fleste andre byggematerialer. Når tilstrekkelig mengde luft og fukt reagerer med betong, vil det over tid senke pH-verdien til betongen, noe som igjen medfører korrosjon av armeringen. Dette kan medføre flere ting, og en av følgene kan være at armeringen blir så korrodert at den mister styrken. En annen effekt dette kan ha på betong over tid, er frostskaider. I tilfeller der betongen er mettet av vann/fukt, for så å bli utsatt for minusgrader, vil dette føre til frostsprengning. Når vannet fryser utvides

det med ca. 9%, noe som lager strekkspenninger i betongen, og om disse strekkspenningene er større enn betongens strekkfasthet, vil frostskafer oppstå. Frostskafer utarter med sprekkdannelse, og at flak i betongen skaller av. Over lengre tid vil frostskaferne ødelegge stadig mer betong om det ikke utbedres.

3.3.2 Kork

Kork er et byggemateriale laget av bark fra korkeik. Treet vokser hovedsakelig sør i Europa- og i Nord-Afrika. Korkeik, som andre trær og planter, bruker fotosyntese når det vokser, noe som betyr at det binder opp CO₂, og fungerer som et lager for karbon frem til det brytes ned (Bartlett, Rusch, Kyrkjeide, Sandvik, & Nordén, 2020). Selv om produksjonen av kork som byggemateriale slipper ut CO₂, kan fortsatt det totale utslippet etter produksjonen være negativt, i likhet med andre heltreprodukter. I byggforskbladet som omhandler varmekonduktivitet og –motstand for byggematerialer er ikke kork oppgitt som et isolasjonsmateriale (Byggforsk, Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper, 2020). Det er altså lite brukt i dagens byggemetoder. Tidligere har kork blitt benyttet som isolasjonsmateriale i betongkonstruksjoner, som oftest limt på betongen (Jelle, 2011). Kork har en varmekonduktivitet på 0,040 – 0,050 W/(mK). Det har gode egenskaper for motstand mot fukt og råte, men kan mugne om det er i direkte kontakt med vann over tid (Bokalders, 2022).

Kork er et biologisk materiale som kan brytes helt ned i naturen (Aarnes, 2023). Resirkulert kork har de siste årene blitt mer utbredt i Norge. Resirkuleringsprosessen går i hovedsak ut på innsamling og resirkulering av vinkorker, men det er nærliggende å tenke at kork fra betongbygg som renoveres også kan brukes. Trondheim kommune har kjørt et testprosjekt der de brukte overskuddsmateriale fra vinkorkproduksjon som fallunderlag i Ferista Barnehage. Overskuddsmateriale males opp til granulat og brukes i stedet for gummigranulat, som er mest brukt. Over lengre tid vil kommunen vurdere om dette er noe som fungerer godt, og om korken i eldre betongbygg kan brukes, er dette et nyttig bruksområde (Kvarme-Joakimsen, 2021).

3.3.3 Steinull

Steinull er en type mineralull som brukes som varme- og lydisolering i bygningskonstruksjoner. Den produseres ved at en spesiell type bergart smeltes opp og spinnes ved hjelp av hjul med økende diameter og omregningstall. Steinfibrene påføres deretter fenollim og formes til plater. Bergarten som benyttes inneholder kvarts, kalk og mindre mengder aluminium-, magnesium- og jernoksid (Nesse, 2019).

Steinulls dimensjonerende varmekonduktivitet er i dag 0,032 – 0,042 W/(mK). Dette gjelder for en fuktbeskyttet bygningsdel. Dette er en verdi som vil variere ut ifra temperatur, densitet og fuktighet. I mineralull spesielt, påvirkes varmekonduktiviteten vesentlig når fuktinnholdet øker, særlig om det også er minusgrader. Ifølge Byggforsk vil ikke varmekonduktiviteten øke når steinullen eldes, noe som betyr at mineralullen i eldre byggverk kan være av like god kvalitet i dag, gitt at den ikke er blitt utsatt for fukt (Byggforsk, Varveisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper, 2020). I 1959, ble det anslått av steinull hadde en varmekonduktivitet på 0,039 W/(mK) (ROCKWOOL, u.år).

Steinull kan gjenbrukes, også gamle materialer, så lenge den ikke er for fuktig, og i rene fraksjoner. I 2022 ble det anslått at 3-7 % av ROCKWOOL`s produkter er fra gjenbruk. Dette kunne i teorien vært 30 %, med de rette returordningene.

3.3.4 Porebetong (Siporex)

Porebetong er et lettbetongprodukt som er fremstilt av kvartsitt, sement, aluminiumspulver og vann. Det har tidligere vært produsert i Norge, men importeres i dag. Porebetong har siden 1950-tallet vært brukt som isolasjonsmateriale, ofte brukt som utvendig isolering med puss utenpå. Porebetong har en porestruktur, noe som gir den særdeles gode absorpsjonsevner. Ved høy RF kan varmekonduktiviteten synke når materialet blir fuktig, så dette er ikke en positiv egenskap for et materiale som brukes på denne måten. I dag er porebetong lite brukt som ytre isolasjonslag, men brukes fortsatt blant annet som isolerende massivvegg. Porebetong med en tykkelse lik 150 mm, har en u-verdi på 0,7 W/(m²K), og i likhet med vanlig betong øker lambaverdien om fuktigheten øker, noe som er vanlig på grunn av de gode absorpsjonsevnene.

I likhet med vanlig betong, kan porebetong også resirkuleres. Det knuses opp og kan brukes som fyllmasser og bærelag. Porebetongen må, for å kunne resirkuleres, ikke være forurenset, og ombruken må finne sted på godkjente byggeplasser, godkjente mottak for materialgjenvinning, eller på godkjente deponi (Wærner, 2016).

3.3.5 Stenderverk – impregnert trevirke

Impregnert trevirke produseres av norsk furu og ble tidligere impregnert med CCA-impregnering (Bergene Holm, u.år). CCA-impregnering består av kobber, krom og arsen-salter, og antas å ha vært brukt i stenderverket på Sentralbyggene. I dag brukes det i større grad Cu-impregnering som inneholder kobbersalter, men ikke krom og arsenikk som i den eldre varianten. Dette gjør den nye varianten i langt mindre grad miljø- og helseskadelig, og kan i prinsippet sorteres sammen med vanlig trevirke, men dette praktiseres ikke fordi det er nærmest

umulig å visuelt skille mellom trevirke impregnert med CCA og trevirke impregnert med Cu (Olsen, 2022). Varmekonduktivitet spesifikt for trevirke er ikke funnet, men furu med densitet lik 450kg/m^3 har varmekonduktivitet på $0,12\text{ W/(mK)}$ (Byggforsk, Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer, 2020). Ifølge Norsk gjenvinning er ombruk av impregnert trevirke forbudt (Norsk Gjenvinning, u.år).

3.3.6 Gips

Gipsplater er et byggemateriale bestående av en kjerne av gips, med kartong eller fibermatter på begge sider (Thue J. , gipsplater, 2021). Gipsplater brukes som ubrennbar- og/eller tennvernende kledning og innvendige flater. Det benyttes også som lydemping i etasjeskillere og vegger. Gipsplater har en dimensjonerende varmekonduktivitet på $0,21\text{ W/(mK)}$ om densiteten er lik 700 kg/m^3 , og $0,25\text{ W/(mK)}$ om densiteten er lik 900 kg/m^3 . Varmekonduktiviteten kan med andre ord variere mellom $0,21\text{ W/(mK)}$ og $0,25\text{ W/(mK)}$ (Byggforsk, Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer, 2020). “Bygg og bevar” skriver at gips er laget av 99 % resirkulerte materialer, og kan gjenvinnes i det uendelige. Levetiden til gipsplater i bruk er 60 år, og på slutten av levetiden kan ca.25 % bli til nye plater (Bygg og bevar, 2019).

Gyproc`s i Fredrikstad bygger for tiden (12.04.23) verdens første helelektriske gipsplatefabrikk, noe som alene gir et redusert CO_2 utslipp fra 23000 tonn til “praktisk talt 0” (Gyproc, u.år). Fabrikkens er verdens første CO_2 -frie gipsplatefabrikk. Den hadde oppstart i februar 2023, men er ikke helt fullført per dags dato.

3.3.7 Diffusjonstett papp

Diffusjonstett papp er en bygningspapp som er gjort særlig tett mot vandampdiffusjon. Dette blir gjort eksempelvis med et sjikt av bitumen mellom to vanlige papplag, eller en kombinasjon av vanlig papp og en tett plastfolie (Thue J. , diffusjonstett papp, 2021). Diffusjonstett papp ble tidligere mye brukt som dampspærre i bygningskonstruksjoner (frem til 1960). I dag brukes gjerne en plastfolie i stedet.

På tegningene av sentralbyggene står det at det er benyttet diffusjonstett papp i ytterveggene. Det bør riktignok nevnes at tiden Sentralbyggene ble bygget (60-tallet) var byggenæringen i gang med å bruke plastfolie fremfor papp, men det antas at det er brukt diffusjonstett papp da

dette står på tegningene. Diffusjonstett papp kan ikke gjenvinnes, og sorteres som restavfall (Lofoten Avfallsselskap IKS, u.år).

3.3.8 Skumglass – FOAMGLAS

Skumglass er et isolasjonsmateriale som er laget av spesialsortert resirkulert glass og naturlige råmaterialer som det finnes rikelig av (sand, dolomitt, kalk osv.). Isolasjonen er helt uorganisk, inneholder ingen stoffer som svekker ozonlaget, tungt antennelige tilsetningsstoffer eller bindemidler (FOAMGLAS, u.år). Skumglass er vanntett, trykkfast, radontett og sertifiserer til Euroclass A1 brannklasse, ubrennbart.

Materialet er også lett, med en densitet på 100 kg/m^3 . Skumglass har varmekonduktivitet lik $0,036 \text{ W/(mK)}$ og er et god alternativ til ordinær mineralull. FOAMGLAS-fabrikken i Belgia opererer også helt uten svinn av materialer. Skumglass kan resirkuleres som glass på godkjent deponi (FOAMGLAS, u.år).

4. Analyse

I dette kapitlet presenteres resultatene fra kartleggingen, og har som mål å skape et mer oversiktlig bilde av den eksisterende byggtekniske situasjonen i S1 og S2. Informasjonen er i all hovedsak basert på dokumenter, bilder og tabeller skaffet av medveileder. Denne informasjonen har vi igjen sammenlignet med observasjoner gjort på ekskursjon, og målsetninger fra BIM-modelleringer.

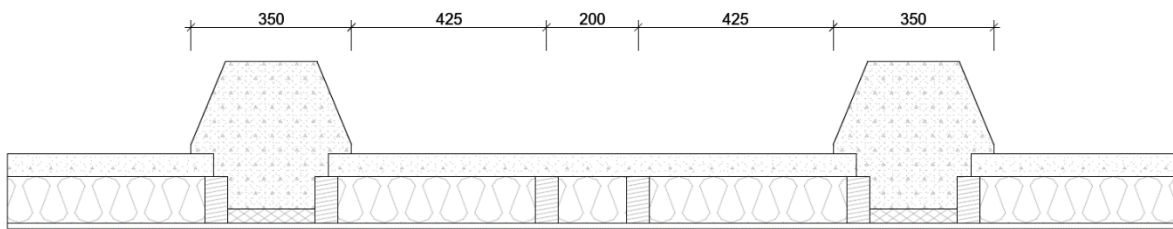
4.1 Sentralbyggenes oppbygning og bæresystem

Som beskrevet i tidligere kapittel består Sentralbyggene av to høyblokker med en høyde på 13 etasjer som sammen med tre lavblokker danner det som er blitt kjent som «flystripa» på campus NTNU Gløshaugen. Høyblokkene ble ferdigstilt og tatt i bruk i perioden 1961 til 1968. Blokkene har i dag hovedsakelig funksjon som kontor- og undervisningslokaler.

Byggenes bæresystem består av plasstøpte armerte søyler, massive betongvegger og dekker. Utover dette er dekkene, de massive gavlveggene og den massive betongveggen på byggenes ene langside, støpt sammen med innvendige betongvegger. Det er hovedsakelig gavlveggene og den ene massive veggen på den ene langsiden som stiver av byggene. Både S1 og S2 har de samme ytre målene, henholdsvis 11.2 meter bred, 41.6 meter lang, og 40.65 meter høy. Høyden er for øvrig målt fra toppen av grunnmuren til toppen av parapeten. Søylerne langs langsiden

har en c/c lik 140 cm, og plassen mellom disse brukes i all hovedsak til vinduer og prefabrikkerte betongplater. Samtlige av byggenes utvendige betongflater er behandlet med puss for å forbedre betongens bestandighet, frostmotstandsevne og tetthet mot slagregn (Byggforsk, Fasadepuss. Valg av pusstype, 2005). Som en arkitektonisk funksjon er pussene fuget med vertikale og horisontale fuger slik at pussene fremstår som inndelt i ulike ruter. Gavlveggene har også innstøpt en friskluftgalle i andre etasje på øst og vestfasade.

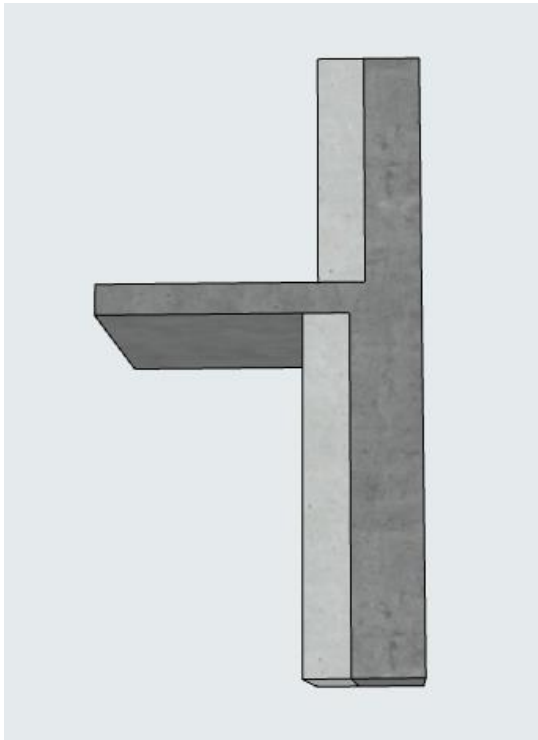
4.1.1 Nord- og sørvendte fasader



Figur 6: Modellering av brystningsvegg inkludert søyler

Innvendig på nord- og sørfasadene, etterfulgt av de prefabrikkerte betongplatene, er det isolert med 100 mm steinull, og søylene er isolert innvendig med 30 mm korkplater. Det er også en veggkonstruksjon av 48x98 mm impregnert konstruksjonsvirke mellom betongsøylene (se Figur 6). Innenfor veggkonstruksjonen og korkplatene er det som dampsperrsjikt montert et lag med diffusjonstett papp, etterfulgt av en 12.5 mm gipsplate. Denne oppbygningen går igjen på store deler av byggenes langside, med unntak av den massive betongveggen på henholdsvis S1s nordlige fasade, og S2s sørlige fasade.

