

Eirik Feldberg Bakken
Morten Kolsaker

Aktive tak av massivtreelementer og celleglassisolasjon

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Tore Kvande

Juni 2020

Eirik Feldberg Bakken
Morten Kolsaker

Aktive tak av massivtreelementer og celleglassisolasjon

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk
Veileder: Tore Kvande
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Verden står overfor store klimaendringer, og byggenæringen står i dag for en betydelig andel av verdens klimagassutslipp. Massivtre kan være et materiale som bidrar til å gjøre byggenæringen mer miljøvennlig. Økte nedbørsmengder som følge av klimaendringene, i tillegg til plassmangel og høye tomtepriser i byene gjør at det blir mer aktuelt å benytte takarealene til å fordrøye nedbør og til rekreasjon. For å håndtere påkjenningene ved grønne tak, kombinert med massivtre som bærekonstruksjon, kan celleglassisolasjon være aktuelt.

Denne masteroppgaven har som mål å gjøre en utredning av «aktive tak» med massivtreelementer og celleglassisolasjon. Aktive tak er her definert som tak hvor arealene benyttes utover det å beskytte mot vær. Celleglass er et relativt lite brukt isolasjonsmateriale som består av plater av skummet glass. Det er undersøkt hvilke løsninger som er anbefalt for celleglass, og disse er sammenlignet med sannsynlige alternative konstruksjoner. Arbeidet er gjort gjennom en litteraturstudie, fuktsimuleringer, kvalitativ informasjonsheiting, og en miljøanalyse.

Det ble gjennomført en begrenset litteraturstudie av relevant litteratur. Hensikten med litteraturstudien var å gi forfatterne og leserne av masteroppgaven kunnskap til å behandle temaene. Kapittel 2, «Teori», er et resultat av litteraturstudien.

Kvalitativ informasjonsheiting ble gjort gjennom en dokumentstudie, intervjuer, og uformell kommunikasjon med aktører i næringen. Det ble innhentet erfaringer, oppfatninger om hva som gjøres i praksis og eventuelle problemer som kan oppstå.

Simuleringene ble gjort som en parameterstudie i det endimensjonale beregningsprogrammet WUFI 1D Pro og WUFI Mould Index VTT. Parameterstudien undersøkte oppbygninger, massivtretykkelse, byggfukt og inneklime. Resultatene viser at lavt byggfuktnivå er det viktigste for å hindre muggvekst i takkonstruksjonen. Mineralullkonstruksjoner med dampspærre og konstruksjoner med celleglass oppfører seg nær sagt identisk. For begge vil det bli uakseptabel muggvekst ved startfuktighet over 15 vektprosent. Uttøringshastigheten for konstruksjonen er knyttet til massivtretykkelsen. Beregningene viser at en dobling av tretykkelsen gir en halvering av mengde uttørket byggfukt etter fem år for celleglasskonstruksjonen.

Siden massivtre ofte blir valgt for bygninger med en tydelig miljøprofil, ble det også gjennomført en miljøanalyse. Klimagassutslippene til en oppbygning med celleglass ble sammenlignet med alternative oppbygninger. Celleglass har høyere utslipp enn flere av alternativene. Det er riktignok kun to av de alternative løsningene som er brannteknisk preakseptert og samtidig har høy trykkfasthet. Celleglasskonstruksjonen, som er brannteknisk preakseptert, har lavere utslipp enn en av de to.

Oppgaven konkluderer med at celleglass ved visse omstendigheter er et godt egnet isolasjonsmateriale til bruk i aktive tak. De spesielle egenskapene til materialet kan utnyttes, men gir også visse bygningsfysiske og bygningstekniske utfordringer.

Abstract

The world is facing major changes to the climate, and the construction industry today accounts for a significant proportion of the world's greenhouse gas emissions. Cross-laminated timber (CLT) has the potential to make the construction industry more environment-friendly. Increased precipitation due to the climate changes, in combination with urban densification and increasing property costs makes it more favorable to utilize the roof areas for recreational use and to delay rainfall. To handle the added strain from green roofs on the load bearing CLT, the use of cellular glass insulation may be an appropriate alternative.

This master's thesis explores whether CLT, cellular glass and "active roofs" are an adequate combination. An active roof is defined in this thesis as a roof where the areas are being used for more than just weather protection. Cellular glass, consisting of foamed glass, is not a very commonly used insulation material. The solutions with cellular glass have been compared to solutions with alternative materials through a literature study, moisture simulations, qualitative information retrieval and an environmental analysis.

A limited literature study of relevant literature was conducted. The purpose of the literature study was to provide a base knowledge to the authors and readers of the thesis on the topics. Chapter 2, "Theory", is a result of the literature study.

Qualitative information was collected through document studies, interviews, and informal communication with representatives from the building industry. Best practice and experiences, and potential problems that may arise were documented.

The simulations were conducted as a parameter study in the one-dimensional simulation program WUFI 1D Pro and WUFI Mold Index VTT. The parameter study explored different roof assemblies, CLT thickness, built-in moisture and indoor moisture load. The simulations indicate that the built-in moisture is the most important factor in preventing mold growth in the roof structure. Mineral wool assemblies with vapor barriers and cellular glass assemblies have an almost identical behavior. The results show that both assemblies will have an unacceptable mold growth with starting humidity levels above 15 %. The drying capacity of the structure is closely correlated to the CLT thickness. Calculations for the cell glass roof assembly indicates that doubling the CLT thickness nearly halves the amount of moisture leaving the CLT over a five-year period

CLT often is chosen in buildings with an environmental-friendly profile, hence an environmental analysis was carried out. The greenhouse gas emissions of a cellular glass roof assembly were compared with different alternatives. Cellular glass has higher emissions than several of the alternatives. However, only two of the suggested alternative structures are considered pre-accepted solutions with regards to fire safety, while at the same time having the recommended compressive strength. The cellular glass roof assembly provides sufficient fire safety and compressive strength, and has lower emissions than one of the two alternative structures.

The thesis concludes that, under certain circumstances, cellular glass is a well-suited insulating material for use in active ceilings with CLT. The special properties of the material can be used, but also represents certain challenges related to building-physics and the structure of the assemblies.

Forord

Etter utført fordypningsoppgave høsten 2019 ble det etter samtale med veileder Tore Kvande og samarbeidspartner Multiconsult besluttet å gjøre en studie der en ser nærmere på celleglass i kombinasjon med massivtre i kompakte tak.

Masteroppgaven har blitt utført ved bruk av simuleringer i fuktsimuleringsprogrammet WUFI 1D Pro, samt en enkel livsløpsvurdering ved hjelp av EPD-er og databaser. Det er i tillegg utført intervjuer av aktuelle aktører i næringen og en gjennomgang av en betydelig mengde dokumenter fra ulike produsenter og en rådgiver. Det er også gjort et begrenset litteratursøk for å gi forfatterne det nødvendige teoretiske grunnlaget samt for å kartlegge hva som er gjort på feltet tidligere.

Rapporten er skrevet på studiet Bygg- og miljøteknikk, på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven utgjør hele karaktergrunnlaget i «TBA4522 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave», og tilsvarer 30 studiepoeng.

Arbeidet har blitt utført i sin helhet vinteren og våren 2020. Som så mye annet har oppgaven derfor i en viss grad blitt påvirket av situasjonen med COVID 19. I hovedsak opplevde forfatterne noe redusert mulighet for veiledning både fra veileder på NTNU og samarbeidspartner Multiconsult. I tillegg var det ikke lenger mulig å gjennomføre enkelte aktiviteter som i utgangspunktet var aktuelle, og som kanskje kunne styrket oppgaven. Det gjaldt blant annet laboratorieforsøk, besøk på prosjekter, deltagelse på nasjonalt fuktseminar og besøk hos Multiconsult for veiledning. De negative konsekvensene har imidlertid ikke vært veldig store, siden de viktigste aktivitetene kunne utføres med hjemmekontor.

Vi ønsker å takke alle aktørene som har bidratt med dokumenter og kunnskap for å bidra i vår masteroppgave. Vi vil også takke alle aktører som har stilt opp til intervjuer og ville dele sin kunnskap. En spesiell takk går også til Multiconsult, som gjennom våren har hjulpet oss og delt sine erfaringer med oss. Til slutt vil vi gi en kompakt, rettvendt takk til vår strålende veileder, Tore Kvande, for råd og støtte gjennom våren.

Innhold

Figurer	xii
Tabeller	xiii
Forkortelser	xv
Definisjoner	xv
1 Introduksjon	16
1.1 Bakgrunn	16
1.2 Fordypningsprosjekt	18
1.3 Forskningsbehov	18
1.4 Mål og omfang	19
1.5 Begrensninger/avgrensninger	19
2 Teori	21
2.1 Kompakte tak	21
2.2 Aktive tak.....	24
2.3 Celleglass.....	29
2.4 Massivtre	37
2.5 Bygningsfysiske prinsipper	46
2.6 WUFI.....	51
3 Metode	54
3.1 Litteraturstudie	54
3.2 Simuleringer.....	56
3.3 Kvalitativ informasjonsinnhenting.....	60
3.4 Miljøanalyse	65
4 Resultater	79
4.1 Resultater fra simuleringer	79
4.2 Resultater fra den kvalitative informasjonsinnhenting.....	85
4.3 Resultater fra miljøanalyse	90
5 Diskusjon.....	93

5.1	Diskusjon av metode	93
5.2	Diskusjon av forskningsspørsmål.....	101
6	Konklusjon	107
7	Videre arbeid.....	109
	Referanser.....	111
	Vedlegg.....	119

Figurer

Figur 1: Massivtreelement (Splitkon, 2020)	16
Figur 2: Celleglassplate (Foamglas, 2020)	17
Figur 3: Takoppbygninger (Byggforskserien 525.002).	21
Figur 4: Prinsipiell oppbygning av et kompakt tak (Time, et al., 2008)	22
Figur 5: Rettvendt tak, omvendt tak og duotak (Byggforskserien 525.207).....	23
Figur 6: Illustrasjon av oppbygning av et intensivt grønt kompakt tak.....	26
Figur 7: Celleglassplate (FOAMGLAS Nordic AB, 2020)	30
Figur 8: Skumglassgranulat (Glasopor) Foto: Katrine Lunke.....	31
Figur 9: Produksjonsprosess celleglass (FOAMGLAS Nordic AB, 2013)	33
Figur 10: Illustrasjonsfoto KL-tre (Stora Enso, 2013)	37
Figur 11: Krysslaminert massivtreelement (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006)	38
Figur 12: Kantstilt massivtreelement (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).....	38
Figur 13: Hulromselement (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006)	39
Figur 14: Produsert massivtre i Europa (Borgström & Fröbel, 2017, s. 11).....	40
Figur 15: Skjematisk oversikt over KL-treproduksjon (Borgström & Fröbel, 2017)	41
Figur 16: Forskjellige poresystem (Geving & Thue, 2002)	47
Figur 17: Fuktopptak i porøse materialer (Gustavsen, 2019).....	48
Figur 18: Fukttransport i porene i en yttervegg om vinteren, for forskjellige nivåer av fuktinnhold (Fraunhofer IBP, 2009).....	49
Figur 19: Forwards og backwards citation chaining (Berry & Choi, 2012)	55
Figur 20: Flytdiagram over gjennomføring av intervjuer	62
Figur 21: Oppbygning 1 - Celleglasskonstruksjon	71
Figur 22: Oppbygning 2 - Glassull uten betongpåstøp	72
Figur 23: Oppbygning 3 - Glassull med betongpåstøp	72
Figur 24: Oppbygning 4 - Steinull uten betongpåstøp.....	72
Figur 25: Oppbygning 5 - Steinull med betongpåstøp	73
Figur 26: Oppbygning 6 - EPS uten betongpåstøp.....	73

Figur 27: Oppbygning 7 - EPS med betongpåstøp	73
Figur 28: Transportdistanse fra produksjonssted for Foamglas i Belgia til Oslo (Google, 2020)	78
Figur 29: Vanninnhold i KLT (celleglasskonstruksjon med 160 mm massivtre).....	80
Figur 30: Vanninnhold i KLT (celleglasskonstruksjon med 320 mm massivtre).....	81
Figur 31: Muggindeks V1-V6 og V19-V25	81
Figur 32: Vanninnhold i KLT (celleglasskonstruksjon med normal (V5) og høy fuktbelastning (V25)).....	82
Figur 33: Vanninnhold i KLT (mineralullkonstruksjon uten sperresjikt).....	83
Figur 34: Muggindeks V7-V12	83
Figur 35: Vanninnhold i KLT (mineralullkonstruksjon med dampspærre).....	84
Figur 36: Muggindeks V13-V18	84
Figur 37: Vanninnhold i KLT (celleglass og mineralull med dampspærre)	85
Figur 38: Eksensivt grønt tak på bærende dekke av tre (FOAMGLAS Nordic AB, 2010) ..	87
Figur 39: Intensivt grønt tak på betongdekke (FOAMGLAS Nordic AB, 2010).....	88
Figur 40: Leggeanvisning for Foamglas på tak med bærende lag av tre.....	89
Figur 41: Vurdering av substrattykkelse	96
Figur 42: Vurdering av feilkilde, vanninnhold	97
Figur 43: Vurdering av feilkilde, muggvekst	97
Figur 44: Simulert vanninnhold og RF april 2022, V8.....	98

Tabeller

Tabell 1: Typiske materialegenskaper for celleglass	35
Tabell 2: Typiske materialegenskaper for massivtre	43
Tabell 3: Oversikt over varme- og fukttransportmekanismer og deres drivpotensial (Künzel, 1995)	48
Tabell 4: Oversikt over transportmekanismer som er inkludert og utelatt i WUFI (Stellander, 2012).	52
Tabell 5: VTT muggindeks (Viitanen & Ojanen, 2007)	53
Tabell 6: Beregningsvarianter i WUFI	57

Tabell 7: Valg i WUFI VTT	60
Tabell 8: Oversikt over livsløpsfaser (Standard Norge, 2011)	69
Tabell 9: Oversikt over varianter og beregningsresultater	79
Tabell 10: Oversikt over fuktighetsnivå i massivtreelementet for beregningsvariantene	80
Tabell 11: Total GWP, for de syv takkonstruksjonene	90
Tabell 12: GWP fra de ulike livsløpsfasene	92
Tabell 13: Sorpsjonskurve steinull	99

Forkortelser

CLT	Cross laminated timber
KL / KL-tre	Massivtre (krysslaminert tre)
LCA	Life cycle assessment
EPD	Environmental product declaration (miljødeklarasjon)
RF	Relativ fuktighet
GWP	Global warming potential

Definisjoner

<i>Aktive tak</i>	Tak som skal benyttes utover det å skjerme for klimatiske påkjenninger. Inkluderer bla. blågrønne/blågrå tak, terrasser, takhager, lekeplasser og parkeringsarealer.
<i>Blågrå/blågrønne tak</i>	Begge har fordrøyende egenskaper som ved styrtregn forsinker nedbør og reduserer belastning på avløpsnettet.
<i>Blågrå tak</i>	Blågrå tak har overflate av døde materialer som belegningsstein.
<i>Blågrønne tak</i>	Blågrønne tak har overflate med beplantning.
<i>Intensive tak</i>	Intensive tak er tak laget for større planter og trær, og har vekstmedium på 150-400 mm
<i>Semi-intensive tak</i>	Semi-intensive tak har noe mindre tykkelse og vekt, og er gjerne 120-250 mm tykke.
<i>Ekstensive tak</i>	Ekstensive tak er relativt lette og har lite vedlikeholdsbehov. Typisk 60-200 mm tykke.
<i>Massivtre</i>	Bygningselementer som består av sammenkoblede lag med treplanker. Lagene er limt 90 grader i forhold til hverandre. Synonymer: KL-tre, KLT, krysslaminert tre, CLT, cross-laminated timber.
<i>Celleglass</i>	Celleglass er plater av et stivt og porøst isolasjonsmateriale som i hovedsak består av skummet glass.
<i>Skumglass</i>	Skumglass omtales i denne masteroppgaven som det samme materialet som celleglass, men i granulat- og pellets-form.