Siden byggeåret har vinduene på langsiden blitt byttet ut, dog på forskjellige tidspunkt. Under ekskursjonen ble det observert årstall i karmen på vinduene, henholdsvis 2004 og 2016. Bare noen få vinduer ble inspisert, men vinduene antas å være i god stand.



Figur 7: Modellering av etasjeskille mellom 6.- og 7. etasje

4.1.2 Vest- og østvendte fasader

Som nevnt fungerer disse veggene som avstivere i byggene. Vest- og østveggene består av plasstøpt armert betong, etterfulgt av et 150 mm tykt lag med "Siporex" porebetong som innvendig isolasjon. Veggene varierer i tykkelse, og blir stadig tynnere oppover i etasjene. Henholdsvis: Kjellerveggene: 38 cm, 1.etasje: 33 cm, 2. og 3.etasje: 28 cm, 4. - 6.etasje: 23 cm og 7. - 13.etasje: 18 cm. Overgangen i gavlveggene er illustrert i *Figur 7*, der fra overgangen mellom 6. og 7. etasje.

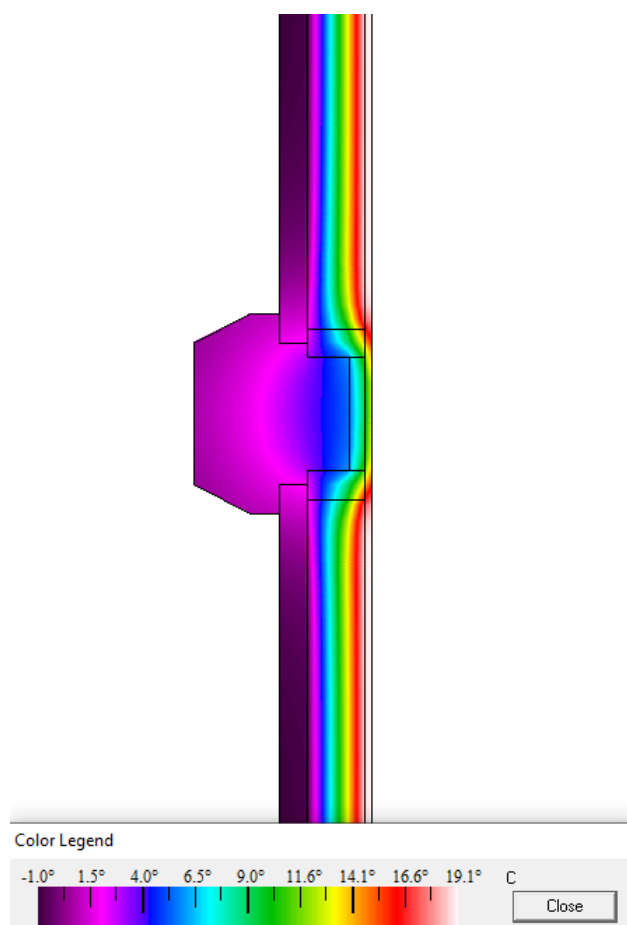
4.2 Sentralbyggenes eksisterende tilstand

På bakgrunn av Sentralbyggenes oppbygning, sammen med data fra termografi, simuleringer og utregninger er det sammensatt en tilstandsrapport for S1 og S2s nåværende bygningsfysiske tilstanden.

4.2.1 Simulering

I simuleringene ble det fokusert på områder i ytterveggene der det er aktuelt med en innvendig oppgradering. Simuleringene er gjort for å skape et inntrykk av ytterveggenes prestasjonsevne etter 60 år uten nevneverdig endring. Temperaturen i simuleringene er satt til henholdsvis -2°C utvendig, og 20°C innvendig. Grunnen til dette er for å se best mulig sammenligningsgrunnlag med termografien, siden dette var forholdene når denne ble gjort. Varmekonduktiviteten som er brukt for hvert enkelt materiale er basert på lignende materialer i dag, om det ikke var reelle tall fra bygningsåret å finne. Eksempelvis viste det seg vanskelig å finne en oppgitt varmekonduktivitet for korkpanel. I tillegg til en tilstandsoversikt, ble simuleringene brukt som en pekepinn på hvor mye av isolasjonsevnen som har forsvunnet siden byggene var nye. Dette

gjøres ved å sammenligne med resultater fra termografi, og se etter avvik i overflatetemperatur. Her må det presiseres at det er mange faktorer som spiller inn i en termografi, men det gir likevel et hint.



Figur 8: THERM-modellering brystningsvegg inkludert søyle

Figur 8 viser et snitt av en betongsøyle, med en prefabrikkert betongvegg på begge sider. I denne simuleringen er det er en markant høyere varmestrøm der søylen står. Dette er en kuldebro som ikke vil oppdages ved termografi tatt fra utsiden, selv om det er et åpenbart energitap. Det skyldes søylens store volum, som sørger for at utvendig overflatetemperatur er tilnærmet lik over hele snittet (Figur 8). Videre ser en at søylene opptrer som en stor kuldebro, dette er en tilstand med stort forbedringspotensial, da søylene står med en c/c 140 cm. Det finnes ikke termografibilder av et tilsvarende område fra innsiden av sentralbyggene, men simuleringen viser at dette er et interessant og nødvendig område å oppgradere om TEK17-kravet for u-verdi skal nås.

Resultatene fra simulering ble som følger:

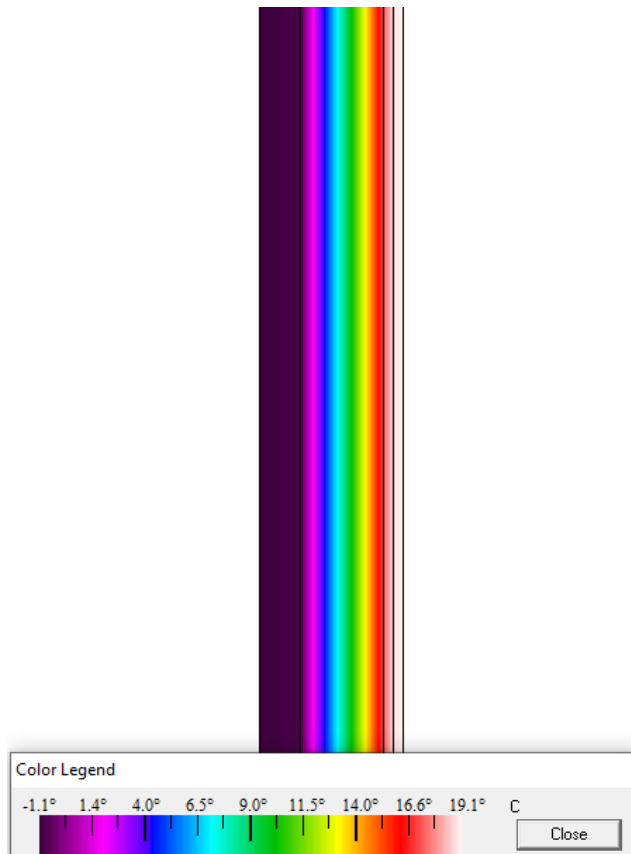
Simulering:

- Utvendig overflatetemperatur: $-0,9^{\circ}\text{C}$, noe høyere enn utvendig temperatur på -2°C
- Utvendig overflatetemperatur søyle: $0,7^{\circ}\text{C}$, noe høyere enn den isolerte delen mellom.
- Innvendig temperatur midten av søyle: $12,4^{\circ}\text{C}$, langt lavere enn innvendig temperatur.
- Innvendig temperatur isolert del: $19,1^{\circ}\text{C}$, noe lavere enn innvendig temperatur.

Utover dette er det grunnet byggenes alder rimelig å anta at konstruksjonen kan være utett, noe som kan bidra til større varmetransport. I tillegg til at degenerering i form av riss i betongen,

eller sig i isolasjonen også kan være en faktor. Kort oppsummert er dette snittet en nødvendig del av en innvendig oppgradering.

Videre er det blitt simulert et snitt av den prefabrikkerte betongveggen mellom søylene, Dette er gjort for å undersøke veggens varmestrøm og u-verdi. I dette snittet, som ikke inneholder noen form for “forstyrrelser” i form av søyler eller dekker, ser man naturlig nok en jevn

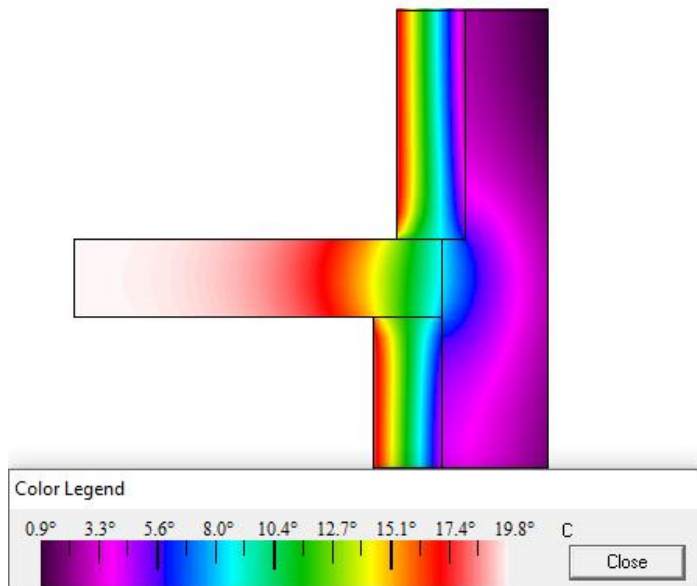


Figur 9: THERM-modellering brystningsvegg uten søyle

simuleringen viste det samme som i Figur 9. Det er behov for oppgradering av ytterveggene for å minimere kuldebroer, og for å bedre energieffektiviteten.

Videre ble det sett på overgangen mellom 6. og 7.etasje i gavlveggen. Som en ser på Figur 10, er det et betydelig varmetap inn i etasjeskillet i betongen. I overgang mellom etasjeskille og innvendig side av gavlveggen er temperaturen 13,3°C, mens den utvendige overflatetemperaturen i samme område er 2,6°C. Begge disse temperaturene vitner om dårlig

varmestrøm fordi sjiktene har oppbygning. Det ble avdekket store avvik i temperatur i simulering og termografi, noe som bekrefter antagelsen om tilleggstep av varme. Denne simuleringen blir i hovedsak vist for å synliggjøre den store forskjellen mellom teoretisk isoleringsevne og faktisk isoleringsevne i en vegg som har stått uendret siden 1960-tallet. Videre må det presiseres at beregningene vil være noe unøyaktig, både på grunn av degenerering av isoleringsmaterialene, men også fordi overflateforholdene er forenklet i THERM. I tillegg må det nevnes at termograferingsbildene er tatt fra bakkenivå, noe som gir en mindre nøyaktig avlesing. Resultatene fra denne



Figur 10: THERM-modellering etasjeskille 6.- og 7.etasje

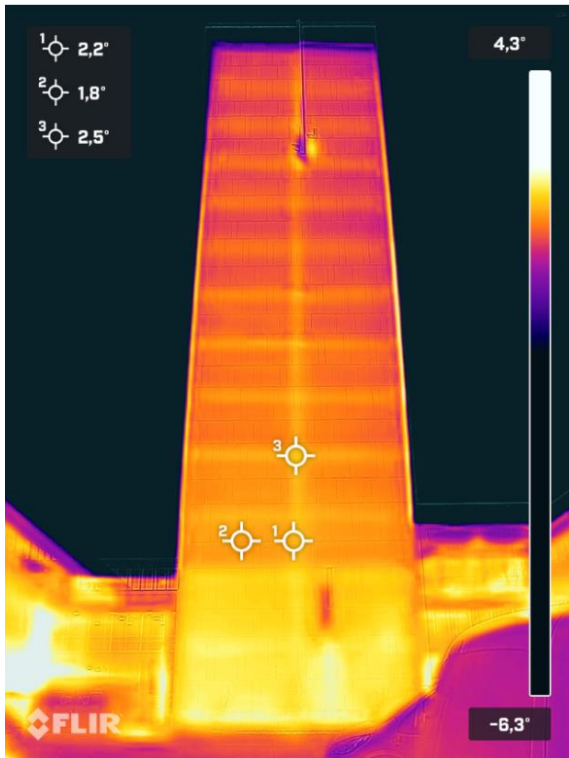
utgjør det ingen forskjell i overflatetemperatur. Her må det presiseres at en innvendig isolering av ytterveggen ikke vil eliminere kuldebroen alene. Det ville i dette tilfellet vært nødvendig med en ytterligere reovering av innvendige gulv og tak for å oppnå tilfredsstillende kuldebroverdier.

4.2.2 Termografi

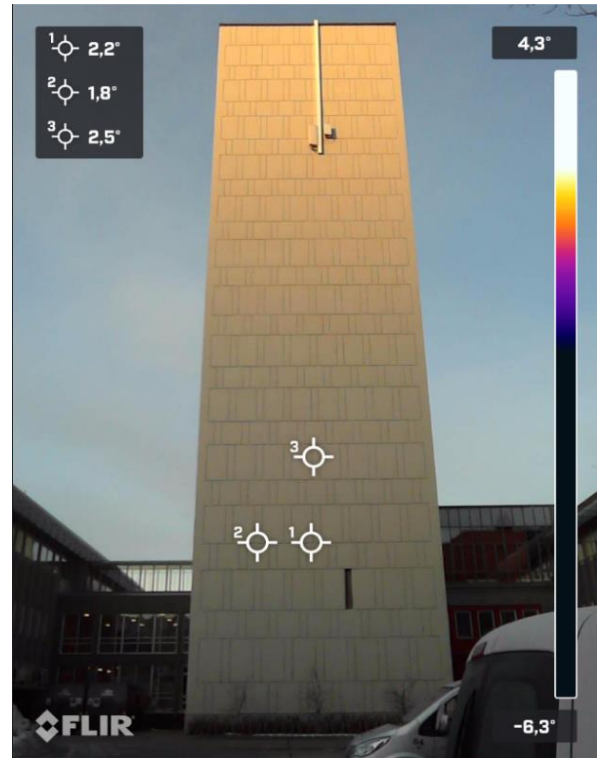
Termografiene er skaffet av medveileder og er tatt før denne oppgaven ble skrevet, men brukes som et sammenligningsgrunnlag for kartlegging av tilstanden til ytterveggene i S1 og S2. Som en kan se på *Bilde 3* og *4* er det enkelt å se hvor dekkene er plassert i gavlveggen. På *Bilde 4* ser en tydelige gule linjer der dekkene går, noe som representerer et varmetap. Disse bildene er tatt på S1s østside, men forholdene antas like for S2.

Videre ble det tatt termografi av S1s sørlige fasade for å få et bedre inntrykk av isoleringsevnen i langveggene. Også her ser en tydelig hvor dekket går, men også kuldebroen rundt vinduer og søyler. På markør 3 i *Bilde 5*, er det en tydelig kuldebro på krysningspunktet mellom søylen og dekket. I dette punktet målte apparatet $5,9^{\circ}\text{C}$, noe som vitner om et stort varmetap da utetemperaturen dagen målingene ble tatt var -2°C . Dette kan skyldes degenerering av isolasjonsmaterialet eller høyt fuktnivå.

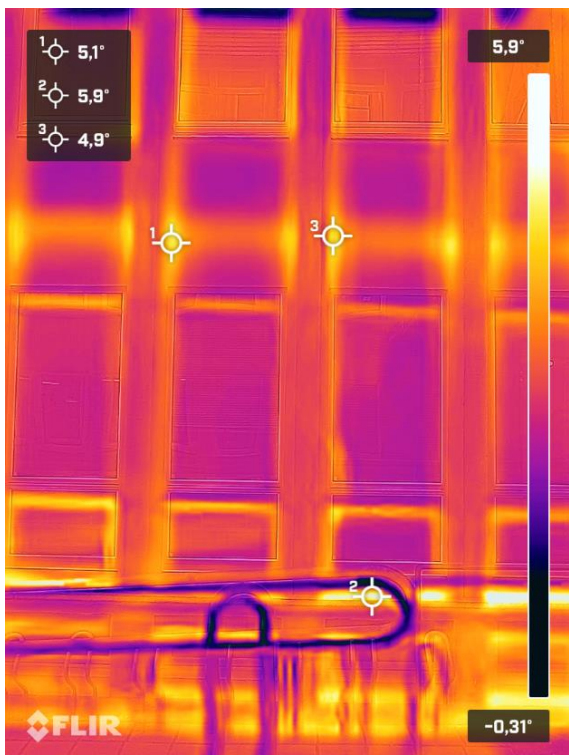
isoleringsevne, og underbygger hypotesen om at etterisolering er nødvendig. THERM beregner u-verdi for denne veggen i 6.etasje til $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ med en innvendig overflatetemperatur på $17,7^{\circ}\text{C}$. Den samme veggen i 7.etasje får en u-verdi på $0,82 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ med samme overflatetemperatur som i 6.etasje. Dette tydeliggjør viktigheten av innvendig isolasjon for denne veggen. Selv om betongens tykkelse i dette snittet er 5 cm tynnere i 7.etasje,



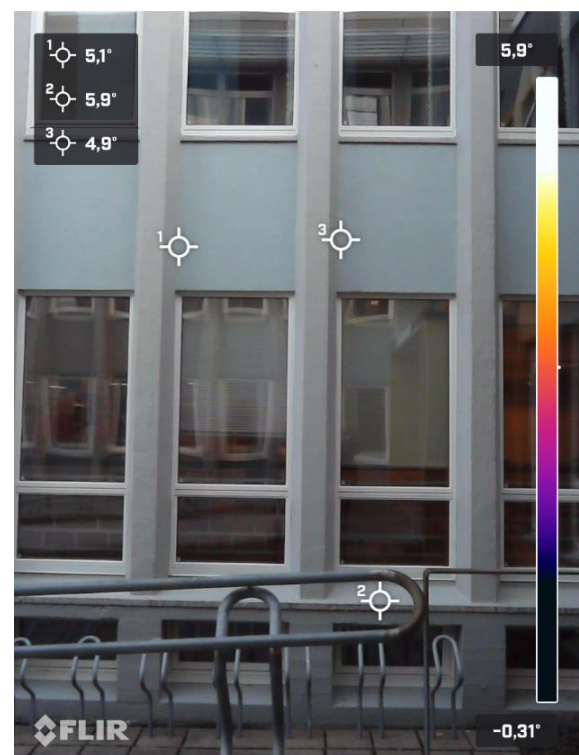
Bilde 4: Termografi fra S1s østgavl, med farge



Bilde 3: Termografi fra S1s østgavl, vanlig



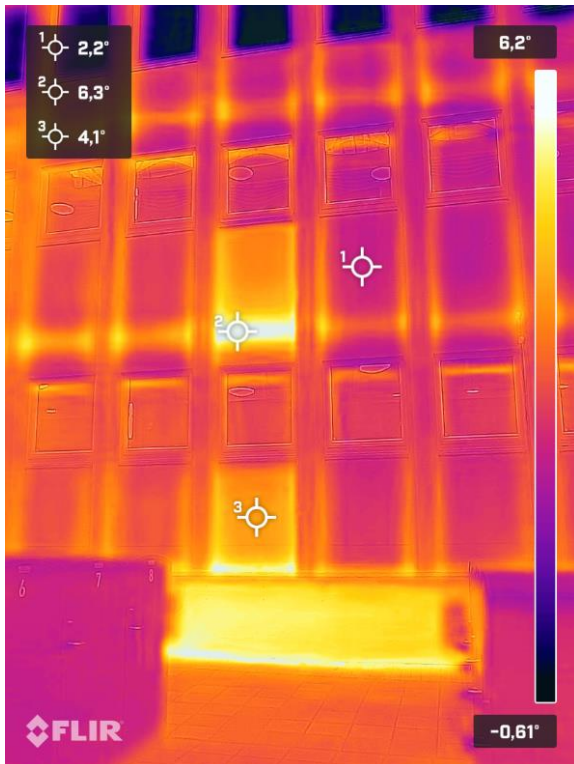
Bilde 6: Termografi fra S1s sydlige fasade, med farge



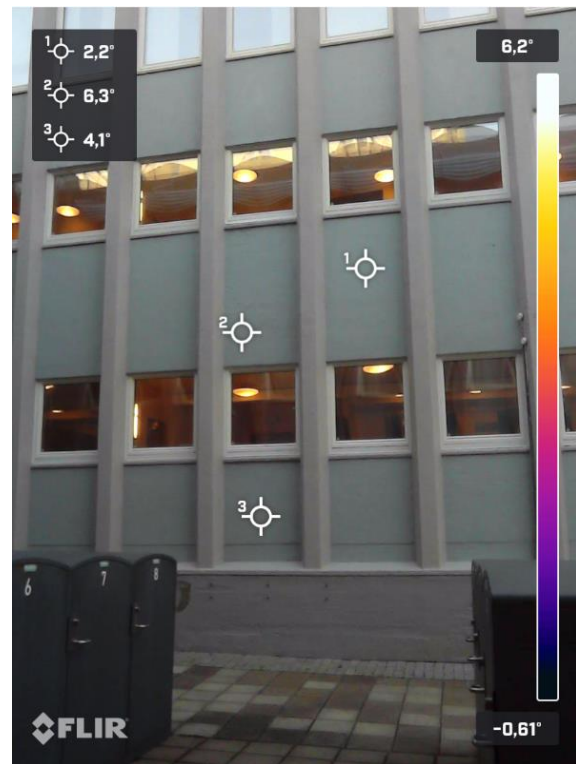
Bilde 5: Termografi fra S1s sydlige fasade, vanlig

I *Bilde 7* ser man et spesielt stort varmetap i markør 2. Bildet er tatt på S1s nordlige fasade, ved inngang vest. I dette tilfellet er det mer enn degenerering som spiller inn. Man ser tydelig på

bildet hvor dekket går, med den tydelige gule linjen horisontalt i bildet. I punkt 2 ble det målt en overflatetemperatur på $6,3^{\circ}\text{C}$ mot utetemperaturen på -2°C , dette sammen med en sammenligning med veggen der punkt 1 er plassert, vitner om svært dårlig isolasjonsevne i en avgrenset del av veggen som ikke er sammenlignbar med de nærliggende like områdene. Det er utfordrende å si nøyaktig hvorfor dette har skjedd, men det er nærliggende å anta at svært høye fuktnivå eller manglende isolasjon er grunnen.



Bilde 7: Termografi fra S1s nordlige fasade, inngang vest, med farge



Bilde 8: Termografi fra S1s nordlige fasade, inngang vest, vanlig

4.2.3 Monitorposisjon

Plasseringen av Monitorpunktet i beregningen ble valgt der betongen møter isolasjonsmaterialet på innsiden i de ulike konstruksjonsdelene som ble simulert. Dette punkt blir oftest ansett som kritisk med tanke på risiko for kondensering og muggvekst i innvendige isolerte betongvegger.

4.2.4 Inndata i WUFI-simuleringer

For å utføre en analyse som representerer sentralbyggenes tilstand bestemmes en rekke inndata i programmet. Ved å bestemme relevant klima, overgangskoeffisienter, høyde og orientering kan man anta at simuleringsresultatene representerer byggets fukttekniske situasjon.

Overflatenes overgangskoeffisient bestemmer hvordan bygget blir påvirket av ytre påkjenninger. Koeffisientene er avhengig av materialegenskapene til byggets fasader, og bestemmes av farge, og motstand mot ytre klimapåkjenninger. Overgangskoeffisientene er valgt ut fra de eksisterende materialene på dagens konstruksjon. De valgte overgangskoeffisientene sammen med resten av de brukte inndataene blir presentert i *Tabell 3*.

Parameter	Valgt inndata	Forklaring
Orientering	Nord/Sør/ Øst/Vest	Valgt etter himmelretning på konstruksjonsdel
Helning på vegg	90°	
Bygningshøyde/slagregnkoeffisient	Høy bygning	Valgt etter konstruksjonsdelens høyde
Varmemotstand utside	0,0588	Yttervegg
Sd-verdi utside	-	Valgt puss med representativ sd-verdi som en konstruksjonsdel
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	0,4	Puss, normalt lys
Langbølget strålingsbalanse	-	
Eksplisitt strålingsbalanse	-	
Terreng. Kortbølget refleksjonsgrad	0,2	Standardverdi
Regnvannabsorpsjonstall	0,7	Avhengig av komponenthenting
Varmemotstand innside	0,125	(Yttervegg)
Starfuktighet i konstruksjonen	I hvert enkelt sjikt	Benyttet typisk byggfukt for de ulike materialene
Starttemperatur i konstruksjonen	20°	
Klima utside	Trondheim; NBI/NTNU	
Klima innside	ISO 13789	Middelverdi: 20°, Fuktklasse 2

Tabell 3: Inndata brukt i WUFI-beregninger

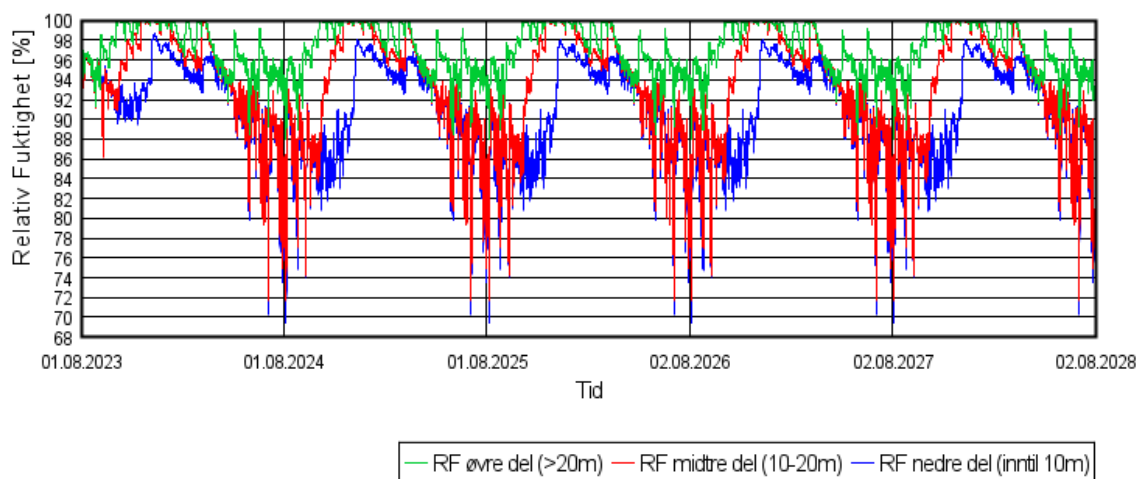
4.2.5 WUFI-simulering

Det har blitt gjennomført simuleringer i WUFI for å undersøke risiko for fukt og mugg i sentralbyggene med den antatte oppbyggingen av ytterveggene. Det ble valgt å simulere

brystningsvegger og søylene på nord- og sørfasadene på sentralbyggene, og gavlveggene mot øst og vest. På grunn av at sentralbyggene er relativt høye i forhold til omliggende bygg, ble simuleringer av brystningsvegger og søyler ble det simuleringen delt inn i tre høyder. De tre høydene er nødvendig da klimapåkjenningen på bygget vil være større på de øvre etasjene. WUFI definerer de ulike klimapåkjenningene etter høyde, der nedre del representerer høyder inntil 10 meter over bakken, midtre del representerer mellom 10 og 20 meter over bakken og øvre del defineres som høyder over 20 meter. Simuleringen av gavlveggene bruker også denne inndelingen i simuleringen, men da gavlveggene har ulike tykkelser av betong etter etasje, ble simuleringen av gavlveggene delt et inn etter etasjenummer og høyde over bakken.

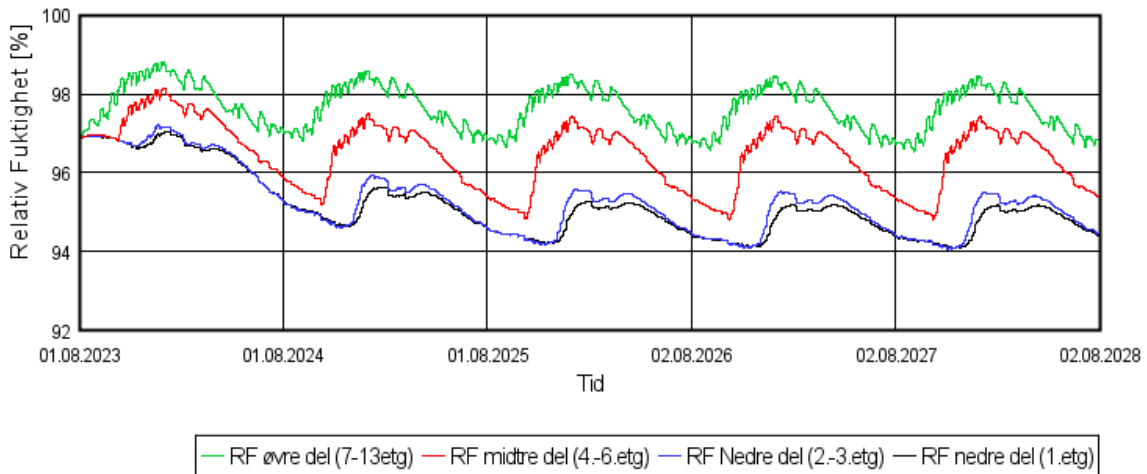
Alle gjennomførte simuleringresultater finnes i vedlegg 3. Videre kommer et utvalg av simuleringresultater fra de ulike fasadene.