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

I lov om klimamål er det nedfelt at Norge skal redusere utslipp av klimagasser med 40 prosent innen år 2030 fra nivåene ved referanseåret 1990 (Klima- og miljødepartementet, 2019). Byggenæringen står for nesten 40% av de globale energirelaterte CO₂-utslippene (IEA, 2018) og omkring 25 % av det totale avfallet produsert i Norge hvert år (SSB, 2019). Det er derfor tydelig at byggenæringen må ta i bruk nye og mer miljøvennlige løsninger for at målsetningen om utslippskutt skal nås. Samtidig er det mye som tyder på at klimaendringene vi står overfor i Norge, vil øke påkjenningen på klimaskjermen, i hovedsak på grunn av hyppigere og kraftigere nedbør (Miljødirektoratet, 2019). Økte nedbørsmengder og høye tomtepriser i byene gjør at «aktive tak», i form av grønne tak, takhager, parkeringsplasser og andre bruksarealer, blir mer aktuelt. Slike tak fører ofte med seg økt slitasje på taket og redusert tilgjengelighet til tettesjiktet. Det er derfor viktig at nye miljøvennlige takkonstruksjoner som utvikles også tåler den økte bruken av takoverflaten, samtidig som de dimensjoneres for å tåle fremtidens klima.



Figur 1: Massivtreelement (Splitkon, 2020)

Klimaendringene, og myndighetenes økte satsing på å redusere utslippene har gjort byggenæringen mer fokusert på bærekraft og bidratt til en økt villighet til å bygge miljøvennlig (Byggeindustrien, 2018). Interessen for miljøvennlige materialer har økt. I Norge gjelder dette kanskje spesielt trevirke, som har dype røtter i norsk byggetradisjon og er lett tilgjengelig i Norge. Materialet binder CO₂ i byggets levetid, og med bærekraftig hogst, kan det derfor regnes som et klimanøytralt materiale (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006). Den økte interessen for miljøvennlige materialer i næringen kombinert med en

økt politisk vilje (Landbruks- og matdepartementet, 2018), har vært med å bidra til å øke populariteten for trebygg. I den siste tiden har det i tillegg blitt introdusert nye treprodukter som: massivtre, limtre og gitterkonstruksjoner, som for alvor har gjort det aktuelt å produsere større bygg med tre som bærende materiale. Av disse treproduktene er massivtre det nyeste og kanskje mest lovende. Massivtre blir av Treteknisk institutt definert som planker (lameller) som er satt sammen til elementer ved bruk av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag (Hefte 1, 2006). Elementene har relativt stor styrke og stivhet, noe som gjør de godt egnet til dekker, skjærvegger og bærende vegger i større bygg (Lukacs, Björnfort, & Tomasi, 2019).

Massivtre fører likevel med seg enkelte utfordringer. Materialet er organisk og dermed er det utsatt for mugg og råte ved høye fuktighetsnivåer. I tillegg har det en viss dampmotstand som kan by på problemer i kompakte tak fordi det reduserer muligheten til uttørring innover i konstruksjonen. Dermed øker sannsynligheten for mugg og råte. Materialet er også brennbart og spennvidden er mer begrenset enn i betong- og stålkonstruksjoner. Det er derfor behov for at de øvrige delene av takkonstruksjonen er lett, har høy brannmotstand og forhindrer fuktighet fra å trenge inn til massivtreet.

Isolasjonsplater av celleglass er en mulig løsning på noen av utfordringene som følger ved å bruke massivtre i tak. Isolasjonsplatene består av glass som har blitt omdannet til et stivt porøst glasskum (se Figur 2). Materialet er ubrennbart, slitesterkt og innehar høy trykkfasthet. I tillegg har det en lukket porestruktur, som gjør det både damp- og fukttett. Dette gjør det lovende til bruk i kompakte tak av massivtre og i tilfeller der tettesjiktet er spesielt utilgjengelig, som i aktive tak. Det er derimot enkelte aspekter ved materialet som kan by på noen problemer. I hovedsak har celleglass en større investeringskostnad enn andre isolasjonsmaterialer, noe som veier svært tungt i de fleste prosjekter. I tillegg kan den høye dampmotstanden by på problemer i massivtretak siden det sammen med massivtreet bidrar til å stenge eventuell fukt inne.



Figur 2: Celleglassplate (Foamglas, 2020)

1.2 Fordypningsprosjekt

Høsten 2019 ble det utført et fordypningsprosjekt som omhandlet fukt i kompakte tak av massivtre. Det ble utført intervjuer og en litteraturstudie for å avgjøre hvor godt egnet massivtre er som bærende materiale i kompakte tak. Prosjektet skulle også avdekkes spesielle fukttekniske utfordringer og undersøkes hvordan massivtre og blågrønne tak kan kombineres på en sikker måte.

Intervjuene utgjorde hovedkilden til informasjon for å besvare forskningsspørsmålene. Syv ulike aktører fra byggenæringen ble intervjuet i løpet av høsten 2019. Rollefordelingen blant aktørene var: tre entreprenører, en rådgivende ingeniør, en byggherre, en arkitekt og en produsent. Intervjuene var såkalte semistrukturerte intervjuer som stort sett ble utført over videosamtale. Det ble skrevet intervjuguide i forkant av hvert intervju, og notert underveis i intervjuene. Intervjuførelserne ble deretter finskrevet av forfatterne før de ble rettet og godkjent av aktørene selv.

Litteraturstudien skulle gi forfatterne det nødvendige teoretiske grunnlaget for oppgaven samtidig som den skulle kartlegge tidligere forskning på området. Studien ble utført ved såkalt «forwards» og «backwards snowballing». Dette er en litteratursøkemethode hvor man studerer henholdsvis siteringene og kildelisten til et knippe utgangskilder med høy relevans for å finne flere aktuelle kilder.

I prosjektet ble det konkludert med at massivtre egner seg godt som bærende materiale i kompakte tak, spesielt der øvrig bærekonstruksjon er av massivtre. Samtidig har materialet noe begrenset spennvidde som gjør det bedre egnet i bygg med mindre spennvidder. I tillegg er det svært viktig at fuktsikkerheten er ivarettatt. De viktigste tiltakene er å påse at fuktnivået i massivtreet er tilstrekkelig lavt før man monterer tettesjiktet i overkant, og at tettesjiktet er tilstrekkelig tett. Noe usikkerhet ble knyttet til hvordan dette skal gjøres på best mulig måte og det ble etterlyst mer forskning på materialoppførsel over lang tid.

Det ble også konkludert med at uavhengig av bærekonstruksjon burde ekstra tiltak iverksettes for å unngå perforeringer av membranen i såkalte intensive grønne tak. Dette fordi tettesjiktet ligger såpass utilgjengelig til i slike konstruksjoner.

Under intervjuene ble det foreslått å benytte isolasjonsplater av celleglass for å gjøre tettesjiktet ekstra slitesterkt. Det ble tydelig at de fleste aktørene var positive til egenskapene til dette materialet, men at fordelene ikke var verdt den høye prisen. Det ble også tydelig at det var liten erfaring med bruk av celleglass blant de spurte.

Bruken av celleglassplater i kompakte massivtretak ble sett på som et interessant tema for masteroppgaven grunnet de mange gode egenskapene til materialet og den manglende kunnskapen i næringen. Det ble også sett på som spesielt aktuelt i de tilfellene der tettesjiktet ligger utilgjengelig til, og slitasjen på takoverflaten er stor.

1.3 Forskningsbehov

Selv om celleglass utviser mange egenskaper som på papiret synes gunstig, er det svært lite brukt i Norge. Som nevnt i forrige delkapittel ble det avdekket at mye av årsaken

virker å være den høye prisen, men det manglende forsknings- og erfaringsgrunnlaget i norsk byggenæring kan også være en medvirkende faktor. Lite norsk testing og forskning er blitt utført på celleglassplater og det foreligger ennå ikke noen teknisk godkjenning for den eneste produsenten som leverer til Norge (Pittsburg Corning). Økt testing i Norge og en teknisk godkjenning vil mest sannsynlig bidra til å senke terskelen for å benytte seg av materialet i norske byggeprosjekter.

Flere studier utført de siste årene har pekt på manglende kunnskap i næringen og behov for økt forskning og tydeligere retningslinjer for bygging med massivtre. I fordypningsoppgaven ble det også klart at det hersker noe uenighet om hvordan kompakte tak av massivtre skal utføres sikrest mulig med tanke på fukt.

Det finnes også erfaring med kombinasjonen massivtre og aktive tak. En kombinasjon av massivtre og celleglass vil i mange tilfeller være aktuell da begge produktene har gunstige miljøegenskaper. Celleglass utviser visse egenskaper som gjør det spesielt godt egnet å benytte sammen med aktive tak. Aktivt tak av massivtreelementer med celleglassisolasjon er derfor en konstruksjonstype som byggenæringen ser på som interessant for fremtiden, men som det foreløpig finnes svært liten erfaring og forskning på.

1.4 Mål og omfang

Denne masteroppgaven har som mål å gjøre en utredning av aktive tak med massivtreelementer og celleglassisolasjon.

Studien søker svar på følgende forskningsspørsmål:

1. Hvor godt egnet er celleglassisolasjon i kombinasjon med dekker av massivtre i aktive tak?
2. Hvilke bygningsfysiske og bygningstekniske utfordringer kan oppstå i aktive tak av massivtreelementer og celleglassisolasjon?
3. Hvordan bør oppbygging og utførelse av aktive tak av massivtreelementer og celleglassisolasjon være for å sikre tiltenkt ytelse og lang levetid?

Masteroppgaven vil forsøke å besvare forskningsspørsmålene ved hjelp av en dokumentstudie, intervjuer av relevante aktører i næringen, ved bruk av fuktbergningsprogrammet WUFI 1D Pro og en enkel livsløpsvurdering.

Det er et hovedmål med oppgaven å utarbeide retningslinjer for prosjektering og plassbygging av kompakte massivtretak med celleglassisolasjon og aktive tak.

1.5 Begrensninger/avgrensninger

Masteren bygger videre på arbeidet som ble gjort i fordypningsoppgaven som er nærmere beskrevet i kapittel 1.2 Fordypningsprosjekt. Deler av dette arbeidet har høy relevans for temaene i masteroppgaven og gir et godt grunnlag for videre arbeid. Noe av arbeidet som er gjort i masteroppgaven er gjort med tilnærmet lik fremgangsmåte som i fordypningsprosjektet. Dette gjelder spesielt for intervjuene, men også litteratursøket

har blitt utført på nesten samme måte. Det er derfor naturlig at disse delene av metodebeskrivelsen også er tilnærmet lik som den som ble gitt i fordypningsprosjektet. Som nevnt har også deler av teorien fra fordypningsprosjektet høy relevans for studien og det er derfor store likheter i deler av teorikapittelet. Legg merke til at det ikke nødvendigvis er kildehenvist til fordypningsoppgaven i disse delene.

I studien er det kun valgt å studere flate kompakte tak. Dette er en naturlig avgrensning fordi det er i slike tak det er mest sannsynlig at celleglassisolasjon og aktive tak vil bli brukt. Det er tenkt at det er mindre sannsynlig at aktive tak er aktuelt med skrå luftede tak.

Det er heller ikke tatt med smarte dampsperrer eller dampbremsere i vurdering av sperresjikt. Masteroppgaven dreier seg stort sett om celleglass og aktive tak, og disse alternative sperresjiktene ble sett på som mindre viktige. Dette valget diskuteres mer i kapittel 5.

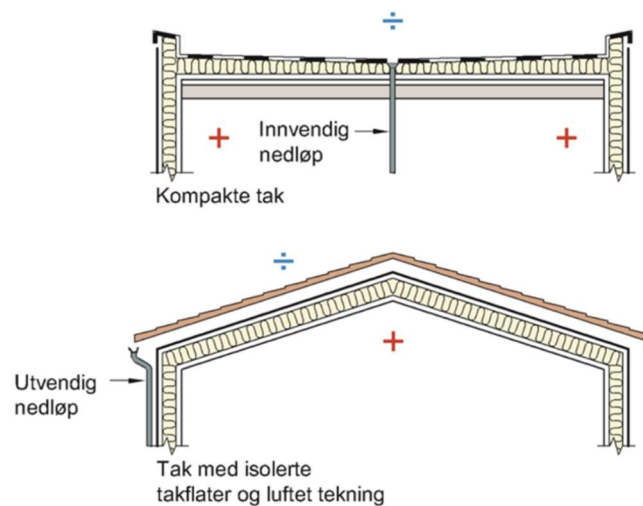
Mange av aktørene som det ble snakket med høsten 2019 var positive til egenskapene som celleglass innehar. Det største argumentet mot isolasjonsmaterialet, som ble tatt opp av flere, var den høye prisen til løsningen. Dette var også noe samarbeidspartner Multiconsult var veldig interessert i at skulle undersøkes nærmere. I oppgaven ble det imidlertid besluttet å ikke prioritere en grundig vurdering av økonomien til de alternative løsningene. Forfatterne har derimot gjort seg opp noen tanker om temaet som blir presentert i diskusjonskapittelet. Det er viktig å understreke at dette kun er basert på forfatternes egne erfaringer og samtaler med aktører i bransjen, og at det ikke er gjort noen grundig analyse av de økonomiske aspektene ved løsningene.

2 Teori

Kapittelet er ment å gi et teoretisk rammeverk for masteroppgaven. Første del tar for seg henholdsvis kompakte og aktive tak. Det er fokusert på de vanligste oppbygningene og anbefalt oppbygning for massivtretak. Deretter følger en gjennomgang av materialene celleglass og massivtre, inkludert historie, fremstilling, materialoppbygning og spesielle egenskaper. I kapittel 2.5 gjennomgås noen viktige bygningsfysiske prinsipper som kan være relevant for de foregående kapitlene, og for resten av oppgaven. Siste del av teorikapittelet handler om teorien bak varme- og fuktsimuleringsprogrammet WUFI.

2.1 Kompakte tak

Takkonstruksjoner kan deles inn i to hovedtyper etter oppbygning: kompakte, varme tak og luftede, kalde tak (se Figur 3). Luftede tak har lufting under tekningen som gir taket en uttørkingsevne. Slike tak egner seg best i små- og mellomstore bygninger (Geving & Thue, 2002). Kompakte tak har ingen planlagt naturlig lufting eller uttørkingsevne. Taktypen egner seg både på små og store takflater. Kompakte tak er den vanligste taktypen når det skal bygges om til blågrønne eller blågrå tak (Byggforskserien 525.207).

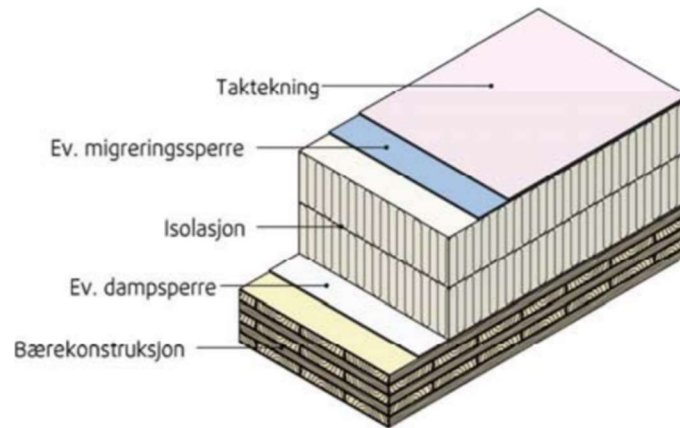


Figur 3: Takoppbygninger (Byggforskserien 525.002).

Mangelen på naturlig lufting eller selvuttørking gjør at byggfukt og annen fuktighet som kommer inn i taket kan bli værende mellom taktekkingen og dampsperreren i lang tid før den eventuelt tørker ut. Derfor bygges slike tak vanligvis opp av materialer som ikke er fuktømfintlige eller råtefarlige (Uvsløkk, 2008).

2.1.1 Oppbygning og materialvalg

I Figur 4 er det vist en prinsipiell oppbygning for et rettventd kompakt tak med massivtre som det bærende materialet. Oppbygningen er et godt utgangspunkt for resten av delkapittelet fordi den også beskriver den mest vanlige sjiktsekvensen i kompakte tak.



Figur 4: Prinsipiell oppbygning av et kompakt tak (Time, et al., 2008)

Bærekonstruksjon

Som vist på figuren er det vanlig å ha bærekonstruksjonen på innsiden av isolasjonen og sperresjiktet i kompakte tak. Vanlige materialer å benytte i bærekonstruksjonen er plasstøpt betong, betongelementer, korrugerte stålplater, trebjelkelag og massivtre (Byggforskserien 525.207). Det er ofte ønsket å ha eksponert massivtre i et bygg, både av estetiske hensyn og for å dra nytte av energilagring i materialet. I noen tilfeller er det krav til brannbeskyttende kledning som hindrer dette (Wahlstrøm, 2019).

Sperresjikt

Det er vanlig å plassere et sperresjikt på utsiden av bærekonstruksjonen i kompakte tak («Ev. dampsperre» i Figur 4). Sperresjiktet skal sørge at diffusjon og luftlekkasjer ikke driver fuktighet utover i konstruksjonen. Sperresjiktet plasseres på utsiden av bærekonstruksjonen for å forhindre at sistnevnte ligger mellom to damptette sjikt. Dette er spesielt viktig med bærekonstruksjon av tre, siden trevirke er et organisk materiale og derfor tåler høy fuktighet dårlig.

I bygningssammenheng sorteres de ulike sperresjiktene etter hvor stor dampmotstand de har. Ifølge Sintef Byggforsk er et materialsjikt damptett når det har en SD-verdi større enn 10 m. Slike materialsjikt kan kalles dampsperrer. Et materialesjikt er dampåpent når det har en SD-verdi mindre enn 0,5 m (Byggforskserien 573.430). Slike materialsjikt kalles ofte vindsperrer. Vanlige produkter her er forhudningspapp, polyetylenfolie (PE-folie), asfaltimpregnert trefiberplate osv. Materialer med dampmotstand mellom 0,5 og 10 meter betegnes ofte som dampbremsere, men det er ingen definert grense på SD-verdien til dampbremsere (Time, et al., 2008).

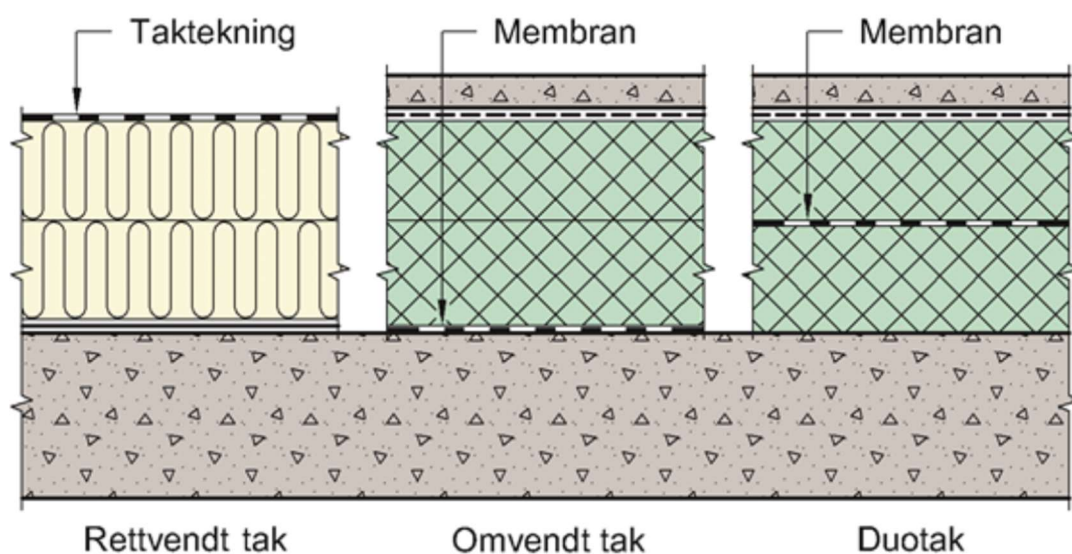
I kompakte tak er det mest vanlig å benytte en dampsperre i overkant av bærekonstruksjonen, i form av en 0,2 mm PE-folie (Byggforskserien 525.207). PVC-folie og asfaltmembraner er imidlertid også vanlig. Disse er som regel mer slitesterke og har dermed mer motstandsevne mot perforeringer enn PE-folier. De er derimot også dyrere og tar lenger tid å montere. I kompakte tak kan man også benytte dampbremsere (SD-verdi mellom 0,5 og 10 m) og smarte dampsperrer (variabel SD-motstand avhengig av omgivende fuktforhold). I forbindelse med fordypningsprosjektet uttalte flere aktører i byggenæringen at det viktigste med bærekonstruksjon av massivtre var å sørge for tilstrekkelig lufttetthet. Teiping av skjøter og vindsperrer er derfor også alternativer til dampsperre som sperresjikt (Bakken & Kolsaker, 2019).

Vanntettende sjikt

Kompakte tak deles inn i rettvendte tak, omvendte tak og duotak etter hvor i konstruksjonen det vanntettende sjiktet er plassert. Tettesjiktet kalles membran når det er bygd inn i konstruksjonen og taktekning når det er plassert ytterst som det klimaeksponerte sjiktet (Byggforskserien 525.207). Rettvendte tak er det vanligste i kompakte tak. I denne takkonstruksjonen er all isolasjonen under tettesjiktet. Rettvendte tak egner seg godt i konstruksjoner hvor det skal være lite trafikk på takoverflaten. Vedlikehold av taktekning og isolasjonssjikt er også enklere.

I omvendte tak og duotak er membranen plassert henholdsvis under all isolasjonen og mellom isolasjonslagene (se Figur 5). Dette gjør at membranen ligger mer beskyttet, og derfor benyttes ofte duo- og omvendte tak på mer trafikkerte takarealer (Byggforskserien 525.207).

Brannmotstanden må tilfredsstillende $B_{ROOF}(t_2)$ dersom det vanntettende sjiktet er en taktekning (ligger utenfor all isolasjonen). Dersom det vanntettende sjiktet ligger mellom isolasjonslagene stilles det imidlertid ikke krav til brannmotstanden til sjiktet (Takprodusentenes forskningsgruppe, 2019). Det må imidlertid gjøres en vurdering av brennbarheten til sjiktene som ligger over membranen i slike konstruksjoner.



Figur 5: Rettvendt tak, omvendt tak og duotak (Byggforskserien 525.207)

Varmeisolasjon

De vanligste brennbare isolasjonsmaterialene har tradisjonelt vært ulike typer plastisolasjon (vanligvis XPS og EPS). Blant ubrennbare isolasjonstyper er mineralull (glassull og steinull) det vanligste, men celleglassplater og skumglassgranulat kan også benyttes. Plastisolasjon brukes vanligvis som betegnelse for ekspandert- og ekstrudert polystyren (EPS og XPS). Dette er isolasjonsplater med høy trykkfasthet. XPS har lukket porestruktur, mens EPS har delvis åpen porestruktur. Mineralull er en fellesbetegnelse for steinull og glassull. Isolasjonstypen leveres som matter, plater og løsfyll til innblåsing. Mineralull leveres med forskjellig densiteter, der tyngre og hardere plater ofte har større trykkfasthet (Byggforskserien 573.344).

Hovedregelen er at det må benyttes ubrennbar isolasjon i takkonstruksjoner, men en kan benytte brennbar isolasjon på ubrennbare underlag som betong. Om brennbar isolasjon brukes, settes det imidlertid brannkrav som at isolasjonen enten tildekkes med ubrennbart materiale eller deles opp i mindre arealer (Byggforskserien 525.207). For underlag som presterer dårlig i brann, som massivtre og korrugerte stålplater, må det som hovedregel benyttes ubrennbar isolasjon for at løsningen skal være brannteknisk preakseptert. Dette kan bare fravikes dersom det gjøres en spesiell brannteknisk analyse (Takprodusentenes forskningsgruppe, 2019).

Sintef har også anbefalinger for trykkfastheten til isolasjonssjiktet. De anbefaler en topplagisolasjon med trykkfasthet på minimum 60 kPa ved 10 % deformasjon (CS(10) 60) og minimum 50 kPa (CS(10) 50) lenger ned i isolasjonssjiktet (Byggforskserien 525.207).

I duotak og omvendte tak må isolasjonen som er plassert over membranen ha lavt fuktopptak. Det betyr at en må benytte enten XPS, celleglassplater eller skumglassgranulat i dette isolasjonssjiktet (Byggforskserien 525.207).

2.2 Aktive tak

Det bygges stadig flere grønne tak i Norge (Noreng & Kvalvik, 2013). Høye tomtepriser og plassmangel i byene gjør det gunstig å ta i bruk takarealene i større grad enn tidligere. Det har også vært en dreining mot mer lokal overvannshåndtering med færre harde flater og flere gjennomtrengelige grønne overflater for å redusere belastningen på avløpsnettene. Særlig i storbyene, som for eksempel i Oslo kommunes «Strategi for overvannshåndtering» blir grønne tak nevnt spesielt som et viktig tiltak for å håndtere overvann (Oslo Kommune, 2013). Flere grønne områder i byene vil bidra til å redusere utslippene av drivhusgasser til atmosfæren ved at de binder CO₂. De grønne områdene reduserer også støv og lokal forurensing.

Med «aktive tak» menes det i denne masteroppgaven alle tak som skal benyttes til mer enn det å skjerme for klimatiske påkjenninger. En lignende definisjon ble brukt av Sintef da de i 2008 ga ut en temaveileder for flate aktive tak (Noreng, Brevik, & Jelle, 2008). Aktive tak er et uttrykk som er relativt lite brukt i norsk litteratur. Den litteraturen som finnes benytter seg ofte av de mer spesifikke betegnelsene som, grønne, blågrønne eller blågrå tak, og ser på løsninger som retter seg spesifikt mot de ulike typene. Det sees imidlertid på som relevant å inkludere alle taktyper som gir ekstra belastning og slitasje

på takkonstruksjonen. Med bakgrunn i dette er det nyttig å definere et samlebegrep som inkluderer alle de ulike takkonstruksjonene. Både de fordrøyende takene (blågrå, blågrønne), men også tak hvor hovedfunksjonen ikke er de fordrøyende egenskapene (lekeplasser, parkeringsarealer, energiproduksjon med solceller).

Høye tomtepriser og plassmangel, kombinert med ønske om lokal håndtering av regnvann, samt effekten de grønne takene har på luftkvaliteten i byene, er altså hovedårsakene til at det bygges flere aktive tak i Norge. Aktive tak vil derimot også by på noen utfordringer, der økt tyngde, større tykkelse på takkonstruksjonen og økt behov for vedlikehold er noen. I tillegg vil tettesjiktet bli mer utilgjengelig, og bruken og slitasten av takoverflaten vil bli større. Dermed øker både sannsynligheten og konsekvensen for perforeringer av tettesjiktet og påfølgende lekkasjer. Det er derfor svært viktig at takkonstruksjonene dimensjoneres for å tåle den økte belastningen.

2.2.1 Blågrønne tak

Blågrønne tak er tak med overflate bestående av plantearter og samtidig har egenskaper som kan bidra til å forsinke og redusere regnvannavrenning. Blågrønne tak deles inn i ekstensive, semi-intensive og intensive tak. Ekstensive tak er relativt lette, har lite vedlikeholdsbehov og er typisk 60-200 mm tykke. Semi-intensive tak har noe større tykkelse og vekt, og er gjerne 120-250 mm tykke. Intensive tak er tak laget for større planter og trær, og har vekstmedium på 150-400mm (Elvebakk, Time, Skjeldrum, & Kvande, 2018).

2.2.2 Blågrå tak

Blågrå tak kan minne om blågrønne tak ved at de også har fordrøyende egenskaper. Forskjellen er at de blågrå takene har et topplag av belegningsstein eller lettklinker i stedet for plantearter (Elvebakk, Time, Skjeldrum, & Kvande, 2018). Taket bidrar derfor til å reduseres belastning på avløpsnett, men har ikke de samme positive effektene på luftkvaliteten og miljøet, og gir ikke det samme estetiske uttrykket. På grunn av dette har ikke blågrå tak fått like mye oppmerksomhet som grønne og blågrønne tak. Det finnes likevel argumenter for å velge blågrått. Takoverflaten består av bare døde materialer som stein eller steinfraksjoner, og vil derfor ikke være like utsatt for ekstremvær som grønne tak kan være (Elvebakk, Time, Skjeldrum, & Kvande, 2018). I tillegg vil behovet for vedlikehold være mye mindre. Overflaten vil også være mer slitesterk enn i de fleste grønne takløsningene.