Relativ fuktighet sørfasade



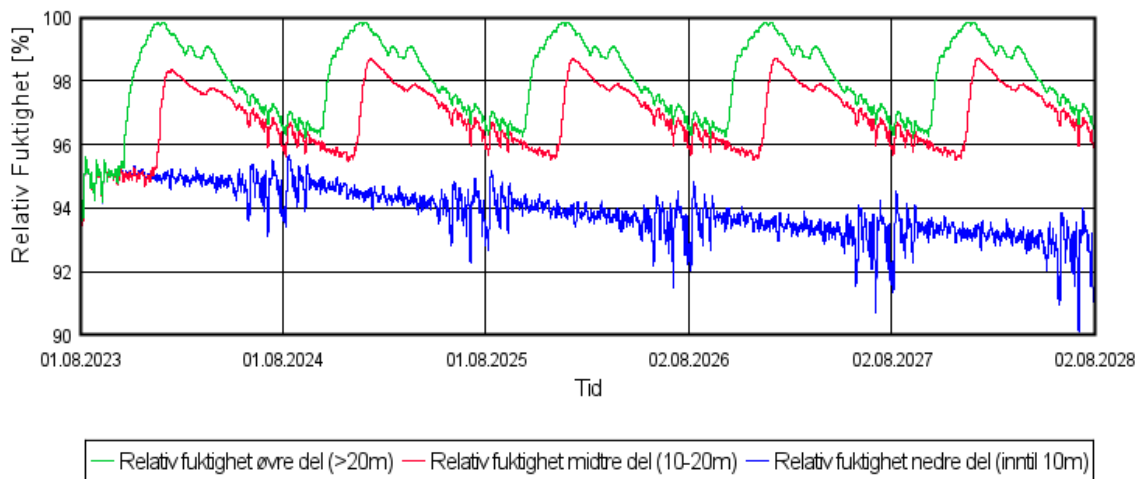
Figur 11: Relativ fuktighet i brystningsvegg i fasade mot sør

Relativ fuktighet vestfasade



Figur 12: Relativ fuktighet i monitorpunkt i fasade mot vest

Relativ fuktighet søyler sørfasade



Figur 13: Relativ fuktighet i monitorpunkt i søyler mot sør

Ut fra simuleringsresultatene kan man se at den relative fuktigheten er veldig høy, og ligger mesteparten av tiden mellom 80 til 100% noe som gir gode forhold for muggvekst (Byggforsk, 701.401 Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimaet, 2005). Dermed kan man anta ut fra disse simuleringsresultatene at det er stor risiko for muggvekst, og man kan se på de øvre etasjene når den relative fuktigheten 100 prosent ved flere tilfeller i løpet av et år. Når den relative luftfuktigheten når 100 prosent kommer vann til å kondensere i dette sjiktet, og kan føre til skader på materialene i veggen. Brystningsveggen og søylene er antatt å inneholde organiske celluloseholdige materialer som stenderverk av tre og mineralull, noe som kombinert med den høye luftfuktigheten gir stor risiko for råte og muggskader i veggen

(Byggforsk, 701.401 Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimate, 2005).

4.3 Eksisterende tilstand på materialer

Dette kapittelet inneholder en vurdering av de relevante eksisterende materialene brukt i S1 og S2. Grunnlaget for vurderingen gjøres med moderne materialer som utgangspunkt, men også det faktum at disse materialene var nye på 1960-tallet. Videre antas det at det foreligger et forhøyet fuktnivå i veggene, som vist i vedlagte WUFI simuleringer.

Betong

Betongkonstruksjonene i S1 og S2 antas å være modne for rehabilitering og/eller resirkulering. Betong kan resirkuleres, og dette vil under en renovering spare uttak av nytt råmateriale. Byggenes fasade uteblir fra denne tilstandsvurderingen, fordi fasadene innehar verneklasse C (Trondheim Kommune, Kulturminnekartet, u.år). Utover dette utgjør også byggenes betongsøyler en stor del av det utvendige inntrykket, og utelates også fra tilstandsvurderingen.

Kork

Korkplatene i byggenes yttervegger antas på grunnlag av simuleringer å ha høyere fuktnivå enn ønskelig. Kork er et materiale som tåler fukt godt, men som nevnt i materialgjennomgangen er det fare for mugg som korken er fuktig over tid. Det er derfor ikke beregnet i denne oppgaven hvordan kork ville fungert i en rehabiliteringssituasjon. Det antas altså at korken skal fjernes i sin helhet. Neste alternativ i avfallshierarkiet er derfor resirkulering. Alternativene innen dette er dekket i materialgjennomgangen.

Steinull

Byggenes steinull ble vurdert på grunnlag av simuleringer og termografi. I termografiene ble det avdekket områder der det er uvanlig høy varmestrøm, noe som tyder på dårlig isoleringsevne. Steinull er det eneste isoleringsmaterialet som er brukt i veggene mellom søylene, og dette, sammen med termografiene, vitner om stor degenerering i materialet. Videre ble det oppdaget store avvik mellom overflatetemperaturene i simuleringer og termografier, noe som underbygger hypotesen ytterligere. Steinullen blir derfor i denne oppgaven regnet som uskikket som isoleringsmateriale i en renovering.

Gjenbruk av steinull, er ifølge ROCKWOOL noe som utføres, så lenge isolasjonen ikke er for fuktig, og i rene fraksjoner (ROCKWOOL, u.år). Dette ville naturligvis vært det beste alternativet.

Porebetong (Siporex)

Porebetongen brukt i byggenes gavlvegger antas, som de andre indre isolasjonsmaterialene, å ha høyere fuktnivå enn optimalt. Porebetongen kunne i prinsippet blitt tørket ut og gjenbrukt under renoveringen, men dette er ikke ønskelig grunnet u-verdikravet som skal nås. Porebetongen innehar for høy varmekonduktivitet for å nå TEK17-kravet om u-verdi. Det vil si, det er gjennomførbart, men er lite hensiktsmessig grunnet den nødvendige tykkelsen for å nå dette kravet.

Byggenes porebetong har naturligvis også en bærende effekt for konstruksjonen. Dette vil i en renovering overføres til en enkelt bærende del i form av stålbjelker. Noe som åpner muligheten for bruk av ikke-bærende isolasjonsmaterialer med lavere varmekonduktivitet.

Porebetongen vurderes derfor som lite hensiktsmessig til videre bruk i en renoveringssituasjon.

Porebetong, i likhet med andre betongprodukter, kan resirkuleres. Dette er utdypet tidligere i materialgjennomgangen.

Stenderverk – impregnert trevirke

Stenderverket i S1 og S2 antas å være CCA-impregnert trevirke. Anslått levetid på slike materialer er mellom 50 og 100 år (Bergene Holm, u.år). Noe som betyr at stenderverket i byggene går mot slutten av levetiden. Levetiden påvirkes også av eksterne forhold, noe som etter antagelsene om høyt fuktinnhold i veggene, sannsynligvis vitner om kortere levetid enn maksimalt.

Stenderne har dessuten minimal bærende effekt, noe som gjør utskiftning i en renovering betydelig enklere. Selv om stenderne antas å være CCA-impregnert trevirke, er dette umulig å vite sikkert uten åpning av veggene, og det er derfor en sjanse for at impregneringen er helseskadelig. Dette ville i så tilfelle vært god grunn alene til fjerning av stenderverket. Uansett er impregnert trevirke en utfordrende bygningsdel å redusere avfallet for.

Det eksisterende stenderverket vurderes som en bygningsdel som trenger oppgradering, og som med fordel kan byttes ut for bedre alternativer, selv om sjansen for helseskadelig impregnering er tilstedeværende.

Diffusjonstett papp/dampsperre

Den eksisterende forhudningspappen brukt i sentralbyggene inneholder sannsynligvis PAH³. Materialer med PAH kan ikke resirkuleres og regnes som farlig avfall (Norsk Gjenvinning, u.år). PAH er både skadelig å håndtere for mennesker, og skadelig for miljøet. Utover dette finnes det i dag langt bedre alternativer for diffusjonstetting, som med fordel kunne blitt brukt i en renovering av S1 og S2.

Eksisterende papp anses etter vurderingen derfor som uegnet som byggemateriale i renoverte bygg.

Gips

Eksisterende gipsplater i S1 og S2 antas på bakgrunn av alder å være modne for utskiftning. Gipsplatene kunne i utgangspunktet blitt demontert og gjenbrukt, men det anses som svært lite sannsynlig at er gjennomførbart.

Samtidig er markedet for resirkulerte råvarer som gips et stadig voksende felt. Gips er en av de sentrale fraksjonene for at bransjen skal møte de kommende EU-kravene til materialgjenvinning. Å materialgjenvinne den type avfall er derfor et viktig tiltak både for byggebransjen og en sirkulær økonomi (Avfall Norge, 2019).

Gipsplatene vurderes derfor som lite hensiktsmessig å gjenbruke under renoveringen, og bør resirkuleres.

5. Resultater

Dette kapittelet inneholder drøfting omhandlende resultatene og renoveringsforslagene presentert i forrige kapittel. I tillegg er det en gjennomgang av eventuelle feilkilder og usikkerheter i arbeidet mot resultatet.

5.1 Resultatdrøfting

Etter gjennomgang av dokumentasjon og annen relevant teori som vist i denne oppgaven er det kommet frem til at S1 og S2 kan antas å generelt sett være dårlig isolerte bygg. Langt dårligere enn dagens TEK17-krav. Dette antas etter gjennomgang av isolasjonstykkelse, termografi, u-

³ Polysykliske aromatiske hydrokarboner. Helse- og miljøskadelig stoff som finnes i bla. eldre forhudningspapp.

verdier og simuleringer. Informasjonen inneholder ingen data som tilsier at materialene er byttet ut siden bygningsåret. Materialenes høye alder kan være grobunn for degenerering og nedsettelse av materialenes opprinnelige egenskaper, herunder isoleringsevne. Dette kan også være grunnen til at det teoretiske varmetapet er lavere enn det reelle.

Generelt har også S1 og S2 mange kuldebroer, noe som har stor innvirkning på varmetapet og energiforbruket. Disse befinner seg i all hovedsak i byggenes betong, spesielt i nord- og sørfasadenes søyler, og øst- og vestfasadenes etasjeskiller og innervegger. Dette er massive betongkonstruksjoner og leder derfor varmen uhindret ut i det fri. Om man lykkes i en innvendig renovering kan noen disse kuldebroene forbedres betraktelig, eller elimineres. Under simuleringene i denne oppgaven ble det stadfestet at kuldebroene som har størst innvirkning på varmetapet er etasjeskiller mot de massive gavlveggene, og betongsøylene på nord- og sørfasadene. Kuldebroene i gavlveggene lar seg ikke forhindre kun ved en innvendig isolering av ytterveggene, da varmen alltid vil ta minste motstands vei gjennom betongen i dekkene, selv om ytterveggene har u-verdi innenfor TEK17-kravet. Grunnet oppgavens begrensning er ikke dette vektlagt som en egen del i denne oppgaven, da dette innebærer en innvendig isolering av tak, gulv og innervegger i kontakt med gavlveggene, som ikke skal evalueres her. Varmestrømmen i dekkene kan sees i THERM-filen *Etasjeskille* i informasjonsbiblioteket. Kuldebroene i søylene på sin side lar seg nærmest eliminere med en innvendig isolering av ytterveggene, og er derfor vektlagt i større grad. I en ideell situasjon ville utvendig renovering også vært en del av forslaget, men verneklasse C, sammen med oppgavens avgrensinger gjør dette utfordrende, dette setter i dette tilfellet noen begrensninger for resultatet.

Fuktsimuleringene av den eksisterende tilstanden viser også forhøyede RF-nivå i porebetongen i gavlveggene, og isolasjonen i brystningsveggene. Dette er tilstander som påvirker veggens isoleringsevne som nevnt tidligere i oppgaven. Risikoen for fuktproblemer er antatt størst på nordfasadene grunnet lite sol, og derfor lavere uttørking. Men etter simuleringer har det kommet frem at det også er stor risiko på sørfasadene, noe som kommer av oppfukning av betongen fra slagregn. Dette er problemer som kan la seg utbedre ved valg av riktig sjiktoppbygning i en renovering. Renoverte yttervegger vil med økt isoleringsevne og tetthet vil redusere klimaavtrykket, energibehovet og risikoen for fukt i byggene.

Gavlveggene er som nevnt isolert med porebetong som eneste isolasjonsmateriale. Under fuktsimulering ble det observert svært høye RF-nivå i overgangen mellom porebetong og de prefabrikkerte betongplatene. Dette senker porebetongens isolasjonsevne, grunnet vanns høye

varmeovergangskoeffisient, noe som forverrer u-verdien ytterligere enn den teoretiske u-verdien. Porebetong er som nevnt resirkulerbart og kan demonteres uten store bieffekter for et eventuelt klimaregnskap. Renovering av gavlveggene kan innebære en stor økning i isolasjonstykkelse, noe som også kan øke risikoen for fuktproblemer ved en innvendig etterisolering. Ved en slik renovering er man derfor nødt til å vurdere det reduserte varmetapet opp mot den økte risikoen for fukt.

Vinduene i byggene ble inspisert under ekskursjon og det ble fastslått at vinduene på S1s sørfasade er fra 2004, mens vinduene på nordfasaden er fra 2016. Vinduene fra 2004 er ikke TEK17-standard, men har fortsatt noen år igjen av forventet levetid. Vinduene fra 2016 har trelags-glass og antas å holde god standard etter dagens regelverk. Under en innvendig renovering kan det være behov for demontering av vinduene, men disse kan brukes også etter en oppgradering. Om det bestemmes at vinduene skal byttes ut kan de fortsatt gjenbrukes et annet sted.

S1 og S2s inneklime er antatt å være generelt dårlig. Etter samtale med ansatte og brukere av kontorer i de øvre etasjene er det tydelig at luftkvalitet og temperatur er et problem. Dette skyldes høyst sannsynlig en kombinasjon av ytterveggens eksisterende situasjon, og gammelt ventilasjonsanlegg. En renovering av ytterveggene antas i dette tilfellet å over tid kunne forbedret inneklime betraktelig. Inneklimeet i disse byggene er en viktig grunn til å gjennomføre en renovering. Dagens inneklime i S1 og S2 er ikke bærekraftig for videre bruk, ifølge brukerne er det nødvendig med utlufting hele døgnet for å holde en luftkvalitet det er forsvarlig å arbeide i.

5.2 Usikkerhet og feilkilder

Informasjonen innhentet om S1 og S2 er svært gamle tegninger. Tegningene er tidvis direkte motsigende hverandre, noe som resulterer i en viss usikkerhet rundt oppbygningen. Usikkerheten er forsøkt minimert ved å sjekke flere tegninger opp mot hverandre, i tillegg til å i utgangspunktet vektlegge nyeste tegning eller informasjon. Eksempelvis er det usikkerhet rundt hvilke isolasjonsmateriale som er benyttet i byggenes gavlvegger, da det finnes tegninger som underbygger både porebetong og mineralull. I denne situasjonen ble det rådført med medveileder og bestemt at det skal tas utgangspunkt i at porebetong er benyttet. Det samme gjelder nøyaktige snitt i kritiske deler av konstruksjonen som hjørner og overganger.

Termografiene som er tatt av byggene er også grobunn for usikkerhet. Bildene er ikke tatt i ideelle forhold, og det var heller ikke å finne termografier fra innsiden for å sammenligne.

Dette burde vært gjort, og hadde vært spesielt nyttig i forbindelse med denne oppgaven. Bildene er også tatt om morgenen mellom klokken 08 og 09, noe som innebærer en høyere risiko for fuktdannelse, som kan gi feilaktige resultater.