2.2.3 Andre bruksarealer

I mange tilfeller er det ikke nødvendigvis lokal regnhåndtering som er årsaken til å benytte seg av takoverflaten, men ønsket om å benytte arealene til andre formål. Ordet «Takhage» kan benyttes om bruksarealer på taket som det ellers ikke er plass til, for eksempel lekeplasser, små parker eller lignende. Takarealene kan også kombineres med energiproduksjon med solceller eller parkeringsplasser på hele eller deler av taket. På takhager vil det kanskje være noen fordrøyende soner hvor taket enten kan regnes som blågrønt eller blågrått, mens andre deler av taket vil være bygd opp av harde flater. Aktive tak vil ofte ha større aktivitet enn normalt, noe som kan øke faren for lekkasjer.

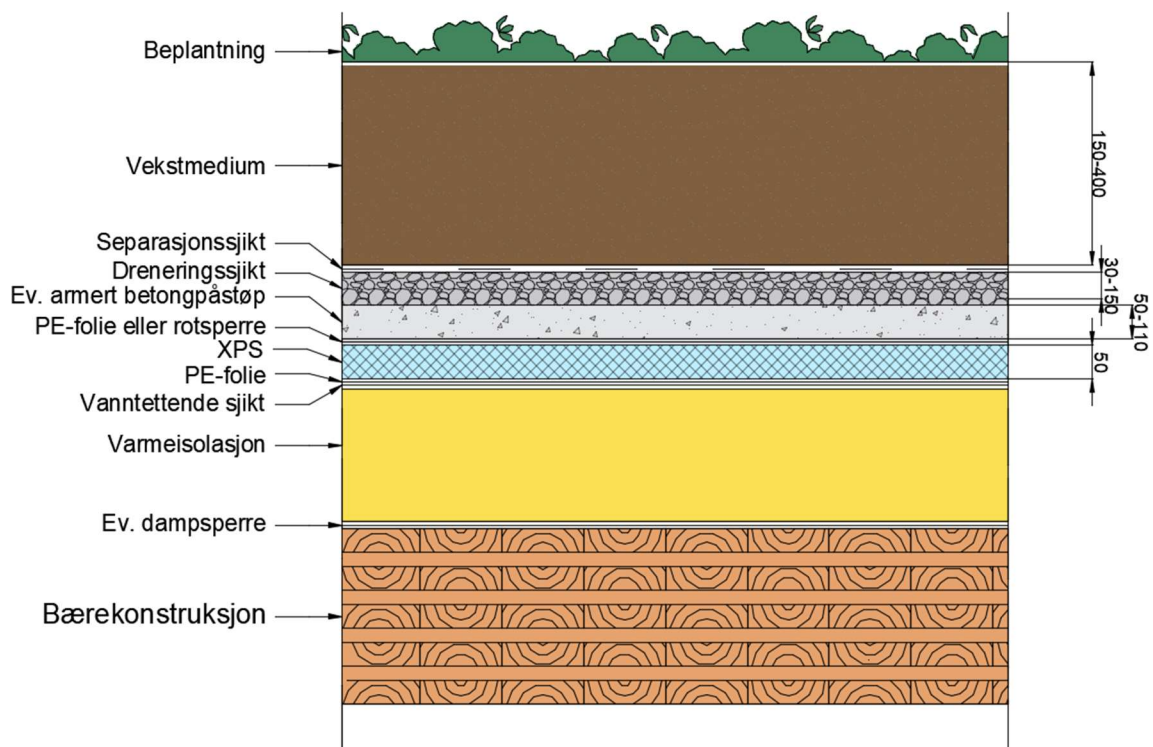
Graving, økt tyngde, etablering og vedlikehold av lekestativer og andre installasjoner er eksempler på mulige kilder til perforering.

2.2.4 Oppbygning grønne tak

Takkonstruksjonen i aktive tak opplever mange av de samme problemstillingene som i vanlige kompakte tak, og av den grunn er også den anbefalte oppbygningen relativt lik. Dette kapittelet konsentrerer seg om oppbygningen til intensive blågrønne tak, siden det kan sees på som den typen aktivt tak som gir størst utfordringer. Mange av de samme betraktningene og materialsjiktene er imidlertid også relevant for andre aktive takoppbygninger.

De største forskjellene på et vanlig kompakt tak og et grønt tak er knyttet til vekstlaget. Her må en ta hensyn til mer vannlagring, drenering, vekstlag, rotsperre og beplantning. Det er også større vekt og slitasje på takoverflaten, som setter større krav til beskyttelse av membran, trykkfastheten til konstruksjonen og kapasiteten til bærekonstruksjonen. I delkapitlene som følger blir de spesielle tiltakene som er nødvendig å gjøre i aktive tak gjennomgått. Siden deler av konstruksjonen er relativt like som i vanlige kompakte tak henvises det til kapittel 2.1.1 for en gjennomgang av disse delene av konstruksjonen.

Figur 6 viser en mulig oppbygning for et blågrønt kompakt tak. Figuren er produsert av forfatterne, men er basert på figurene som er presentert av Byggforsk i databladet for terrasser med beplantning på bærende betongdekker (Byggforskserien 525.306).



Figur 6: Illustrasjon av oppbygning av et intensivt grønt kompakt tak.

Varmeisolasjon

I valget av type og tykkelse på varmeisolasjon må det tas litt andre hensyn i intensive grønne tak enn i vanlig kompakte tak. Som i kompakte tak kan det benyttes både brennbar og ubrennbar isolasjon, gitt at bærekonstruksjonen ikke er brennbar. I slike tilfeller må det også her gjøres spesielle vurderinger. Dersom isolasjonen ligger på et ubrennbart underlag, er det som regel ikke nødvendig med branntiltak som å dele opp eller tildekke brennbar isolasjon, siden intensive tak er antatt å ha jevnlig vedlikehold og dermed god motstand mot varm stråling og gnister.

Det er også større fordelt last over hele takflaten i aktive tak. Det må derfor gjøres en vurdering av om det er nødvendig å øke trykkfastheten på isolasjonen. Spesielt i soner under større vegetasjon, eller andre områder det forventes større laster. I litteraturen er det derimot ikke anbefalt mye større trykkfasthet enn i vanlige kompakte tak. Anbefalingene fra Sintef Byggforsk er at isolasjonen burde ha trykkstyrke på minst 60 kPa i intensive grønne tak (Byggforskserien 525.306). I «vanlige» kompakte tak er anbefalt trykkstyrke 50 kPa på hoveddelen av isolasjonen (Byggforskserien 525.207). I intensive grønne tak er det også anbefalt å bygge taket som en duokonstruksjon med en fuktavvisende XPS over membranen. Denne skal beskytte membranen i anleggstiden og mens bygget er i drift (Byggforskserien 525.306).

Argumentasjonen for en høy trykkstyrke i isolasjonen er at det forhindrer at hele isolasjonslaget blir presset sammen. Sammenpressingen kan gjøre at membranen strekkes og løsner i oppbrettene mot parapet, gjennomføringer og tilstøtende konstruksjoner. I vanlige tak er det også anbefalt å ha stor trykkfasthet for å forhindre at isolasjonen føles myk å gå på og at det danner seg groper i isolasjonen hvor det kan samles stående vann (Byggforskserien 525.306) (Noreng, 2017).. Dette er et mindre problem i intensive grønne tak, siden lasten blir fordelt av jordlaget og eventuelle lag av XPS og betong. Den fordelte lasten er imidlertid større, og det må gjøres en vurdering av fordelt last i hvert enkelt prosjekt.

Vanntettende sjikt

Som nevnt er duokonstruksjoner anbefalt i kompakte aktive tak med stor belastning og høy slitasje, som takhager/intensive tak. Den økte belastningen og slitasjen gjør at det vanntettende sjiktet er mer utsatt for perforeringer, og det må gjøres tiltak for at denne skal ligge mer beskyttet enn vanlig. Omvendte tak er også mulig, men da må all isolasjonen over det vanntettende sjiktet være fuktbestandig.

Det kan også være aktuelt med en ekstra rotbestandig membran, for å forhindre større røtter fra å trenge gjennom membranen. Ekstra UV-motstand og brannmotstand på tettesjiktet er ikke nødvendig når en har et intensivt grønt tak over (Noreng, et al., 2012).

Beskyttelsessjikt

Som nevnt er det vanlig å legge et beskyttende lag av fuktbestandig isolasjon over membranen slik at en får en duokonstruksjon. Det vanligste å benytte er en XPS med tykkelse 50 mm eller mer, men også skumglassgranulat og celleglassplater er mulig å

benytte (Byggforskserien 525.306). Dersom det benyttes XPS-isolasjon er det også anbefalt å benytte en 0,15-0,2 mm PE-folie på begge sider av denne isolasjonen som fungerer som glidesjikt i konstruksjonen (Byggforskserien 525.306).

Rotsperre

Der det er større vegetasjon på overflaten må det etableres ekstra rotbeskyttelse av membranen (Byggforskserien 525.306). Dersom membranen i seg selv ikke har ekstra stor rotbestandighet er det nødvendig med en rotsperre for å forhindre røtter fra å trenge gjennom tettesjiktet. Dette løses vanligvis med en form for geotekstil (fiberduk) av polypropylen eller lignende, som legges over beskyttelsessjiktet av XPS. Dette er ikke nødvendig der en benytter en betongpåstøp, som i seg selv vil fungere som rotsperre.

Betongpåstøp

I enkelte konstruksjoner med stor mekanisk belastning kan det være aktuelt med en armert påstøp i betong for å fordele punktlastene på isolasjonen og gi økt beskyttelse mot perforeringer av tettesjiktet. Det er lite informasjon å finne om tykkelser på betongpåstøp og dimensjoner på armering i grønne tak. Takprodusentenes Forskningsgruppe har imidlertid en anbefaling for terrassegulv med slitelag av flis, der de anbefaler 50-120 mm tykkelse på betongen. De anbefaler å benytte armering dersom betongen er tykkere enn 50 mm (Noreng, 2017).

Drenerings- og separasjonssjikt

Det er viktig at det etableres et drenerende sjikt under vekstmediumet slik at vann som trenger gjennom blir ledes vekk fra takoverflaten. Det drenerende sjiktet kan også ha en viss vannlagringskapasitet slik at avrenningen forsinkes. Vannlagringen i dreneringssjiktet er også gunstig for å sikre planterøttene tilgang på vann i tørre perioder (Noreng, et al., 2012). Drenssjiktet kan bestå av vasket grus/singel (16-32 mm), drensplater av plast (for eksempel drensplater med knaster), XPS med drensiller eller løs lettklinker (Byggforskserien 525.306).

I grønne tak må det også etableres et separasjonssjikt mellom vekstmediumet og det drenerende sjiktet slik at finstoff ikke trenger gjennom og blander seg med de drenerende massene eller på annen måte reduserer dreneringsevnen. Separasjonssjiktet kan for eksempel være en fiberduk (150 g/m²) (Byggforskserien 525.306).

Vekst- og vegetasjonslag

Vekstmediumet må ha en tykkelse som er tilpasset størrelsen på vegetasjonen over slik at røttene ikke blir stående i vann. I tillegg må vekstlaget ha tilstrekkelig rask drenering slik at vann ikke blir stående og blir surt, da dette kan gjøre at røttene råtner. Samtidig snakker en ofte om fordrøyende effekt i grønne tak. Dette er evnen takkonstruksjonen har til å forsinke avrenningen fra takoverflaten. Mye av denne effekten må skje i vekstmediumet. Det er også viktig at avrenningen ikke går for raskt slik at vekstmediumet blir for tørt for røttene. Det er altså viktig at vekstmediumet har en viss drenering, men det er samtidig også viktig at denne dreneringen ikke skjer for raskt.

Minimum anbefalt tykkelse på vekstmediumet varierer fra 100 mm for gressplen og lave stauder til 1500 mm for store trær og busker på inntil 5 m høyde (Byggforskserien 525.306).

2.3 Celleglass

Celleglass er et stivt porøst isolasjonsmateriale som i hovedsak består av skummet glass. Materialet har høy trykkfasthet, lav varmekonduktivitet og er ubrennbart. I tillegg har det en hermetisk lukket porestruktur som gjør det damp- og fuktett. Damp og fuktettheten gjør det godt egnet der det er høy fukt- og trykkbelastning, som i veifyllinger, som isolasjon mot grunnen og i aktive tak. Ubrennbarheten gjør det også godt egnet i skip, oljeplattformer og i bygg hvor det er krav om ekstra sikkerhet mot eksplosjoner. Materialet produseres i stor grad av resirkulert glass, angripes ikke av skadedyr, avgir ingen miljøgiftige stoffer og har svært lang levetid (FOAMGLAS Nordic AB, 2013).

2.3.1 Produkttyper

Det skilles mellom tre ulike produkttyper: skumglassgranulat, celleglassplater/blokker og kuleformede skumglasspellets (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004). Produsenten som er intervjuet i denne masteroppgaven benytter celleglass for å omtale platene de produserer, mens de omtaler granulat og pellets som skumglass. Det er derfor valgt å følge dette videre i oppgaven.

Alle produktene har glass som hovedbestanddel og produseres med mange av de samme metodene og prinsippene. Platene kan limes sammen og kombinert gir dette et helt dampnett isolasjonssjikt. I studien av kompakte aktive tak av massivtre er denne dampnettheten noe av det som gjør celleglassplater ekstra interessant. Det dampnette isolasjonssjiktet fungerer nemlig som et ekstra slitesterkt tettesjikt, noe som kan gjøre det mindre utsatt for lekkasjer. Denne dampnettheten er ikke mulig å oppnå med de to andre produktene, og av den grunn er det celleglassplater som er mest relevant for masteroppgaven. Når det snakkes om materialet i påfølgende kapitler er det derfor celleglassplater det siktes til, men mye vil også være gjeldende for de andre produkttypene. Det er likevel valgt å inkludere en kort beskrivelse av de andre produkttypene, for å tydeliggjøre forskjellen på de tre.

Celleglassplater

Celleglassplater, eller bare celleglass, er stive og porøse isolasjonsplater/blokker som produseres av resirkulert glass. Platenes høye trykkfasthet, vanntetthet og dampnetthet gjør de godt egnet som isolasjon i og mot grunnen. De kan også benyttes i vegger, tak, gulv og terrasser. Leggingen foregår som regel med et varmt bitumen-lim eller med et kaldt lim i skjøtene. Med riktig utførelse kan isolasjonssjiktet regnes som helt dampnett og dampsperre er dermed unødvendig. Platene leveres med i tykkelser på 40-200 mm, lengder og bredder på henholdsvis 600-1200 mm og 450-600 mm.

Det er foreløpig ikke produksjon i Norge, men platene leveres til Norge av Foamglas Nordic AB. Dette er et datterselskap av den amerikanske produsenten Owens Corning som har produksjon i flere europeisk land. Foamglas Nordic AB er å regne som representanter for produsenten siden det er et datterselskap av produsenten. Når det videre i oppgaven henvises det til celleglassprodusenten siktes det derfor til Foamglas Nordic AB.



Figur 7: Celleglassplate (FOAMGLAS Nordic AB, 2020)

Skumglassgranulat

Skumglassgranulat er nok det av produktene som er vanligst i Norge. Produktet skiller seg fra celleglass ved at det legges løst og at man derfor ikke får et damptett sjikt, men mulighet for fuktvandring. Det er derimot ikke mulighet for kapillært sug i materialsjiktet. Granulatet egner seg godt som bruk i fyllmasser og som grunnisolasjon fordi det tillater drenering og hindrer varmetap mot grunnen. Materialet har lav vekt og høy varmemotstand sammenlignet med andre fyllmasser. I tillegg har det relativt høy styrke noe som gjør det godt egnet til bruk som isolasjon og fyll mot grunnen fordi det gir lavt jordtrykk, samtidig som styrken er relativt høy. Produktet kan også benyttes som tilslag i betong (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004), men dette blir ikke gjort i stort omfang i Norge.

Materialet leveres med dimensjoner på 10-60 mm (Byggforskserien 573.344). Glasopor AS, som er eid av Norsk glassgjenvinning, er den eneste norske produsenten (Statens vegvesen, 2015). De oppgir 100 prosent resirkulert glass i sitt produkt.



Figur 8: Skumglassgranulat (Glasopor) Foto: Katrine Lunke

Skumglasspellets

Det siste og kanskje minst brukte produktet, er skumglasspellets. Produktet består av de samme materialene som de andre, men her formes de til kuler før de går gjennom de samme prosessene som de andre. De ferdige kulene kan så benyttes på samme måte som skumglassgranulatet, men kulene kan også varmes opp på nytt og formes til blokker og plater (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

2.3.2 Historie

Informasjonen som finnes om utviklingen av materialet etter andre verdenskrig er svært begrenset. Boken «Cellular Ceramics» har imidlertid et kapittel som omhandler celleglass, der materialets tidlige historie og utvikling blir gjennomgått (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004). Masteroppgaven har derfor hentet mye fra denne boken.

De første kjente tilfellene av celleglassproduksjon kan dateres tilbake til 1930-tallet. Kitaigorodski var en av de første, da han i 1932 begynte produksjon av celleglass, ved å blande pulverisert glass og kalkstein (CaCO_3) (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004). Prosessen han brukte ligner dagens metoder, ved at en såkalt aktivator benyttes. Ved oppvarming produserer aktivatoren gasser som blander seg med det smeltende glassmaterialet og skaper porestrukturen. Resultatet av prosessen til Kitaigorodski ble et celleglassprodukt med densitet på $0,3 \text{ g/cm}^3$, 5 mm porediameter og termisk konduktivitet på mellom 0,06 og 0,08 W/mK (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

Metoden til Kitaigorodski er en såkalt sintringsprosess, hvor et pulverisert mineral eller metall herder til et fast stoff. Under en slik prosess varmer en opp det pulveriserte materialet til en temperatur litt under smeltepunktet, noe som fører til at de små materialkornene reagerer med hverandre og vokser sammen (Kolbeinsen, 2019). De vanligste produksjonsprosessene i dag benytter også sintring.

Senere på 30-tallet ble det, i USA og Frankrike, gjort mye forskning på å utvikle en alternativ produksjonsmetode hvor det ble ført gasser direkte inn i det smeltende glasset. Lytle beskrev metoden i 1940, hvor det ble ført gasser (CO₂, vanddamp eller luft) inn i bunnen av en sylindrerformet form som inneholdt det smeltede glasset. Flere forbedringer ble senere introdusert, deriblant bruk av vakuum for å øke størrelsen på porene, og lokal oppvarming av glasset kombinert med tilførsel av gasser (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004). Metoden hvor gasser ble ført inn i det smeltede glasset er derimot lite i bruk i dag, blant annet fordi den krever mye energi i produksjonsprosessen. Sintringsprosessene krever ikke like høy temperatur og disse ble derfor foretrukket.

I løpet av 2. verdenskrig ble det behov for et lett isolerende, trykkfast og ubrennbart materialet man kunne benytte på båter og ubåter. Dette gjorde at utviklingen av celleglass skjøt fart i denne perioden. Pittsburgh Plate Glass og Corning Glass Works som begge hadde tatt mange patenter på de ulike produksjonsprosessene i løpet av 30-tallet, gikk i 1937 sammen for å danne Pittsburgh Corning Corporation. I 1943 åpnet de den første storskala produksjonsfabrikken i USA. Fabrikken produserte celleglass med bruk av sintringsprosesser og med bruk av CaCO₃ og karbon som aktivatorer.

De første produktene som ble utviklet på 30-tallet brukte spesialglass som var spesialtilpasset for å prestere best mulig. I 1943 introduserte Pittsburgh Plate Glass ideen om å benytte konvensjonelt glass (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004). Dette åpnet muligheten for å benytte resirkulert glass i produksjonen, noe som i stor grad har bidratt til å gjøre celleglass konkurransedyktig. Bruken av resirkulert glass har bidratt til å redusere kostnadene og miljøbelastningen. I dag finnes det mange produsenter som har opp mot 98 prosent gjenvunnet glass i sine produkter (Hurley, 2003).

Lenge var Pittsburgh Corning (nå Owens Corning), som produserer både i USA og flere steder i Europa, den eneste store produsenten på markedet, men i senere tid har det kommet flere produsenter til på det internasjonale markedet. Noen av celleglassprodusentene på det europeiske markedet er: Glapor (2006, Tyskland), Polydros (Spania), Pinosklo (Ukraina, 2010) og Geocell (Tyskland). Celleglass er også stort i Kina som har flere store produsenter deriblant Zhejiang DEHO (1976) og YaHong (1995).

2.3.3 Fremstilling og materialoppbygning

Følgende komponenter inngår vanligvis i moderne produksjonsmetoder av celleglass:

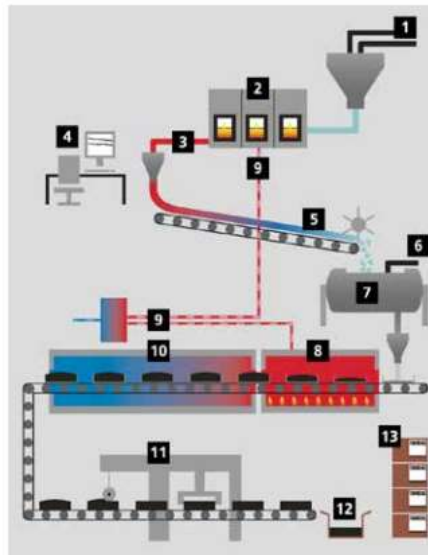
- *Glass*: det benyttes både spesialprodusert glass og resirkulert glass. Foamglas oppgir at de benytter over 68 prosent gjenvunnet glass i sine produkter (Deutsches Institut Bauen und Umwelt e.V., 2007).
- *Aktivator («foaming agent»/gassgenererende middel)*: de mest benyttede stoffene er enten karbonater (CaCO₃ and Na₂CO₃) eller karbonholdige stoffer (karbon, silikonkarbid (SiC), sukker, stivelse og organisk avfall) (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

Stegene under er i hovedsak basert på informasjon fra boken Cellular Ceramics (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004) og beskrivelsen i figuren under (FOAMGLAS Nordic AB, 2013)

1. Knusing av glass: glasset knuses til et pulver med kornstørrelse mindre enn 0,4 mm (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).
2. Aktivator blandes inn. Dette er som regel et karbonholdig stoff (vanligste er rent karbon) (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).
3. Oppvarming: blandingen fylles opp i former som settes på et samleband. Temperaturen øker gradvis langs samlebandet (se figur under).
4. Skumdannelse: blandingen er nå varmet opp til omtrent 800-900°C. Ved denne temperaturen sintrer glasspulveret og aktivatoren produserer gasser som blander seg med glasset.
5. Nedkjøling: Blandingens kjøles sakte ned for å redusere spenninger i materialet.
6. Kutting og polering: det resulterende stive porøse celleglassplatene poleres og kuttes til ønsket form

Produksjon av FOAMGLAS®

1. Dosering og blanding av råmaterialer: gjenvunnet glass, feltspat, natriumkarbonat, jernoksid, manganoksid, natriumsulfat og natriumnitrat.
2. I smelteovnen holdes temperaturen konstant på 1250 °C.
3. Det smeltede glasset transporteres ut av ovnen.
4. Kontrollrom for overvåking av produksjonen.
5. Under transporten på båndet avkjøles glasset før det slippes ned i en kulemølle.
6. Tilsetning av kullpulver.
7. I kulemøllen males alle ingrediensene til et fint pulver, som fylles i støpeformer av rustfritt stål.
8. De fylte formene passerer gjennom en spesialovn, der temperaturen er 850 °C. Her får materialet sin unike cellestruktur.
9. Gjenvinning av varmeenergi.
10. FOAMGLAS®-blokkene passerer gjennom en kjøleovn for nøy kontrollert avkjøling uten varmpåvirkning.
11. Blokkene kuttes til riktig størrelse og sorteres. Materialrester gjenvinnes i kulemøllen (7).
12. FOAMGLAS®-blokkene pakkes, merkes og lastes på paller.
13. De ferdige FOAMGLAS®-produktene lagres og klargjøres for transport.



Figur 9: Produksjonsprosess celleglass (FOAMGLAS Nordic AB, 2013)

Det er i hovedsak to måter å produsere celleglass på (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004). Skumdannelse ved *termisk nedbrytning* og ved *kjemisk reaksjon*. Begge metodene benytter seg av stegene som er beskrevet ovenfor, men skiller seg fra hverandre ved at de benytter ulike aktivatorer og skumdannelsesprosesser.

Kjemisk reaksjon er den vanligste metoden som benyttes til å produsere celleglass. Her brukes et karbonholdig stoff som aktivator. Det vanligste er å bruke rent karbon, men også silisiumkarbid (SiC), sukker, stivelse eller organisk avfall er mulig å bruke. Det karbonholdige stoffet oksiderer med luften når det varmes opp. Oksidasjonen fører til at det dannes gasser (vanligvis CO og CO₂) som blander seg med det smeltede glasset (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

Termisk dekomposisjon ligner på kjemisk reaksjon ved at en også her benytter en aktivator. Karbonater er det vanligste å benytte i denne prosessen. Karbonatet brytes

opp når det varmes opp, og produserer et oksid og en gass (CO₂). Både gassen og oksidet blander seg med det smeltende glasset. Oksidet bidrar til å øke viskositeten til materialet og gassen fanges i glass-smelten og danner porer. Vanlige aktivatorstoffer er CaCO₃ og Na₂CO₃ (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

2.3.4 Egenskaper

Typiske egenskaper

Celleglassisolasjon utviser flere egenskaper som i visse tilfeller gjør det bedre egnet enn mange andre isolasjonsmaterialer. Cellular Ceramics nevner flere fordeler ved materialet, noen av de viktigste er:

- Vann- og damptett
- Ubrennbart
- Lav vekt
- Høy trykkfasthet og stivhet
- Rask montering
- Høy frostmotstand

Andre egenskaper forfatterne mener gjør materialet godt egnet er:

- Lang levetid (FOAMGLAS Nordic AB, 2013)
- Lavere sannsynlighet for perforeringer enn ved membran og dampsperre
- Lavere konveksjonsvarmetap
- Dimensjonsstabil (Kelly, 2014)
- Konstant isolasjonsverdi (Kelly, 2014)

Basert på fordypningsprosjektet (Bakken & Kolsaker, 2019) finnes det også noen ulemper med materialet:

- Dyr investeringskostnad
- Lite erfaring med utførelse i næringen
- Høyere varmekonduktivitet enn andre isolasjonsmaterialer
- Mindre uttørkingsmuligheter gjennom isolasjonsjiktet

I Tabell 1 er materialdata for celleglassisolasjonsproduktene til FOAMGLAS (produsert av Owens Corning) oppsummert. Det er bare presentert data for de produktene som er aktuelle å benytte i tak. Verdiene er hentet fra produktdatabladene til de ulike produktene. De er delvis beregnet av produsenten og delvis hentet fra standarder.

Tabell 1: Typiske materialelegenskaper for celleglass

Materialparameter	Enhet	Foamglas ¹	Kilde
Egenskaper ved brannpåvirkning		A1 - ubrennbart	EN 13501-1
Driftstemperaturgrenser	[C°]	-265 til +430	
Vanddampmotstandsfaktor (μ)	[-]	∞	EN ISO 10456
Hygroskopi		null	
Kapillaritet		null	
Smeltepunkt		>1000	jf. DIN 4102-17
Koeffisient for varmeeekspansjon	[K ⁻¹]	9*10 ⁻⁶	EN 13471
Spesifikk varmekapasitet (C _p)	[J/kg K]	1000	EN ISO 10456
Densitet (ρ) (+-10 %)	[kg/m ³]	100-165	EN 1602
Tykkelse (+-2%)	[mm]	40-200	EN 823
Lengde (+-5%)	[mm]	600-1200	EN 822
Bredde (+-2%)	[mm]	450-600	EN 822
Termisk konduktivitet (λ)	[W/mK]	0,036-0,050	EN ISO 10456
Punktbelastning	[mm]	≤ 1,0 - 1,5	EN 12430
Trykkfasthet	[kPa]	≥ 500 - 1600	EN 826 tillegg A
Bøyestyrke	[kPa]	≥ 450 - 550	EN 12089
Strekkfasthet	[kPa]	≥ 150 - 200	EN 1607
Termisk utbredelsesevne ved 0 °C	[m ² /s]	3,5E-07 - 4,2E-07	
Bøyemodul for elasticitet	[MN/m ²]	700-1500	
BRE Green Guide-rangering		A	

¹Verdiene er basert på produktdatabladene til Foamglasproduktene: T3+, T4+, S3, F, Ready T3+, Ready T4+, ROOF Board G2 T3+

Faktorer som påvirker materialelegenskapene

Egenskapene til produktet er knyttet til totalt porevolum, fordelingen og størrelsen på porene. Særlig trykkfastheten og varmekonduktiviteten påvirkes av porene, og som regel vil produkter med høy trykkfasthet også ha høy varmekonduktivitet og motsatt. Generelt vil også varmekonduktiviteten og trykkfastheten synke med økende porevolum. På en gitt varmekonduktivitet vil en jevn fordeling av porer og lav porestørrelse også gi større trykkfasthet enn det en ujevn fordeling med større porer vil gi (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

Egenskapene til materialet er også i stor grad avhengig av produksjonsprosess og type råmaterialer. Porestørrelse styres bla. av kornstørrelsen på glasspulveret som benyttes. Stor kornstørrelse gir færre og større porer, mens små korn gir mange små porer. Kornstørrelsen må være mindre enn 0,4 mm for å, men den burde være lavere for å oppnå best mulig resultat (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

Et forhold som også har stor innvirkning på egenskapene til celleglasset, er glassmykningstemperaturen og temperaturen hvor aktivatorene begynner å produsere gass. Aktivatorene må ikke produsere gasser før sintringen av glasspulveret og dermed også mykningen har begynt. Hvis gassen blir produsert før glasset har begynt å mykne vil ikke gassen trenge inn i materialet og skape porestrukturen som ønskes. Gassen må heller ikke produseres på for høy temperatur, fordi ved høy temperatur vil viskositeten blir for lav til å holde gassen inne i materialet. Man må altså velge en temperatur hvor viskositeten til glasset er ideell for å holde på gassene som produseres. I tillegg må man velge en aktivator som produserer gasser ved en temperatur som samsvarer med den ideelle temperaturen for glassviskositeten (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

Produksjonstemperaturen har også andre effekter på sluttproduktet. Blant annet vil oppvarmings- og nedkjølingshastighet ha innvirkning på spenningene i materialet og dermed påvirke om det oppstår sprekker eller ikke. Siden glass-smelten allerede i begynnelsen har relativt lav varmeledningsevne, vil for rask oppvarming føre til en ujevn temperaturfordeling i materialet. Dette skaper spenninger som kan føre til oppsprekking. For treg temperaturøkning kan derimot føre til for tidlig gassutvikling fra aktivatorene. Ved nedkjøling vil trykket i cellene synke, som fører til at cellene trekker seg sammen og skaper spenninger. Hvis dette skjer for raskt, vil materialet være for lite viskøst når spenningene øker, og materialet kan sprekke opp (Scarinci, Brusatin, & Bernardo, 2004).