Når det kommer til materialegenskaper og varmekonduktivitet for de eksisterende materialene er det innhentet informasjon fra kilder, men det er i all hovedsak stor tvil rundt om disse stemmer med den reelle situasjonen. Om verdiene er feil kan dette gi store avvik i simuleringene, og er ikke sammenlignbart med virkeligheten. Dette er en grunnleggende usikkerhet i oppgaven

5.3 FoU-kapittel

Det finnes en rekke eksisterende bygningsmasse i Norge og Europa som ikke oppfyller dagens krav til energieffektivitet, og som har et behov for oppgradering. I noen tilfeller kan fasader være beskyttet av verneverdige årsaker og utvendig isolering vil dermed ikke være en mulighet. Derfor kan deler av denne analysen være relevant til å utvikle løsninger som kan benyttes når fasader av mur og betong ikke kan endres utvendig og er nødt til isoleres på innvendig side. Disse løsningene kan være relevant å bruke til å gjennomføre bærekraftige oppgraderinger av eksisterende bygg.

Analysene gjennomført i oppgaven kan knyttes til forskningsprosjektet: NTNU Campus, Knowledge Axis Trondheim et pilotprosjekt for FME ZEN. Gjennom arbeidsprosessen har det blitt gjennomført analyser av eksisterende ytterveggs konstruksjonsdeler på campus Gløshaugen, og utviklet et forslag på hvordan yttervegger av betong kan etterisoleres for å oppfylle krav satt i byggeteknisk forskrift. For å redusere klimaavtrykket fra bygningsnæringen er det nødvendig å finne gode løsninger for energieffektivisering av eksisterende bygg, da oppgradering av eksisterende bygg har et mindre klimaavtrykk enn å rive og bygge nytt. Data utviklet i denne rapporten kan brukes videre som en del av å nå målet til å oppgradere eksisterende bygg mot en ZEB-standard.

I forslaget til oppgradering er det valgte isolasjonsmaterialet FOAMGLAS, som er et celleglassisolasjonsmateriale som er vanntett, dampnett og uorganisk. Selv om materialet har en rekke egenskaper som kan anses som gunstige, er det fortsatt lite utprøvd og brukt i Norge. Årsaken for dette kan være at materialet har en relativ høy pris, men det kan også antas at manglende erfaring- og forskningsgrunnlag i den norske byggenæringen er en grunn for at andre materialer blir valgt. Materialet er i tidlig fase på utprøving i Europa, men virker lovende til bruk i konstruksjoner der kun innvendig isolering er mulig. Det finnes i dags dato ikke en

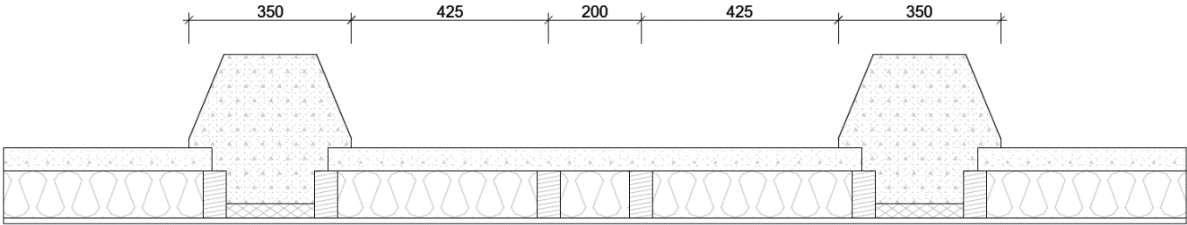
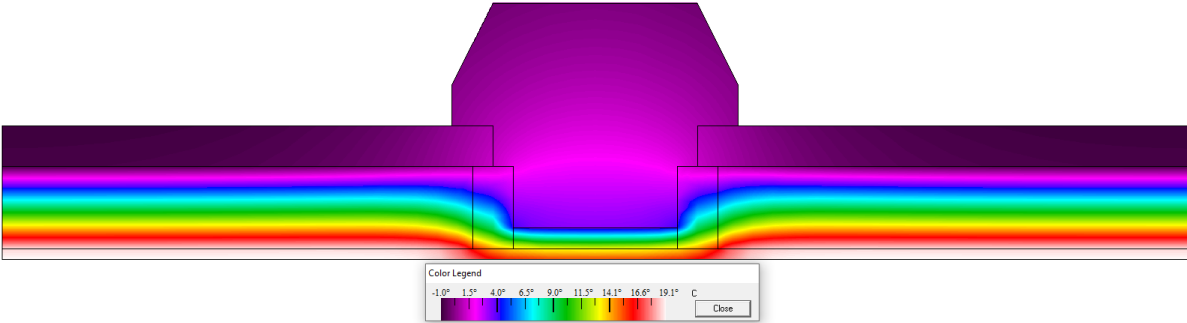
norsk teknisk godkjenning av produktet, og det er dermed noe usikkert på hvordan materialet reagerer over tid når det blir utsatt for nordisk klima. Materialet er i seg selv diffusjonstett men har skjøter som må tettes og festes med egnet bitumen lim, og det er usikkert om hvordan dette limet vil degenereres over tid. Det er utført et lite antall norske tester om hvordan dette limet reagerer i utfordrende situasjoner og etter aldring. Med flere norske studier og en teknisk godkjenning i Norge kan materialet være svært lovende for bruk til innvendig isolering i nordisk klima.

6. Konklusjon

I dette kapitlet følger en konklusjon for oppgaven. Denne er tatt på bakgrunn av oppgavens analyse og vurdering av den eksisterende tilstanden til S1 og S2.

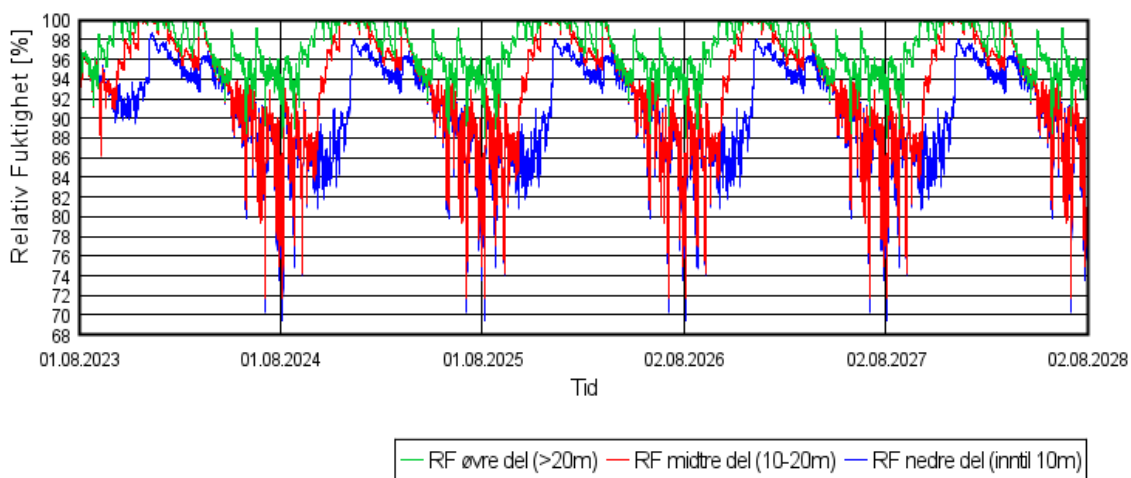
Den materialtekniske tilstanden i S1 og S2s yttervegger er antatt generelt dårlig. Det ble gjennom nøye analyse og vurdering av materialer, konkludert med at det er nødvendig med en totalrenovering av Sentralbyggenes yttervegger. Dette kan for brystningsveggene gjennomføres ved å demontere eksisterende gipsplater, mineralull, kork og diffusjonstett papp. Deretter kan det monteres FOAMGLAS og nye gipsplater i tråd med monteringsanvisning og regelverk. For gavlveggene kan renoveringen gjennomføres ved rivning av eksisterende gipsplater og porebetong, for deretter å montere FOAMGLAS og gipsplater, i likhet med brystningsveggene.

6.1 Oppgraderingsforslag

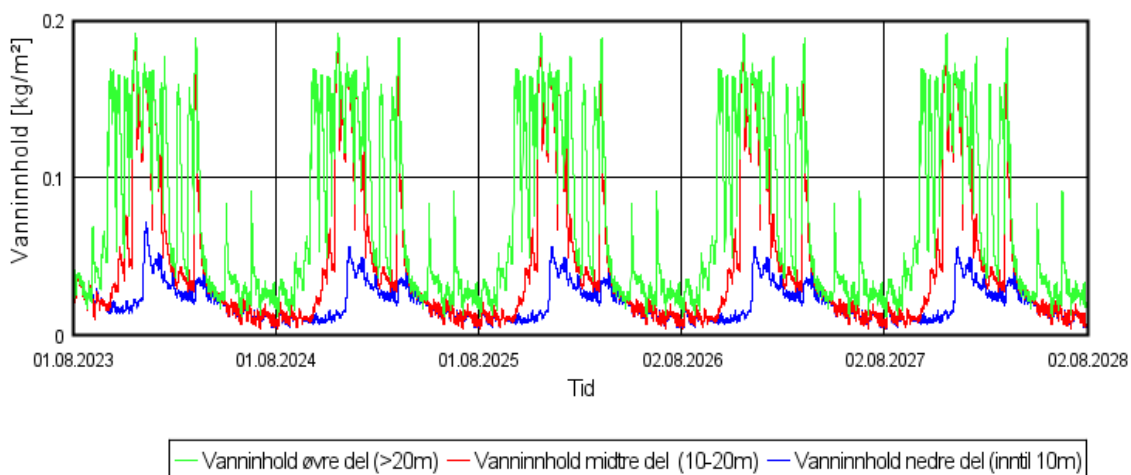
Snitt brystning yttervegg	D01
<p>Modellering:</p>  <p>Figur 14: ARCHICAD-modell av søyler og brystningsvegg</p>  <p>Figur 15: THERM-modellering av søyler og brystningsvegg</p>	
<p>Konstruksjonens oppbygging:</p> <p>Brystningsveggen mellom søylene på byggenes langsider er bygget opp på følgende måte:</p> <ol style="list-style-type: none">1. 50 mm armert prefabrikkert betongplate mot fri luft.2. 100 mm mineralull av stein, med 48x98 mm stendere fordelt som på figur.3. 30 mm kork limt på innsiden av betongsøyler, se figur.4. Diffusjonstett forhudningspapp5. 12.5 mm gipsplater <p>Om detaljen: Detaljen er modellert på nytt i ARCHICAD 26, etter informasjon fra <i>Snitt brystningsvegg</i> i informasjonsbiblioteket.</p>	

Resultat av detaljanalyse:

Relativ fuktighet sørfasade



Vanninnhold sørfasade

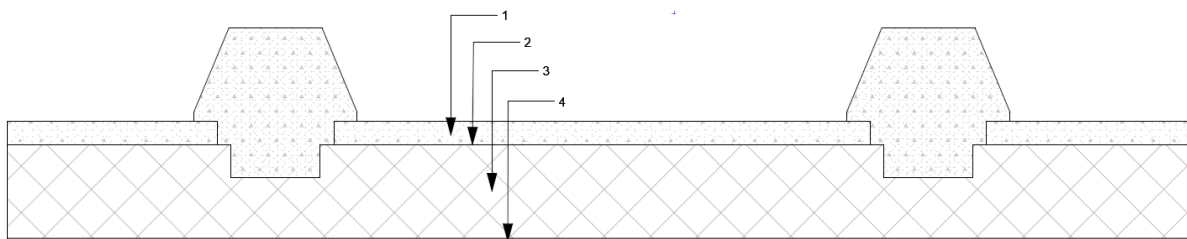


Figur 16: Relativ fuktighet og vanninnhold for brystningsvegg mot sør

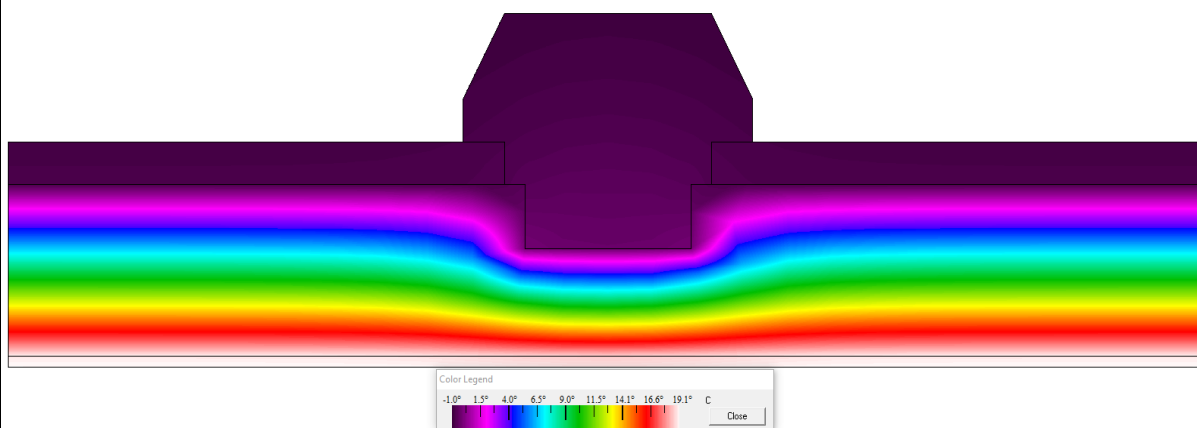
Analyse av materialene, sammen med simuleringer, viser tydelig degenerering av isolasjonsevne i dette snittet. Simulering i THERM viser forventet overflatetemperatur, og dette sammenlignet med overflatetemperatur fra termografi, tyder på en vesentlig svekkelse i isoleringsevne over tid. Simulering i WUFI viser også svært høye RF-nivå mellom isolasjon og prefabrikkert betongplate. Generelt er det i dette snittet etter denne analysen nødvendig med en renovering. Snittet har egenskaper som befinner seg langt under dagens TEK17-krav, og energibehovet økes, samtidig om inn klima forverres. Ut ifra innhentet informasjon, tyder det på at materialene ikke er byttet ut siden oppføring. Simuleringene viser at risikoen for fukt er størst i de sørlige fasadene, dette antas å være grunnet større klimapåkjenning. Det er også

rimelig å anta at det finnes luftlekkasjer, noe som vil kunne ha negative innvirkninger på isoleringsegenskapene.

Renovering:



Figur 17: ARCHICAD-modell av søyler og brystningsvegg, etter renovering



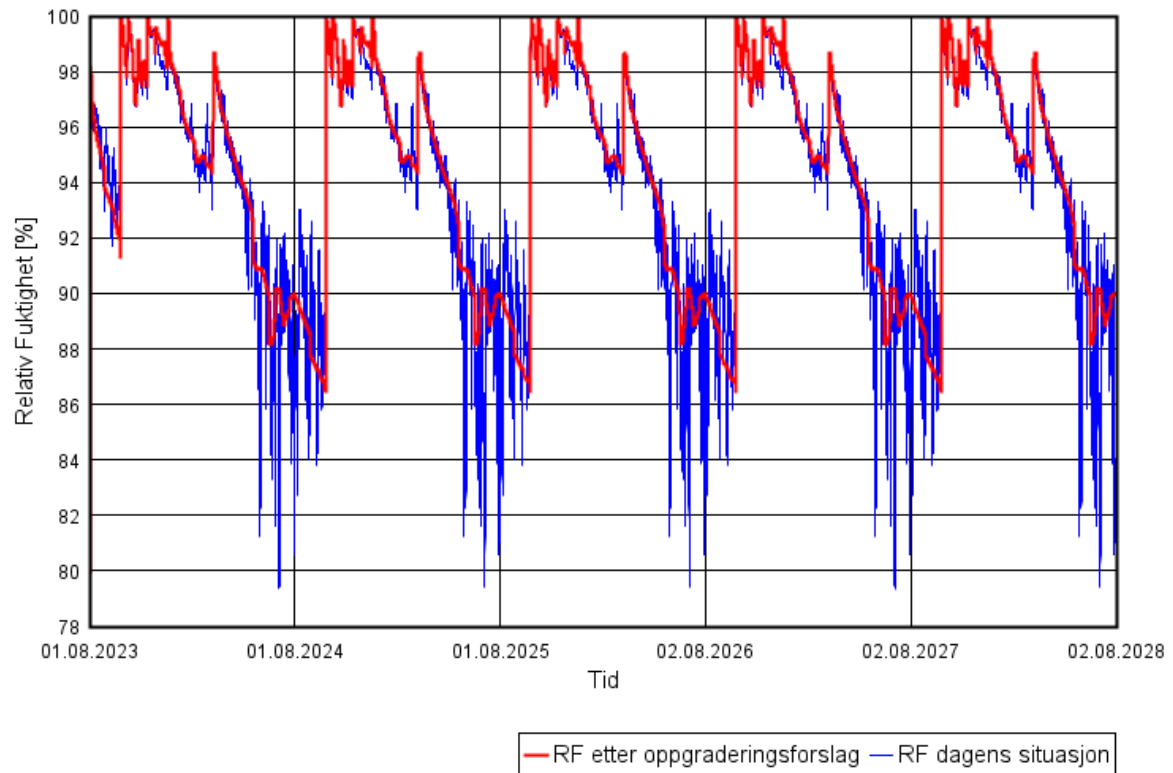
Figur 18: THERM-modellering av søyle og brystningsvegg, etter renovering

En foreslått renovering av dette snittet ville gitt veggens følgende oppbygning:

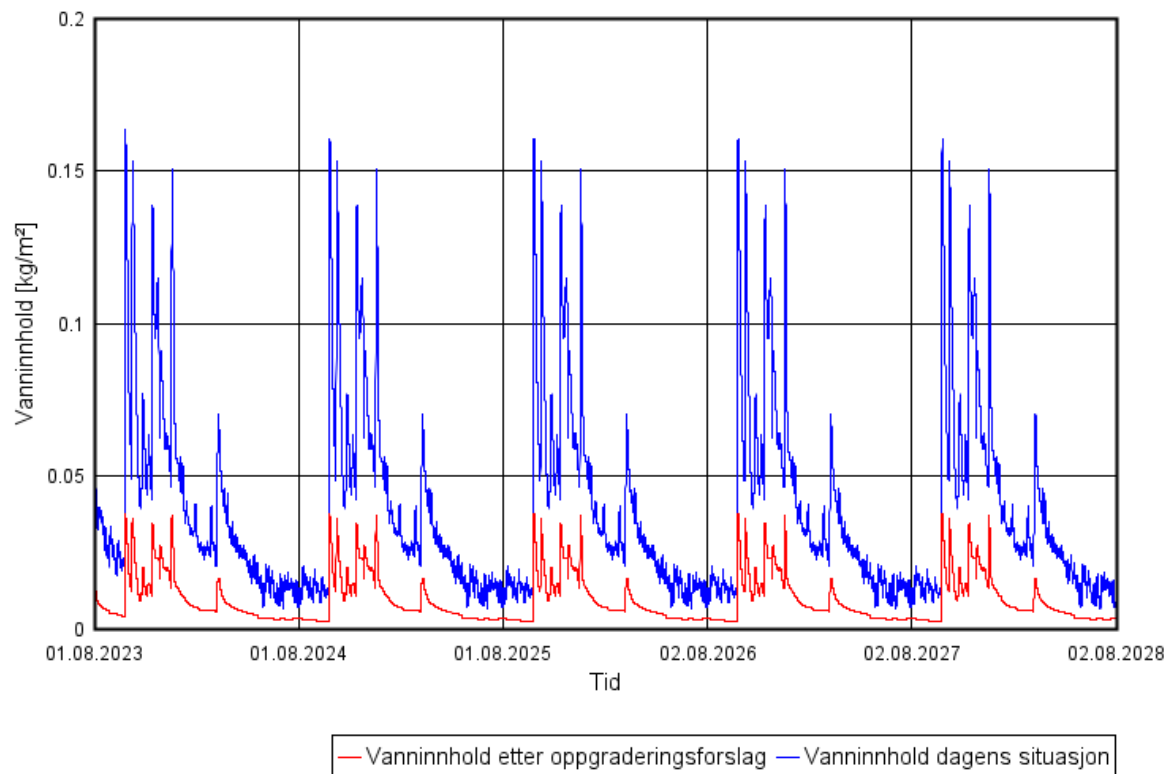
1. 50 mm prefabrikkert armert betongplate
2. Primer
3. 200 mm FOAMGLAS limt med PC56
4. 12.5 mm fiberarmerte gipsplater, limt med PC56 og mekanisk festet.

Denne renoveringen kan forbedre isoleringsevnen til brystningsveggene betraktelig. Isolert sett kan u-verdien på disse gå fra 0,33 W/m²K før renovering til 0,17 W/m²K etter renovering. For hele snittet, inkludert betongsøylene kan u-verdien reduseres fra 0,37 W/m²K til 0,19 W/m²K. Dette kan gi langsiden på byggene gode isoleringsevner, selv etter dagens standard. FOAMGLAS foreslås for brystningsveggene for å må lavest mulig u-verdi, med et isolasjonsmateriale som også er diffusjonstett.

Relativ Fuktighet i brystningsvegg øvre del nordfasade

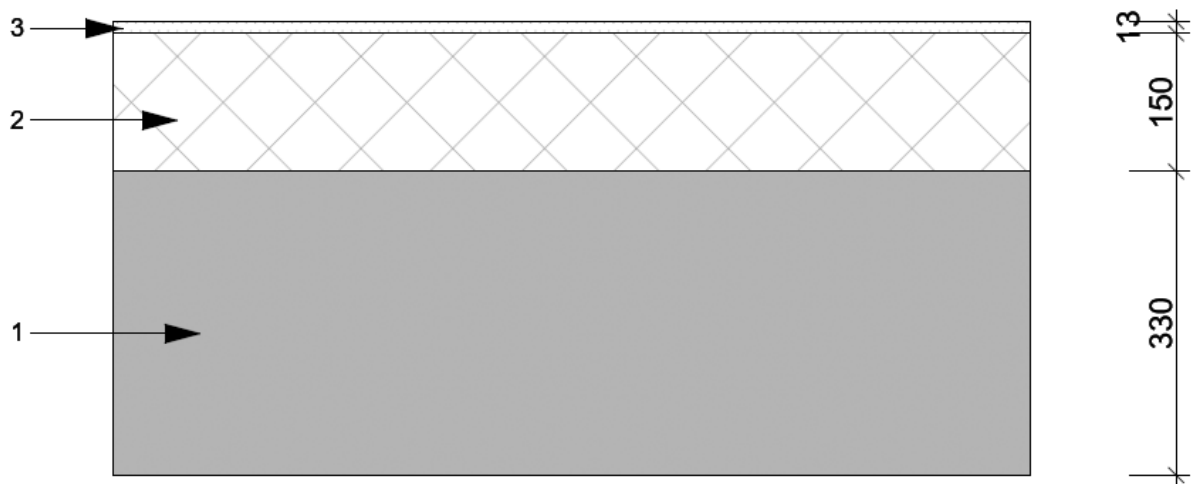


Vanninnhold i brystningsvegg øvre del nordfasade

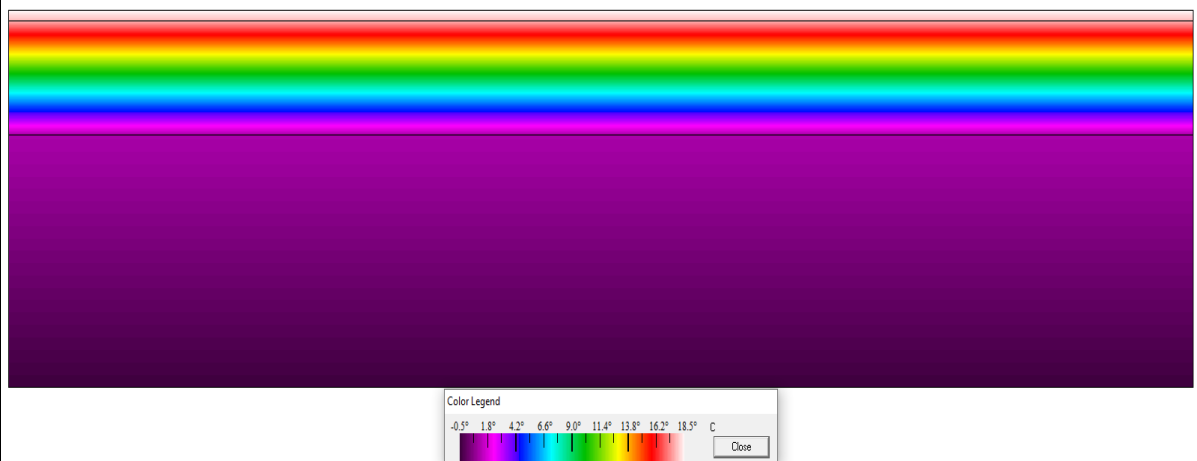


Figur 19: Relativ fuktighet og vanninnhold i brystningsvegg øvre del, mot nord

Modellering:



Figur 20: ARCHICAD-modell av gavlvegg



Figur 21 THERM-modellering av gavlvegg

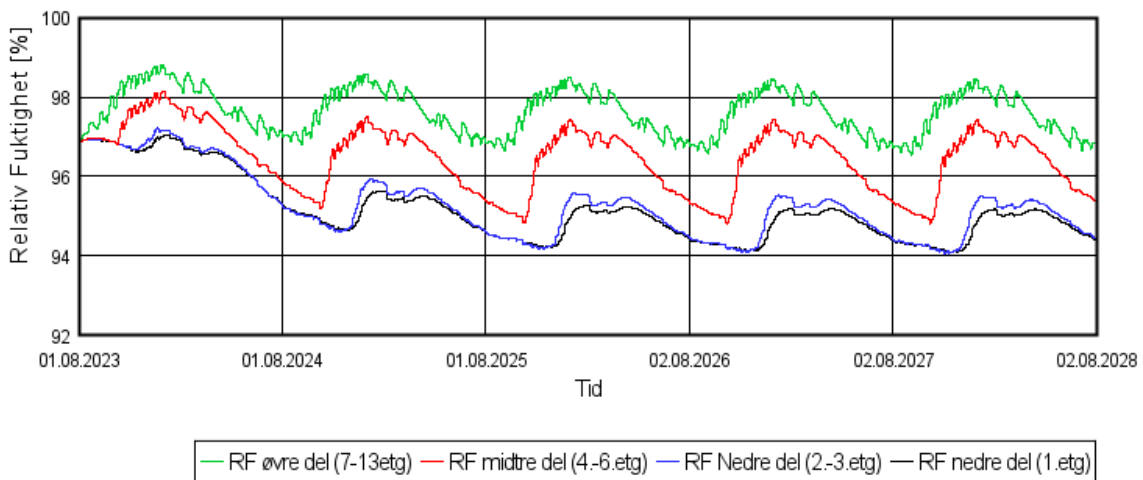
Gavlveggenes oppbygning er utført på følgende måte:

1. Prefabrikkerte armerte betongplater av varierende tykkelse
2. 150 mm porebetong (siporex)
3. 12.5 mm gipsplater

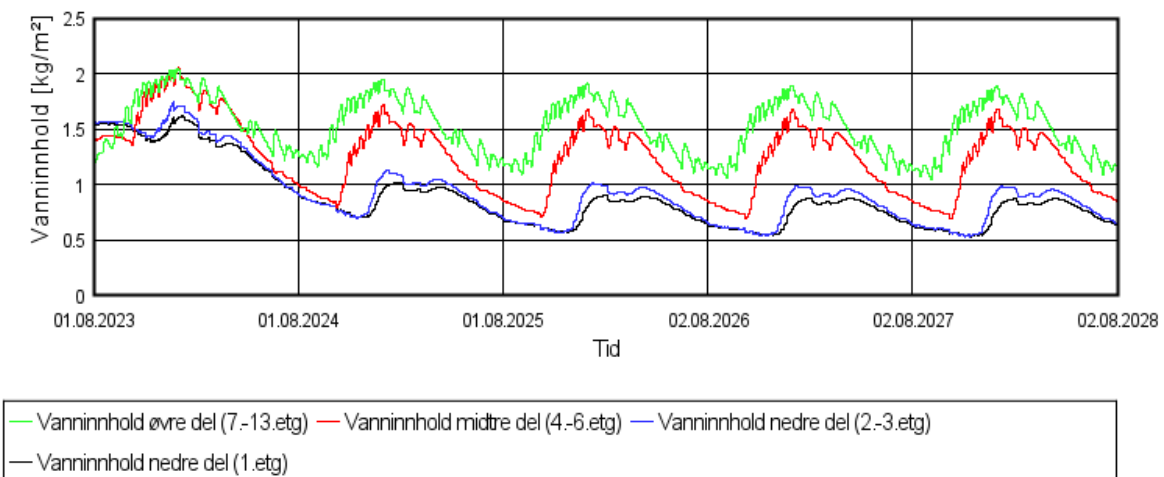
Om detaljen: Detaljen er modellert på nytt i ARCHICAD 26, etter informasjon fra *Langsnitt gjennom høybygg* i informasjonsbiblioteket.