2.3.5 Kostnad

Det er ikke gjort en fullstendig vurdering av kostnadene til celleglassisolasjon i denne oppgaven. Kostnader er et viktig tema og ble i fordypningsprosjektet sett på som den viktigste grunnen til at celleglass ikke ble valgt (Bakken & Kolsaker, 2019). En aktør opplyste at celleglass er fire til fem ganger dyrere enn alternative isolasjonsmaterialer.

I litteraturen finnes det lite som omhandler prisene på materialet. Prisene på celleglass er heller ikke tilgjengelig på Foamglas sine nettsider. En studie indikerer at celleglass har en høyere kostnad enn gjennomsnittet av isolasjonsmaterialer, men går ikke inn på spesifikke priser (Papadopoulos, 2004). Det er verdt å merke seg at dette er en internasjonal studie og ikke nødvendigvis er overførbart til norske priser.

Saed (2017) gjorde en kostnadssammenligning. Denne var basert på priser mottatt fra Foamglas, mens priser på andre isolasjonsmaterialer ble hentet fra ulike byggevarehus i Norge. Kostnadssammenligningen viste en pris på celleglass på 344 kr/m². Dette var ifølge studien omtrent 5,5 ganger prisen til glassull, 6,7 ganger prisen til steinull, 3,5 ganger prisen til EPS og 3,2 ganger prisen til XPS (Saeed, 2017). Dette antyder en stor forskjell i innkjøpspris mellom celleglass og alternativene. Det understrekes at det ikke er undersøkt om dette stemmer med dagens prisnivå. Priser kan også variere avhengig av leverandør og eventuelle innkjøpsavtaler entreprenør har med noen tilbydere. En burde derfor være forsiktig med å sammenligne priser en har fått direkte fra produsenten og de en har hentet fra leverandører og tilbydere.

2.4 Massivtre

Massivtre er en fellesbetegnelse på lameller (annet ord for planker eller bord) som er satt sammen til større elementer. Lamellene settes sammen ved bruk av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag. Liming er den vanligste og mest velutviklede metoden for å binde sammen massivtreelementer (Buck, Wang, Hagman, & Gustafsson, 2015). Lamellene kan settes sammen på ulike måter (se kapittel 2.4.1), men det er vanlig å sikte til krysslaminerte elementer når man snakker om massivtre (Bugge, 2016).

Massivtreelementene kan brukes som bærende eller ikke-bærende elementer i for eksempel gulv, vegger og tak. Vanlig maksimal spennvidde ligger på omkring syv meter. Elementene leveres vanligvis i bredder opptil ca. 3,6 meter og lengder på opptil ca. 16 meter. Vanlige elementtykkelser er fra 60 til 240 mm (Byggforskserien 520.205). Enkelte produsenter oppgir elementtykkelser opp mot 500 mm, og lengde og bredde opp mot hhv. 30 m og 4,8 m (Borgström & Fröbel, 2017).



Figur 10: Illustrasjonsfoto KL-tre (Stora Enso, 2013)

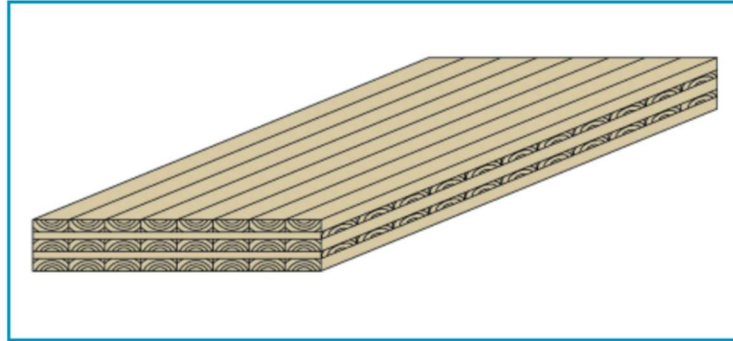
2.4.1 Produkttyper

Det finnes ulike måter å sette sammen massivtreelementer på. Ofte skilles det mellom krysslaminerte elementer, kantstilte elementer og hulromselementer. Av disse teknikkene er krysslaminerte elementer den vanligste til bygningsformål (Edvardsen & Ramstad, 2014). I dagligtalen og i mye norsk litteratur er «massivtre», «krysslaminert massivtre» og «KLT» ord som benyttes om hverandre (Bjørheim, 2019) (Bugge, 2016). Betegnelsen «massivtre» vil videre i denne masteroppgaven være synonymt med «krysslaminert massivtre», «KL-tre» og «KLT».

Krysslaminerte elementer (KLT)

Krysslaminerte massivtreelementer er elementer som består av lag av lameller limt 90 grader i forhold til hverandre. Ønsket stivhet, styrke og tykkelse oppnås ved å øke antall lag. Det kan også benyttes doble lag, for eksempel doble langsgående ytterlag for å oppnå visse egenskaper (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013).

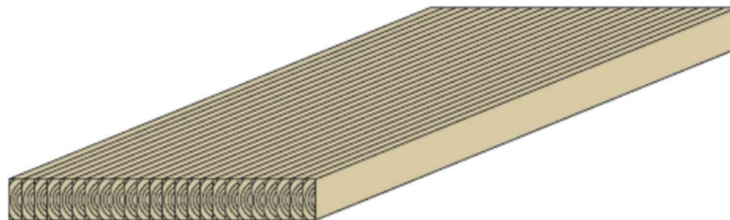
Det benyttes vanligvis et odde antall lag, slik at ytterlagene har samme fiberretning. Lamellagene limes sammen, og eventuelt kantlimes lamellskjøtene på to eller fire sider mot hverandre i tillegg. Kryssende fiberretninger gir et dimensjonsstabilt element med relativt stor stivhet og styrke i- og ut av planet (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013).



Figur 11: Krysslaminert massivtreelement (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006)

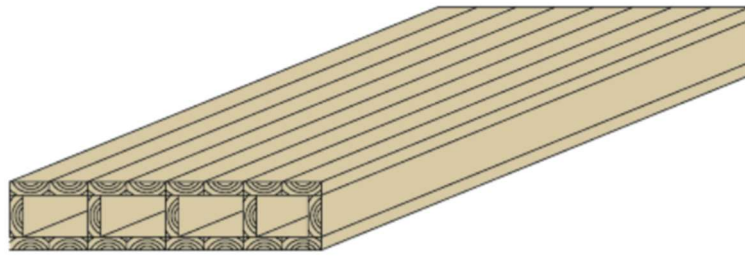
Kantstilte elementer og hulromselementer

Kantstilte elementer er elementer som er satt sammen av stående lameller (se Figur 12). Lamellene festes ved hjelp av spiker, dybler, lim eller strekkstag. Limte kantstilte elementer tilsvarer vanlig limtre lagt på breidsiden. Tverrspente kantstilte elementer spennes opp av strekkstag på tvers av elementets lengderetning. Denne tverrspenningen binder sammen lamellene og gir bøyestivhet på tvers av elementet (Byggforskserien 470.101).



Figur 12: Kantstilt massivtreelement (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006)

Hulromselementer har i motsetning til de andre elementene ikke massive tverrsnitt, men har hulrom parallelt med- eller på tvers av elementets lengderetning (se Figur 13). Hulrommene kan fylles med isolasjon eller kan være kanal for tekniske installasjoner (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).



Figur 13: Hulromselement (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006)

2.4.2 Historie

Utviklingen av massivtre kan spores til Canada på 1970-tallet, da tverrspente, kantstilte elementer ble benyttet som brodekker til nye og rehabiliterte broer. Rundt 1990 spredte prinsippet seg til Mellom-Europa. Tekniske høyskoler i Sveits og Østerrike drev utviklingen av ulike typer massivtreelementer videre fremover. Videreutviklingen av massivtre spredte seg i to retninger, der den ene utviklet brodekker, mens den andre utviklet massivtreelementer til bygningsformål. Bakgrunnen for utviklingen av massivtre til bygninger var et behov for miljøeffektive og rasjonelle konstruksjonssystemer (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).

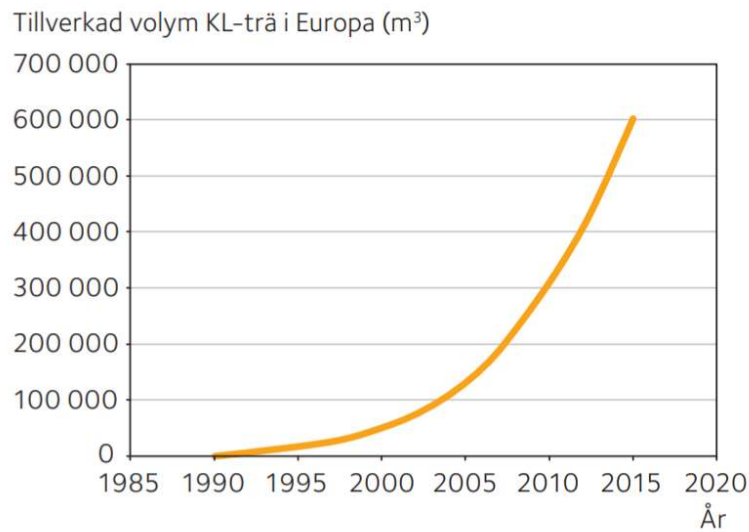
Etter en forsiktig begynnelse, tok bruken av KL-tre seg opp internasjonalt på 2000-tallet. Økningen skyldes delvis et ønske om mer miljøvennlige bygninger, men også faktorer som nye produktgodkjenninger, økt effektivitet og bedre markedsføring spilte inn (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013). Bygging med massivtre ble etter hvert etablert og anerkjent byggemetode i Sveits, Østerrike og Tyskland. I de nordiske landene ble det på 1990-tallet gjennomført forskningsprogram og pilotprosjekter med massivtrebygging, og i 1998 ble massivtre brukt for første gang i en enebolig i Asker (Byggforskserien 470.101).

Siden oppstarten av KL-treproduksjon på 1990-tallet har produksjonen økt betydelig (se Figur 14). I 2014 ble det produsert omtrent 600 000 m³ KL-tre globalt (Plackner, 2015). I 2020 estimeres det at det vil produseres mellom 2 000 000 og 2 500 000 m³ globalt (Jauk & Höfler, 2019).

Også i Norge har utviklingen og bruken av massivtre skutt fart det siste tiåret. På 2000-tallet ble ulike program initiert for å øke bruken av tre i bygg. Signalbygg som Svartlamoen ungdomsboliger og Preikestolen fjellstue ble bygget i hhv. 2005 og 2008. Likevel førte ikke disse pilotprosjektene til noe markant skifte i bruken av massivtre (Nygaard, Sunter, & Flindall, 2016). Det var utbyggingen av studentboliger i massivtre som satt fart på massivtre som bæresystem i Norge. Det ble vist at det var mulig å holde kostnadene nede, samtidig som andre egenskaper ved massivtre ble utnyttet (Aasheim & Lier, 2017).

Utviklingen i Norge kan også sees ved at det er etablert flere massivtrefabrikker i Norge de siste årene. I 2017 åpnet Nordisk Massivtre en fabrikk med produksjonskapasitet på

10 000 m³ (Hindklev, 2017). I 2019 åpnet Splitkon verdens største massivtrefabrikk på Åmot i Buskerud. Denne fabrikk skal kunne produsere opp mot 70 000 m³ i året (Bjørheim, 2019).



Figur 14: Produsert massivtre i Europa (Borgström & Fröbel, 2017, s. 11)

2.4.3 Fremstilling og materialoppbygging

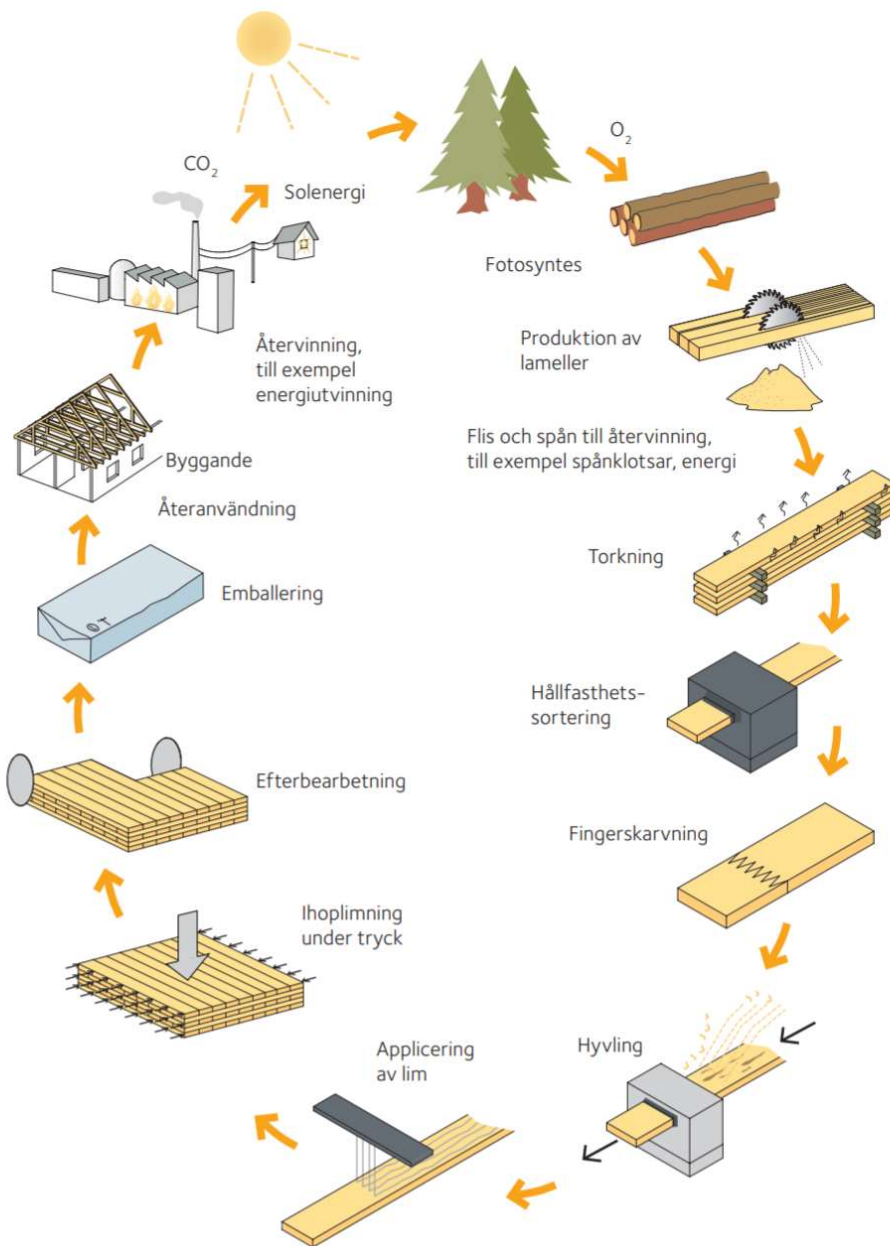
Produksjon av KLT skjer på mer eller mindre samme måte, uavhengig av produsent eller produksjonsland (Borgström & Fröbel, 2017). Produksjonen følger vanligvis følgende steg: produksjon av trelast, sortering, fingerskjøting, høvling, limpåføring, lamelloppsetting og lamellpressing, utskjæring, overflatebehandling, merking og emballasje (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013). Prosessen er illustrert av Svenskt Trä og er vist i Figur 15.