Resultat av detaljanalyse:

Relativ fuktighet vestfasade



Vanninnhold vestfasade



Figur 22: Relativ fuktighet og vanninnhold i gavlvegg mot vest

Analysen av gavlveggene viser at det er nødvendig med renovering. Ved sammenligning av resultater fra simuleringer i THERM og WUFI, sammen med termografering, er det tydelig tegn av degenerering av isoleringsevne, og generelt preg av høy alder. Veggens ytterste lag, de prefabrikkerte betongplatene har varierende tykkelse med henholdsvis:

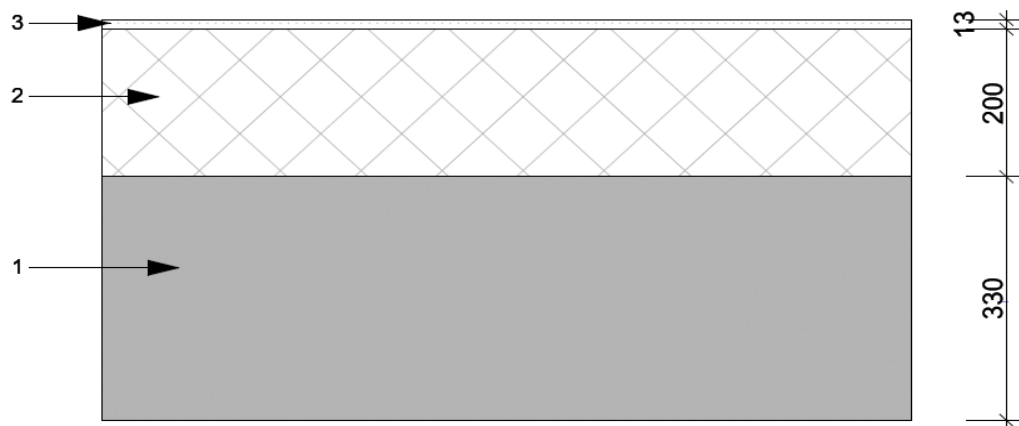
- 38 cm tykkelse i kjelleren
- 33 cm tykkelse i 1.etasje
- 28 cm tykkelse i 2. og 3.etasje
- 23 cm tykkelse i 4. – 6.etasje

- 18 cm tykkelse i 7. – 13.etasje

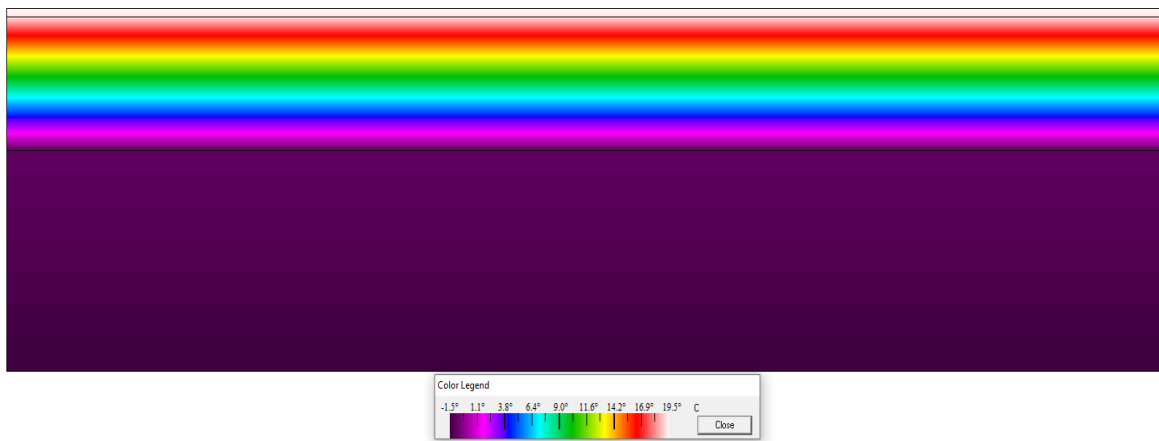
Gavlveggene er ment som avstivere i S1 og S2, og innehar derfor en viktig oppgave i byggenes bærende konstruksjon. Veggene er som nevnt konsekvent isolert med 150 mm porebetong. Dette var vanlig praksis i tiden sentralbyggene ble bygget, men har siden den tid blitt erstattet av bedre metoder. Porebetong har en varmeoverføringskoeffisient på $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, noe som er svært høyt sammenlignet med moderne isoleringsmaterialer. Dette er som nevnt veggens eneste form for isolasjonsmateriale, noe som resulterer i en u-verdi langt over dagens TEK17-krav. Veggens eksisterende beregnede u-verdi varierer fra $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$ til $0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sammenlignet med TEK17-kravet på $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ er dette i seg selv grunn til reovering. En så høy u-verdi resulterer i høyt energibehov og lite bærekraftig drift.

I tillegg tyder simuleringer på at det er for høye RF-nivå i gavlveggene. Dette vil over tid svekke porebetongens varmeoverføringskoeffisient, grunnet vanns høye varmeledningsevne, og derfor veggens totale u-verdi. En reovering i dette snittet kan kunne gi bygget et lavere energibehov, bedre inn klima, lavere RF-nivå og høyere grad av bærekraft.

Renovering:



Figur 23: ARCHICAD-modell av gavlvegg etter renovering



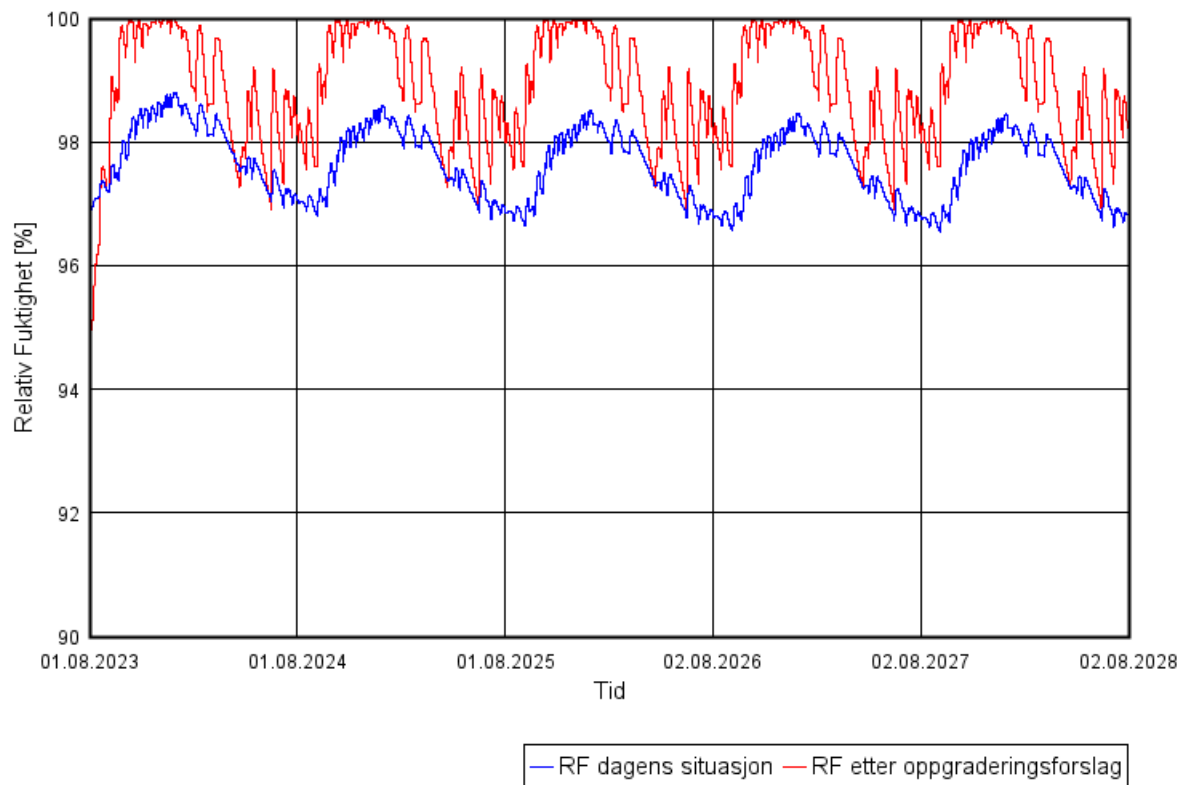
Figur 24: THERM-modellering av gavlvegg etter renovering

En foreslått renovering av dette snittet ville gitt veggene følgende oppbygning:

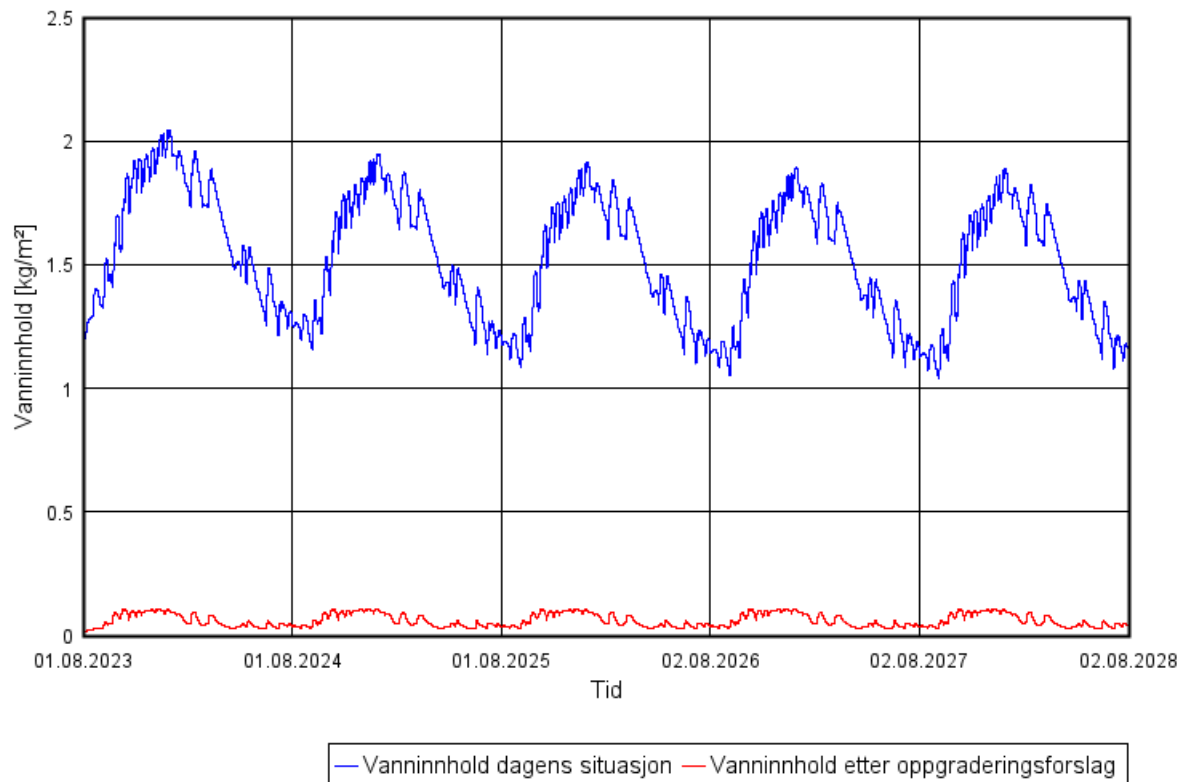
1. Prefabrikkerte armerte betongplater av varierende tykkelse
2. Primer
3. 200 mm FOAMGLAS limt med PC56
4. 12.5 mm fiberarmert gipsplate, limt med PC56 og mekanisk festet.

Denne renoveringen kan senke energibehovet, og u-verdien til snittet betraktelig. U-verdien til snittet kan gå fra minimum $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$ før renovering til $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ etter renovering. Dette kan gi gavlveggene gode isoleringsevner, selv etter dagens TEK17-standard. FOAMGLAS i dette forslaget sørger for lav varmegjennomgangskoeffisient, uten at renoveringen går på kompromiss av veggens fuktegenskaper. FOAMGLAS er diffusjonstett og fungerer derfor både som isolering og dampsperre i ett.

Relativ fuktighet i gavlvegg øvre del vestfasade

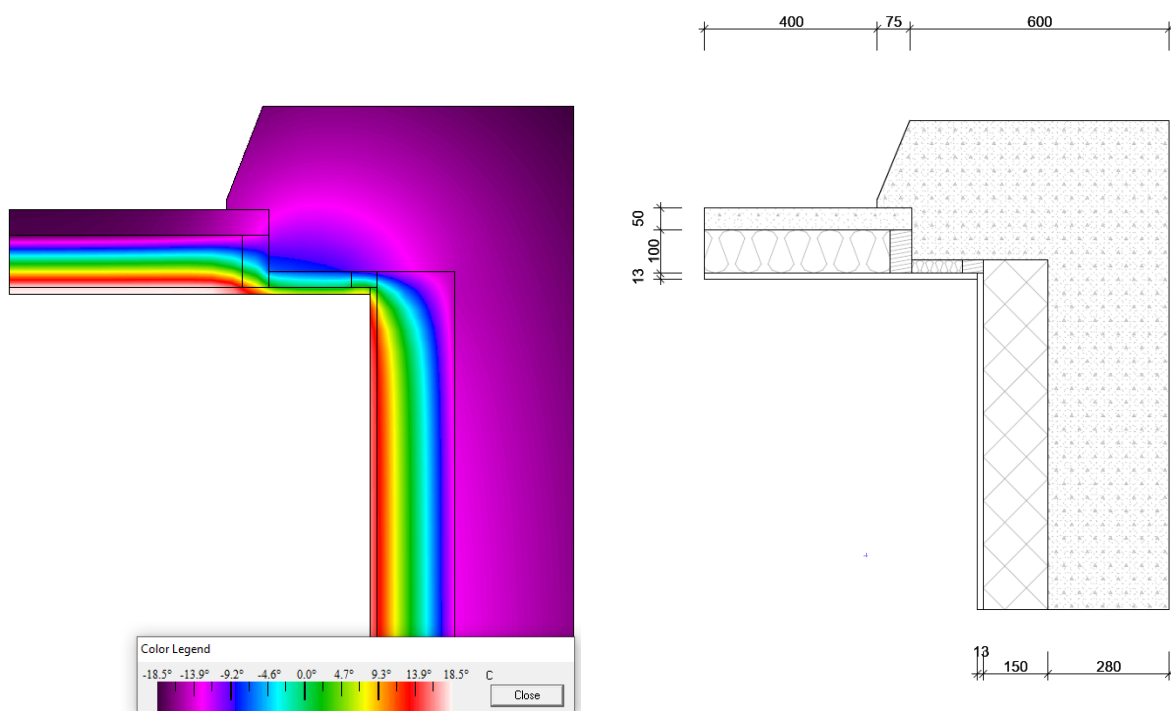


Vanninnhold i gavlvegg øvre del vestfasade



Figur 25: Relativ fuktighet og vanninnhold i gavlvegg øvre del, mot vest

Modellering:



Figur 26: THERM-modellering hjørne

Figur 27: ARCHICAD-modellering hjørne

Konstruksjonens oppbygging:

Hjørnene på S1 og S2 har følgende oppbygging:

1. 50 mm prefabrikkert armert betongplate mot langsiden, og prefabrikkerte armerte betongplater av variabel tykkelse mot gavl.
2. 100 mm mineralull av stein med stender fordelt på c/c 60cm mot langsiden, og 150 mm porebetong mot gavl. 30 mm kork i det indre hjørnet.
3. 12.5 mm gipsplater

Om detaljen: Detaljen er modellert på nytt i ARCHICAD 26, etter informasjon fra *Snitt hjørne*.

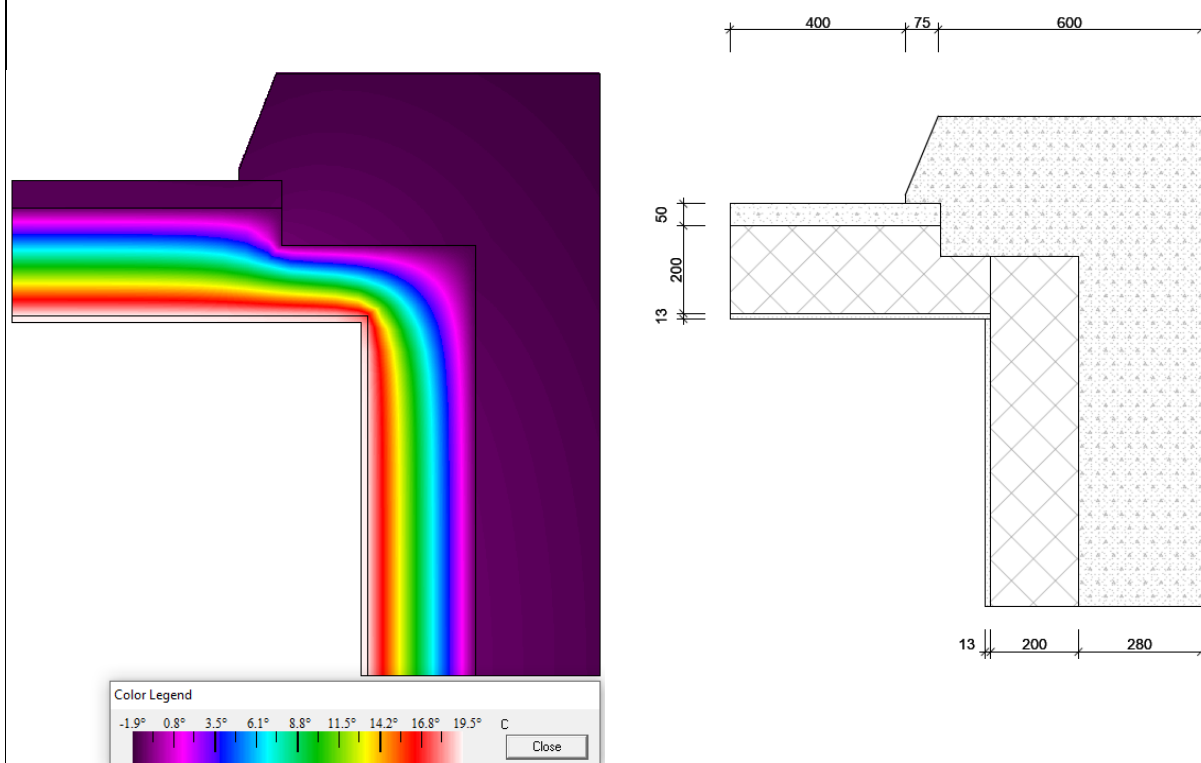
Resultat av detaljanalyse:

S1 og S2s hjørner er etter simuleringer og analyse vurdert til å ha stort potensiale for varmetap. Ytterhjørner er generelt en utforming innen bygningsfysikken på grunn av formen, som fører til geometrisk kuldebro. Som illustrert på *Figur 26* er overflatetemperaturen, under simuleringen, på gipsen i hjørnet ca. 14°C noe som vitner om stort varmetap. Utover dette har som kjent kork og porebetong for høy varmeoverføringskoeffisient til å oppfylle dagens krav uten stor tykkelse.

I tillegg er stender 48x98 mm og lekt 23x48 mm i dette snittet plassert lite hensiktsmessig med tanke på å unngå kuldebro. WUFI-simuleringen av snittet viser også at hjørnet er utsatt for høye innvendige RF-nivå, noe som er lite gunstig for inneklimate og veggens generelle varmemotstand.

En renovering av dette snittet kunne senket kuldebroverdien betraktelig. Sammen med resten av ytterveggene kunne det også over tid forbedret inneklimate. Utover dette kunne det totale varmetapet til snittet blitt redusert, og fuktforholdene forbedret.

Renovering:



Figur 28: THERM-modellering hjørne etter renovering Figur 29: ARCHICAD-modellering etter renovering

En foreslått renovering av dette snittet ville gitt veggens følgende oppbygning:

1. 50 mm prefabrikkert armert betongplate mot langsiden, og prefabrikkerte armerte betongplater av variabel tykkelse mot gavl.
2. Primer
3. 200 mm FOAMGLAS limt med PC56
4. 12.5 mm fiberarmert gipsplate, limt med PC56 og mekanisk festet.

En renovering som illustrert i *Figur 28* kan i dette tilfellet gi hjørnene gode isoleringsevner etter dagens krav. Kuldebroen kan reduseres kraftig, noe som også reduserer varmetapet. Samtidig

kan fuktproblemene i veggen forbedres, noe som kan føre til lengre levetid på materialene, og sørger for at u-verdien holdes ved like over lengre tid. FOAMGLAS sørger også i dette snittet for bedre fuktegenskaper på grunn av diffusjonstetthet. Som nevnt var overflatetemperaturen, i simuleringen av hjørnet, ca. 14°C før renovering. Overflatetemperaturen i samme punkt, under simulering, kan etter renovering bli ca. 19°C. Dette ville vært en stor oppgradering, og vitner om en stor oppgang i isoleringsevne, og minimering av kuldebro.

Generelt sett er alle forslagene til oppgradering utført med energieffektivitet i fokus. Målet er som nevnt å nå TEK17-kravene for u-verdi, samtidig som man forbedrer inneklime og fukttilstand. Konklusjonen er at deler av målet kan være oppnåelig. Gjennom nøye analyse og materialvurderinger er kommet frem til et renoveringsforslag som presentert tidligere. Denne løsningen sørger for gode u-verdier og reduserte kuldebroer. Utfordringen med høyere isolasjonstykkelse, er den som nevnt økte fuktrisikoen. Den relative fuktigheten i veggsjiktene er fremdeles for høy til å konkludere med at denne løsningen er akseptabel rent fuktteknisk. Men ved å skifte ut det organiske materialet i ytterveggen med uorganisk skumglass, kan dette redusere risikoen for muggutvikling.

I tillegg er det kartlagt mange muligheter for å gjøre renoveringsprosessen så klimavennlig som mulig. Samtidig er det klart at en totalrenovering av ytterveggene i S1 og S2, som forslått, er en energi- og materialkrevende prosess.

Uansett er dette en oppgradering som i all hovedsak kunne fått positive effekter for Sentralbyggene og NTNU Gløshaugen. Utover dette kunne en slik renovering av eldre betongbygg muligens satt et eksempel for andre aktører som vil øke energieffektiviteten. Dette er en side av denne oppgaven som gjenspeiler NTNUs slagord «Kunnskap for en bedre verden» på en utmerket måte.

Referanser

- Avfall Norge. (2019, august 19). *Gips som resirkulert råvare*. Hentet fra Avfall Norge: <https://avfallnorge.no/bransjen/nyheter/gips-som-resirkulert-r%C3%A5vare>
- Bartlett, J., Rusch, G. M., Kyrkjeeide, M. O., Sandvik, H., & Nordén, J. (2020, mai). *Carbon storage in Norwegian ecosystems*. Hentet fra NINA Report: <https://brage.nina.no/nina-xmlui/bitstream/handle/11250/2655580/1774b.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Bergene Holm. (u.år). *Impregnering*. Hentet fra Bergene Holm AS: <https://www.bergeneholm.no/dokumentasjon/impregnering>
- Bokalders, V. (2022, november 11). *Isolasjonsmaterialer A - Å*. Hentet fra Bygg og bevar: <https://www.byggogbevar.no/enoek/artikler/isolasjonsmaterialer-a-%C3%A5>
- Bygg og bevar. (2019, mars 14). *Gipsplater*. Hentet fra Byggogbevar: <https://www.byggogbevar.no/enoek/groenne-materialvalg/bygningsplater/gipsplater>
- Byggforsk. (1999). *Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/2758/beregningsmetode_for_aa_unngaa_kondens_eller_muggvekst_paa_innvendige_overflater
- Byggforsk. (2005, Vår). *701.401 Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimate*. Hentet fra Byggforskserien: https://www.byggforsk.no/dokument/3231/muggsopp_i_bygninger_forekomst_og_konsekvenser_for_inneklimate
- Byggforsk. (2005). *Fasadepuss. Valg av pusstype*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/486/fasadepuss_valg_av_pusstype
- Byggforsk. (2014, desember). *Etterisolering av betongvegger*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/678/etterisolering_av_betongvegger
- Byggforsk. (2016, mars). *Betong. Typer, egenskaper og bruksområder*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/5157/betong_typer_egenskaper_og_bruksomraa_der

- Byggforsk. (2018, September). *Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/208/beregning_av_u-verdier_etter_ns-en_iso_6946
- Byggforsk. (2019, Oktober). *Kuldebroer. Typer, konsekvenser og bruk av normalisert kuldebroverdi*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/5206/kuldebroer_typer_konsekvenser_og_bruk_av_normalisert_kuldebroverdi
- Byggforsk. (2020, september). *Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper*. Hentet fra Byggforsk: https://www.byggforsk.no/dokument/604/varmeisolasjonsmaterialer_typer_og_egenskaper
- Byggforsk. (2020, september). *Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*. Hentet fra Byggforskserien: https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet_og_varmemotstand_for_bygningsmaterialer
- FME ZEN. (2018, mai 13). *What is a zero emission neighbourhood?* Hentet fra FME ZEN: <https://fmezen.com/what-is-a-zen/>
- FME ZEN. (u.år). *Pilotprosjekter*. Hentet fra FME ZEN: <https://fmezen.no/category/pilotprosjekter/>
- FN-sambandet. (2023, april 4). *FNs bærekraftsmål*. Hentet fra FN: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>
- FOAMGLAS. (u.år). *T3Plus-NO*. Hentet fra FOAMGLAS: <https://www.foamglas.com/nb-no/produkter/fgbt3slabs>
- Fufa, S. M., Schlanbusch, R. D., Sørnes, K., Inman, M., & Andersen, I. (2016). *A Norwegian ZEB Definition Guideline*. Hentet fra The Research Centre on Zero Emission Buildings: <http://www.zeb.no/index.php/en/news-and-events/256-a-norwegian-zeb-definition-guideline>
- Geving, S. (2016). *Beregningsverktøy for fukt- og varmetransport i bygningskomponenter*. Hentet fra WUFI: <http://www.wufi.no/>
- Geving, S. (2021). *Praktisk Bygningsfysikk*. Fagbokforlaget.

- Geving, S., Holme, J., & Uvsløkk, S. (2010). *Alternative dampsperrer med uttørkningsmulighet mot innelufta*. Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Grønn Byggallianse. (u.år.). *Klimakur for bygg og eiendom*. Hentet fra Byggalliansen: <https://byggalliansen.no/kunnskapscenter/publikasjoner/infopakkeklimakjempen/#1610543297119%20-2891ab52-ad8a>
- Gyproc. (u.år). *Om oss*. Hentet fra Gyproc Saint-Gobain: <https://www.gyproc.no/om-oss>
- Jelle, B. P. (2011, mai 15). *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions*. Hentet fra SINTEF: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2473737/Traditional+State-of-the-Art+and+Future+Thermal+Building+Insulation+Materials+and+Solutions+-+Properties+Requirements+and+Possibilities57823.pdf?sequence=5>
- Kvarme-Joakimsen, G. (2021, mars 9). *Ferista barnehage tester underlag av kork*. Hentet fra Trondheim Kommune: <https://trondheim2030.no/2021/03/09/ferista-barnehage-tester-underlag-av-kork/>
- Lavenergiprogrammet. (2017, september 29). *Termografering*. Hentet fra Tekna: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/termografering/>
- Lofoten Avfallsselskap IKS. (u.år). *Farlig avfall fra bygg og anlegg*. Hentet fra LAS-Lofoten: <https://las-lofoten.no/bedriftskunder/bygning-og-annlegg/>
- Nesse, N. (2019, mars 25). *steinull*. Hentet fra SNL: <https://snl.no/steinull>
- Norsk Gjenvinning. (u.år). *Farlig avfall*. Hentet fra NG Norsk Gjenvinning: <https://www.norskgjenvinning.no/tjenester/avfallstyper/farlig-avfall/>
- Olsen, K. (2022, Mars 8). *Impregnert trevirke: Er det egentlig farlig avfall?* Hentet fra Gjenvinningsbloggen: <https://blogg.norskgjenvinning.no/er-impregnert-treverk-farlig-avfall>
- Peng, C., Scorpio, D., & Kibert, C. (1997). *Strategies for successful construction and demolition*. Construction Management and Economics.
- Regjeringen. (u.år). *Kompleks Gløshaugen*. Hentet fra Regjeringen: https://www.regjeringen.no/contentassets/134e6009f0b64f74bbe1647d4b7e005b/9900496_ntnu_gloeshaugen.pdf

- ROCKWOOL. (u.år). *ROCKWOOL Retursystem - mer enn bare en gjenbrukstanke*. Hentet fra ROCKWOOL: <https://www.rockwool.com/no/radgivning-og-inspirasjon/rockwool-retursystem/>
- Rosvold, K. A. (2021, november 7). *Gløshaugen*. Hentet fra SNL: <https://snl.no/Gl%C3%B8shaugen>
- Sivertsen, J. v. (2021, august 10). *Et sunt livsløp for fasader, vinduer og dører i aluminium?* Hentet fra Schuco Knowledge: <https://www.schueco-knowledge.no/artikler/et-sunt-livsloep-aluminium>
- Tcnano Norge. (u.år). *Datablad Spaceloft Aerogel*. Hentet fra Aspen Aerogels: https://www.tcnano-norge.no/tcno_data_spaceloft_10.pdf
- Thue, J. (2021, april 28). *diffusjonstett papp*. Hentet fra SNL: https://snl.no/diffusjonstett_papp
- Thue, J. (2021, november 23). *gipsplater*. Hentet fra SNL: <https://snl.no/gipsplater>
- Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk Grunnlag*. Trondheim: Fagbokforlaget .
- Trondheim Kommune. (2022, desember 20). *Kriterier for A, B og C-klassifisering*. Hentet fra Trondheim Kommune: <https://www.trondheim.kommune.no/tema/bygg-kart-og-eiendom/byantikvar/aktsomhetskart-kulturminner/kriterier-for-abc-klassifisering/>
- Trondheim Kommune. (u.år). *Kulturminnekartet*. Hentet fra Trondheim Kommunde: <https://kart5.nois.no/trondheim/Content/Main.aspx?layout=trondheim&east=570889&north=7022884.5&scale=198052&map=kulturminnekartet&time=638202758560332629&vwr=asv>
- U.S Department of energy. (2017, november 28). *Two-Dimensional Building Heat-Transfer Modeling*. Hentet fra Windows & Daylighting: <https://windows.lbl.gov/software/therm>
- Wærner, E. (2016, februar). *Avfallshåndtering på byggeplass*. Hentet fra Byggemiljø: https://www.byggemiljo.no/wp-content/uploads/2016/03/Veileder_Avfallsh%C3%A5ndtering-p%C3%A5-byggeplass-rev.2016.pdf
- ZEB. (u.år). *ZEB-definisjonen*. Hentet fra The Research Centre on Zero Emission Buildings: <http://zeb.no/index.php/no/om-zeb/zeb-definisjoner>
- Aarnes, H. (2023, januar 23). *kork (botanikk)*. Hentet fra SNL: https://snl.no/kork_-_botanikk

Vedleggsliste

Vedlegg 1: Artikkel

Vedlegg 2: Plakat

Vedlegg 3: WUFI-Resultater