Monteringsprosessen tar typisk mellom 15 og 60 minutter, avhengig av utstyr og limtype. Automatiserte prosesser produserer elementene omtrent uten noe menneskelig kontakt. Prosessene involverer også maskinell utskjæring av døråpninger, vinduer, og utsparinger til rør og kabler (Gagnon, Bilek, Podesto, & Crespell, 2013).

Lamellene består vanligvis av gran (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006). Trevirke av gran er forholdsvis lett, og har høy styrke og stivhet i forhold til densiteten (Kilde, 2011). Annet trevirke kan også benyttes, hvis en ønsker spesielle egenskaper, for eksempel en spesielt utseende på elementene. Det kan benyttes trevirke av lav kvalitet, f.eks. C14, og likevel få tilfredsstillende bæreevne i elementene. Siden lamellene er sammenføyd til ett element vil en svakhet i én lamell blir veid opp av lameller i tilstøtende lag (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006). Det betyr at en kan benytte trevirke av lavere kvalitet, f.eks. C14 og likevel få tilfredsstillende bæreevne i elementene. Dette er gunstig, fordi en større andel av treet blir benyttet. Limet som benyttes må være godkjent konstruksjonslim av omtrent samme type som benyttes i limtreproduksjon (Solli & Glasø, 2011).

Krysslaminerte treprodukter produseres innendørs i tørre omgivelser. Lamellene skal ha et fuktnivå på mellom 6 og 15 vektprosent. Det skal heller ikke skille mer enn 5 vektprosent fuktighet mellom lameller som ligger inntil hverandre. De leverte elementene

produseres vanligvis med målfuktighet på 12 ± 2 vektprosent (Borgström & Fröbel, 2017).



Figur 15: Skjematisk oversikt over KL-treproduksjon (Borgström & Fröbel, 2017)

2.4.4 Egenskaper

Det er flere positive egenskaper ved massivtre. Noen av dem er gitt nedenfor:

- Positive miljøegenskaper – Klimanøytralt byggemateriale (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).
- Hurtig produksjon på byggeplass (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).
- Dimensjonsstabil – det er lite endring i form og størrelse ved endring i fuktighet og temperatur) (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).
- Godt arbeidsmiljø og ryddig arbeidsplass (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).
- Stor fleksibilitet ved planløsning og konstruksjon (Aasheim, et al., Hefte 1, 2006).
- Lav vekt gir redusert last på fundamenter og andre bærende elementer (iTRE, 2020).

Likevel finnes det også noen egenskaper som gjør materialet mindre egnet i visse tilfeller:

- Små spennvidder – Spennvidden er begrenset sammenlignet med hva som er mulig i stål og betong.
- Brennbar materiale – Trevirke er brennbar, og dette kan føre til at ekstra brannsikringstiltak må gjøres, spesielt i større bygg (Nøstdal & Heen, 2017).
- Akustiske egenskaper – Massivtreet har gode lydisolasjonsegenskaper ved høye frekvenser, men presterer dårligere ved lave frekvenser. Trinnlydnivå er også utfordrende (Homb, 2017).
- Større behov for forankring enn i stål- og betongbygg – På grunn av den reduserte tyngden (Aasheim, et al., Hefte 2, 2006).
- Biologiske skadegjørere – trevirke er utsatt for angrep av biologiske skadegjørere som mugg- og råtesopp, insekter og bakterier (Evans, 2009).

Tabell 2 på viser materialeegenskaper for massivtre. I tabellen henvises det til norske og europeiske standarder. Disse kan finnes på Standard Norge sine nettsider. Andre materialeegenskaper er hentet fra Svenskt Trä (Borgström & Fröbel, 2017) og fra Sintef teknisk godkjenning av massivtre fra den norske massivtreprodusenten Splitkon (Sintef Certification, 2019).

Tabell 2: Typiske materialegenskaper for massivtre

Materialparameter	Enhet	Massivtre	Kilde
Egenskaper ved brannpåvirkning	[-]	D-s2,d0	EN 13501-1
Vanndampmotstandsfaktor (μ)	[-]	20 <i>Tørre forhold</i> 50 <i>Fuktige forhold</i>	NS-EN ISO 10456
Termisk konduktivitet (λ)	[W/mK]	0,12	NS-EN ISO 10456
Spesifikk varmekapasitet (C_p)	[J/kg K]	1600	EN ISO 10456
Densitet (ρ)	[kg/m ³]	420	TG 20712
Lameller	[ant. lag]	3-9 <i>Vanligvis</i> 25 <i>Opp til</i>	TG 20712 Svenskt trä
Fuktbevegelser (% dimensjonsendring per % endring i fuktinnhold)	[%]	0,01 <i>Lengderetning</i> 0,03 <i>Brederetning</i> 0,20 <i>Tykkelsesendring</i>	TG 20712
Tykkelse	[mm]	60-300 <i>Vanligvis</i> 500 <i>Opp til</i>	TG 20712 Svenskt trä
Lengde	[m]	16 <i>Vanligvis</i> 30 <i>Opp til</i>	TG 20712 Svenskt trä
Bredde	[m]	1,2-3,5 <i>Vanligvis</i> 4,8 <i>Opp til</i>	TG 20712 Svenskt trä
Måltoleranser	[mm]	±5 <i>Lengde</i> ±2 <i>Bredde</i> ±2 <i>Tykkelse</i> ±5 <i>Diagonalmål</i>	TG 20712
Spennvidde (160 mm element)	[m]	4,75	TG 20712
Bøyefasthet ($f_{m,k}$) (160 mm element)	[N/mm ²]	24,1 <i>Bøyning om:</i> 4,0 <i>Sterk akse</i> 16,6 <i>Svak akse</i> 8,8 <i>Skivevirk. (sterk)</i> <i>Skivevirk. (svak)</i>	TG 20712
Strekkfasthet ($f_{t,k}$) (160 mm element)	[N/mm ²]	11,8 <i>Last i retning:</i> 6,0 <i>Sterk</i> 0,4 <i>Svak</i> <i>Tverrestrekk</i>	TG 20712
Trykkfasthet ($f_{c,k}$) (160 mm element)	[N/mm ²]	14,6 <i>Bøyning om:</i> 8,4 <i>Sterk</i> 3,0 <i>Svak</i> <i>Vinkelrett fiberretn.</i>	TG 20712
Skjærfasthet ($f_{v,k}$) (160 mm element)	[N/mm ²]	0,7 <i>Bøyning om:</i> 0,7 <i>Sterk akse</i> 1,6 <i>Svak akse</i> <i>Skivevirkn.</i>	TG 20712
Elastisitetsmodul ($E_{m,5\%}$) (160 mm element)	[N/mm ²]	6882 <i>Bøyning om:</i> 1602 <i>Sterk akse</i> <i>Svak akse</i>	TG 20712

2.4.5 Trevirke og fukt

Hygroskopiske egenskaper i trevirke

En rekke av de fysiske og mekaniske egenskapene til trevirke avhenger av fuktighetsnivå og er knyttet til cellenes opptak av fukt. Treteknisk institutt nevner blant annet vekt, krymping og svelling, råte- og soppbestandighet, styrke, limbarhet, varmeledning og bearbeidingsegenskaper (Tronstad, 2006).

For å forstå trevirke og massivtreets fukttekniske egenskaper er det nyttig å forstå hvordan materialet er bygd opp på cellenivå. Trevirke er bygget opp av hule celler med varierende form. De fleste trecellene er orientert i treets lengderetning. I rå tilstand er hulrommene i cellenes hulrom i større eller mindre grad fylt med vann. Når trevirket tørkes, fjernes det frie vannet frem til fibermetningspunktet, der trefuktigheten er 28-30 %. Videre uttørking fjerner fuktighet som ligger bundet i celleveggen og fører til krymping av trevirket. Orientering av trefibrene fører til at krympingen blir ulik i trevirkets lengderetning og tverretning (Tronstad, 2006). Det er en tilnærmet lineær sammenheng mellom krymping/svelling og trefuktighet mellom 0 prosent fuktighet og fibermetningspunktet (Byggforskserien 470.101).

Trevirke er et hygroskopisk materiale (kapittel 2.5.2) og har iboende fuktlagringsegenskaper. At det er hygroskopisk vil si at det tar opp og avgir fuktighet til luften avhengig av luftens temperatur og relative fuktighet (RF). Ved stabile forhold vil trevirkets fuktighetsinnhold komme i likevekt med omgivelsene. Disse egenskapene gjør at trevirke er med på å regulere romluften ved at det tar opp overskuddsfuktighet ved økt RF og avgir den når RF senkes (Glass, Wang, Easley, & Finch, 2013).

Dampmotstand

Trevirke har, i likhet med flere andre vanlige byggematerialer, en vanndampmotstand som avhenger av relativ fuktighet. Tørt trevirke har relativt høy dampmotstand, men hvis RF øker, reduseres vamppotstanden (Geving, Holme, & Uvsløkk, 2010). Ifølge en rapport fra Sintef vil massivtre ha en vanndampmotstandsfaktor $\mu = 110$ og $\mu = 10$ ved hhv. tørre og fuktige forhold. For et massivtreelement på 200 mm tilsvarer dette SD-verdier på 22 og 2 m. For massivtreetak vil denne dampmotstanden gjøre at utadrettet fukttransport blir mindre og at inneluftens fuktnivå vil ha liten innvirkning på fuktforholdene i taket (Time, et al., 2008).

Byggfukt

Byggfukt er fuktoverskuddet materialer har ved innbygging sammenlignet med fuktnivået i materialet ved likevekt etter lang tid. Fuktoverskuddet kan komme fra produksjon, transport, lagring eller i byggefase før et vanntettende sjikt er montert (Thue, 2016).

Sintef Byggforsk har kommet frem til at byggfuktnivået er det mest avgjørende for å unngå for høyt fuktnivå og påfølgende muggvekst i de ytre delene av et massivtreelement i kompakte tak (Time, et al., 2008). Dette ble også bekreftet av

fordypningsprosjektet, som forklart i kapittel 1.2. Det viste seg også her at aktørene i næringen bruker litt ulike grenser for hva som er akseptable fuktforhold ved lukking av takkonstruksjonen (Bakken & Kolsaker, 2019).

Byggteknisk forskrift (TEK17) setter som funksjonskrav at «Produkter og konstruksjoner skal være så tørre ved innbygging eller forsegling at det ikke oppstår problemer med soppdannelse, nedbrytning av organiske materialer eller økt avgassing.» (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Punkt to og tre i veiledning til bestemmelsen står nedenfor:

2. For å unngå soppangrep på trevirke, må trevirke inneholde mindre enn 20 vektprosent fukt.
3. I konstruksjoner med lav uttørkingsevne (for eksempel konstruksjoner mot terreng) må fuktinnholdet i trevirket være lavere enn 15 vektprosent fukt før innbygging.

2.4.6 Sopp

Siden trevirke er et organisk materiale, er materialet utsatt for soppvekst. Ifølge Treteknisk institutt er det vanlig i bygningssammenheng å dele inn sopp i to ulike grupper, råtesopper og fargeskadesopper. Felles for begge typer, er at soppen skaffer seg energi og næringsstoffer ved å bryte ned dødt organisk materiale (Evans, 2009).

Råtesopper bryter ned fibrene i treet og gir svekkede fasthetsegenskaper i trevirket. Dette kan igjen føre til sammenbrudd av konstruksjonen. For at råtesoppangrepet skal starte første gang, krever de fleste råtesopptypene at fuktinnholdet ligger rundt fibermetningspunktet (ca. 28-30 vektprosent eller 95-95 % RF) (Canada Wood, 2015) Enkelte råtesopper kan også starte ved fuktighet ned mot 20 vektprosent (Geving & Thue, 2002).

Fargeskadesopper, som muggsopp, har ingen innvirkning på fasthetsegenskapene til trevirke. Muggsopp er hurtigvoksende sopper som lever av organisk materiale og spres med sporer. I tillegg til å gi misfarging av trevirket, kan muggsopper ha en negativ innvirkning på inneklime og gi helseskader. Muggsopp som vokser på flater innendørs, kan gi unormalt stor forekomst av soppsporer i luften. Sporene kan virke irriterende og allergifremkallende for disponerte personer. I tillegg til sporene produserer muggsopp flyktige gasser og mykotoksiner. Disse stoffene trenger lett gjennom barrierer som plastfolier og gulvbelegg. For muggsopp inne i lukkede konstruksjoner er det gassene som står for den største risikoen for mennesker (Geving & Thue, 2002).

Muggsoppvekst vil være avhengig av temperatur og fuktighet, samt tid og næring for å kunne vokse. De vanligste muggsopptypene krever ca. 20 vektprosent fuktighet i materialoverflaten ved 20 °C for å vokse. Veksthastigheten vil øke med fuktigheten. Optimal temperatur for muggsoppvekst er rundt 25-30 °C (Byggforskserien 701.401).

2.5 Bygningsfysiske prinsipper

2.5.1 Fukt i luft

Luften rundt oss inneholder vanligvis en viss mengde vanndamp. Ved normalt trykk og temperatur kan vanndampen i luften sees på som en ideell gass. Det vil si at tilstandslikningen kan brukes på vanndampen alene, eller på luften under ett. Luftfuktighet kan angis som absolutt luftfuktighet eller relativ luftfuktighet.

Absolutt luftfuktighet beskriver innholdet av fukt, og kan angis som vanndampens partialtrykk [Pa], vanndampkonsentrasjon [kg/m^3] eller vanndampmasse per kg tørr luft [kg/kg]. *Relativ fuktighet* (RF) er forholdet mellom absolutt fuktighet og fuktinnholdet ved metning. RF på 100 % gir kondensering, da kan ikke luften ta opp mer vanndamp (Geving & Thue, 2002).

$$RF = \frac{v}{v_{sat}} * 100 \%$$

v = vanndampkonsentrasjon i luften [g/m^3]

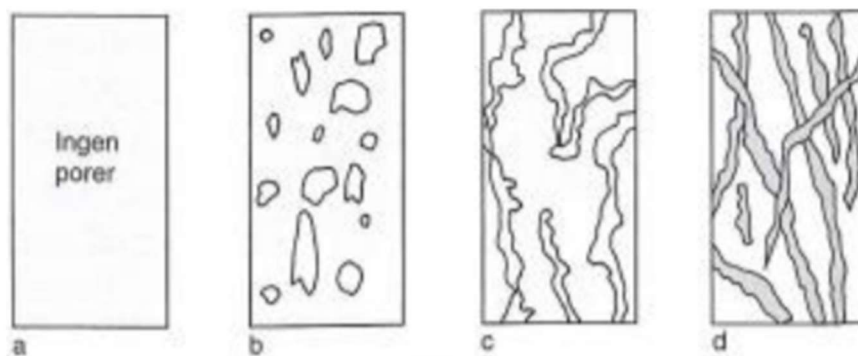
v_{sat} = metningskonsentrasjon [g/m^3]

Metningskonsentrasjon er avhengig av temperaturen. Øker temperaturen, kan luften inneholde mer fuktighet. På samme måte vil en temperatursenkning øke relativ fuktighet, siden v_{sat} minker.

2.5.2 Fuktlagring og fukttransport i materialer

Fuktinnholdet i et materiale skjer ved opptak av vanndamp fra luften eller ved kapillæroppslag av vann i væskeform. Det finnes en rekke ulike former for fukttransport (se Tabell 3) (Geving & Thue, 2002). De mest aktuelle transportmekanismene for masteroppgavens problemstillinger er transport av damp gjennom diffusjon og konveksjon, samt væsketransport gjennom overflatekryping og kapillærledning.

Et materiales evne til fukttransport og fuktbinding henger sammen med dets materialstruktur og poresystem. Ulike poresystem kan sees i Figur 16. Materialer kan deles inn i hygroscopiske (c og d) og ikke-hygroscopiske materialer (a og b). Ikke-hygroscopiske materialer har ingen porer, og er helt kompakte. Metaller og glass har ikke porer og er ikke-hygroscopiske. Materialer i klasse b er strengt tatt hygroscopiske, men kan i praksis betraktes som ikke-hygroscopiske fordi fuktopptaket i cellene er svært begrenset. Celleglass er et slikt eksempel. De fleste byggematerialer, som trevirke og betong, er hygroscopiske og har poresystem som c i Figur 16. Mineralull har også porer, men har diskontinuerlig faststoff (d). Mineralull har lav hygroscopisk likevektsfuktighet, og har ingen kapillær sugesevne, men kan likevel ta opp store mengder fuktighet hvis det blir tilført vann (Geving & Thue, 2002).



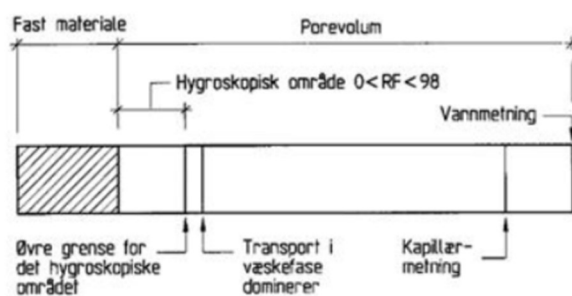
Figur 16: Forskjellige poresystem (Geving & Thue, 2002)

Fuktlagring

Et hygroskopisk materiale tar opp og avgir fuktighet avhengig av relativ fuktighet i luften. Fuktlagring kan beskrives med materialspesifikke sorpsjonskurver som fastlegges eksperimentelt. For et helt tørt materiale som plasseres i luft vil vannmolekyler i luften bindes til poreveggen i det som kalles adsorptiv binding. Bindingskreftene blir mindre etter hvert som tykkelsen på vannhinnen øker. Hvis RF øker, vil tykkelsen på de adsorberte molekyllagene bli større. Når RF kommer opp i 80-90 % vil kapillærkondensasjon bidra i større grad til fuktopptak. Kapillærkondensasjon er transport på grunn av undertrykkforskjeller i porevannet. I porer skyldes kapillærledning at adsorbent vann på hver sin side av en pore møtes og danner menisker med stor tiltrekningskraft på vandampmolekyler (Geving & Thue, 2002).

Figur 17 viser hvordan porevolumet i porøse materiale fylles opp av ulike mekanismer. Fukttinnholdet i det hygroskopiske området tilsvarer likevekt med vandampen i luften i omgivelsene over tid. Relativ fuktighet i det hygroskopiske området ligger mellom 0 og 100 %, men i praksis er det ikke mulig å gjøre målinger ved 100 % RF. Derfor legges øvre grense for det hygroskopiske området litt under dette, typisk ved 98 % (Thue, 2016). Hvis den relative fuktigheten i omgivelsene er lav, vil dampdiffusjon være den dominerende transportmekanismen. Når RF øker, vil porene begynne å fylles med vann i flytende form og overflatebevegelse i adsorberte vannsjikt blir en mer og mer viktig transportmekanisme. Derfor vil dampmotstanden i porøse materialer synke med økende relativ fuktighet (Standard Norge, 2010).

Frem til øvre grense for det hygroskopiske området, ca. 98 % RF, dominerer altså damptransport og overflatebevegelse i adsorberte vannsjikt. Over denne grensen dominerer fukttransport ved væskestrømning. Ved tilgang til fritt vann vil de kapillære porene fylles frem til kapillærmetning er nådd. For å nå fullstendig vannmetning må luften i porene drives ut med vakuumbehandling eller koking (Thue, 2016).



Figur 17: Fuktopptak i porøse materialer (Gustavsen, 2019)

Tabell 3: Oversikt over varme- og fukttransportmekanismer og deres drivpotensial (Künzel, 1995)

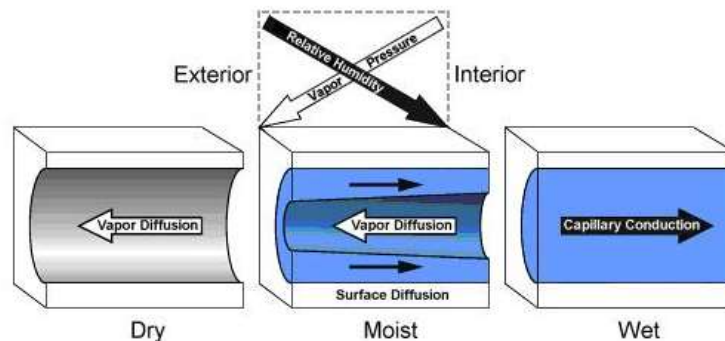
	Transportmekanisme	Drivpotensial for transport
Vanddamptransport	Dampdiffusjon	Damptrykk (temperatur, totaltrykk)
	Effusjon	Damptrykk
	Løsningsdiffusjon	Damptrykk
	Damptransport ved konveksjon	Luftens totaltrykk
Væsketransport	Kapillærledning	Kapillære sugekrefter
	Overflatekryping	Relativ fuktighet
	Dreneringsstrømning	Tyngdekraften
	Hydraulisk strømning	Væsketrykk
	Elektrokinese	Elektriske felt
	Osmose	Ionekonsentrasjon
Varmetransport	Varmeledning	Temperatur
	Varmestråling	Temperatur ⁴
	Varmetransport ved konveksjon	Luftens totaltrykk
	Entalpistrømning gjennom fuktbevegelser	Dampdiffusjon ved faseoverganger og væsketransport i temperaturfelt

Fukttransport

Fuktvandring omfatter sorpsjon av vanndamp fra luften og kapillærsuging av fritt vann.. De mest dominerende fukttransportformene i porøse bygningsmaterialer er dampdiffusjon, overflatekryping og kapillærledning (Fraunhofer IBP, 2009). Damptransport gjennom konveksjon kan i noen tilfeller også transportere store mengder fukt (Gustavsén, 2019).

Figur 18 illustrerer fukttransport i en pore i et bygningsmateriale om vinteren. Poren har form av en sylinder i figuren. Det er antatt normale grensebetingelser, det vil si at relativ fuktighet er høyere ute enn inne, og damptrykket er høyere inne enn ute.

Hvis materialet er tørt nok, vil dampdiffusjon drive fuktigheten utover i konstruksjonen. Hvis materialet inneholder så mye fuktighet at vannmolekyllagene på poreveggen er tykke nok til å bevege seg, vil overflatekryping også kunne skje. Dette skjer typisk ved omtrent 60 % RF. Siden tykkelsen på de adsorberte vannmolekyllagene øker med relativ fuktighet, vil overflatekryping virke fra høy mot lav RF. Med grensebetingelsene gitt her, vil overflatekryping virke i motsatt retning av diffusjonen. Hvis fuktigheten er høy nok vil kapillærledning dominere (Fraunhofer IBP, 2009). Denne har kapillære sugekrefter som drivkraft, som for porøse materialer også kan uttrykkes med relativ fuktighet (Geving & Thue, 2002). Dette eksempelet viser at damptransporten og væsketransporten kan virke i motsatt retning. Vanligvis går dampdiffusjon fra varmt mot kaldt, mens væsketransporten går fra fuktig mot tørt i materialer (Fraunhofer IBP, 2009).



Figur 18: Fukttransport i porene i en yttervegg om vinteren, for forskjellige nivåer av fuktinnhold (Fraunhofer IBP, 2009)

Praktisk diffusjon

Vanndampdiffusjon er altså transport av vanndamp gjennom et materiale og har forskjeller i vanndamptrykk (partialtrykk eller absolutt fuktighet), som drivkraft. Forskjellen i vanndamptrykk jevnes ut ved at vannmolekylene i luften beveger seg mot lavere damptrykk (Thue, 2016).

Diffusjon gjennom et materiale er en sammensatt prosess, som nevnt og illustrert i Figur 18. Selv om fukten går inn i og ut av et materiale som vanndamp, kan ulike former for fukttransport ha foregått på mikronivå innenfor materialet. Den resulterende fukttransporten på makronivå kan kalles «praktisk diffusjon» (Geving & Thue, 2002).

Diffusjonsegenskaper for fuktregninger på makronivå kan beskrives på ulike måter. Det er vanlig å angi dampmotstanden til et materiale ved å benytte en vandampmotstandsfaktor μ for materialer og som SD-verdi (ekvivalent luftlagstykkelse) for materialer med en spesifikk tykkelse (Time, et al., 2008). Siden også væsketransport i porene inkluderes, vil disse være avhengig av fuktinnholdet i materialet (Geving & Thue, 2002). Vandampmotstandsfaktoren μ [-], også kalt relativ fuktmotstand, angir hvor mange ganger mer diffusjonstett et materiale er, sammenlignet med stillestående luft. SD-verdi [m] angir tykkelsen av et stillestående luftsjikt med samme diffusjonsmotstand som materialsjiktet (Geving & Thue, 2002).

Konveksjon

Fukttransport kan også skje gjennom konveksjon. Ved luftstrømning gjennom et materiale eller konstruksjonsdel vil vandamp i luften transportere fukt. Drivkraften bak konveksjon er forskjeller i luftens totaltrykk. Luftstrømmen går fra høyt mot lavt lufttrykk.

Forskjellene i totaltrykk kan komme av naturlig konveksjon eller påtvunget konveksjon. Naturlig konveksjon skyldes oppdriftskrefter som driver fluidet, mens påtvunget konveksjon skyldes ytre krefter som vind, pumper eller lignende. Konveksjon kan være et problem i tykke isolasjonslag av luftpermeable materialer som mineralull. Problemet kan reduseres om man benytter konveksjonssperre og passer på at det ikke kommer hulrom i isolasjonslaget (Thue, 2016).

Geving og Thue trekker frem trykkvariasjoner fra vind, overtrykks- eller undertrykksventilasjon og skorsteinseffekten som faktorer som kan gi slike lufttrykksforskjeller (Geving & Thue, 2002).

Luftlekkasjer kan gjøre at fuktig inneluft presses ut gjennom utettheter i konstruksjonen mot kald side og gi kondens (Thue, 2016). Fukt transportert ved luftlekkasjer gir normalt en større risiko for fuktproblemer enn fukt transportert ved diffusjon (Time, et al., 2008). Siden det er vanskelig å beregne luftlekkasjer fra lokale sprekker og utettheter, er det vanskelig å håndtere fukttransport gjennom konveksjon beregningsmessig (Geving & Thue, 2002).

2.5.3 Varmetransport

Varme kan overføres ved tre ulike prosesser: konveksjon, ledning og stråling (Thue, 2016). Under er de tre prosessene kort forklart. Det er valgt å ikke gå i dybden på hver av dem, fordi det ikke sees på som relevant for masteroppgaven.

Konveksjon

Konveksjon av varme skjer gjennom lufttransport, og foregår på samme måte som konveksjon av fukt. Dette er forklart nærmere i kapittelet om konveksjon av fukt.

Varmeledning

Varmeledning, eller transmisjon, skjer ved at varme forplanter seg gjennom et stoff som molekylbevegelser. Transmisjonsvarmetapet avhenger av et materiales

varmeledningsevne (λ), tykkelse (d) til materialsjiktet og temperaturdifferansen på hver side. Materialets isoleringsevne oppgis gjerne i varmeledningsevne, og for en bygningsdel brukes ofte varmemotstandsevne (R) eller varmegjennomgangskoeffisienten (U) som er det inverse av varmemotstanden (Thue, 2016). Følgende sammenheng gjelder for isoleringsevnen til en bygningsdel:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{\lambda}{d}$$

Stråling

er et komplisert fenomen som ikke går i dybden på her, fordi det ikke regnes som relevant for oppgaven. Enkelt forklart kan man si at alle flater avgir og mottar stråling mot omgivelsene. Materialoverflatens emissivitet avgjør hvor mye stråling det sender ut. Videre bestemmes energibidraget fra innfallende stråling hvor mye av strålingen som absorberes og reflekteres av overflaten, samt hvor mye som transmitteres videre innover i materialet. Retningen og bølgelengden til den innfallende strålingen har også innvirkning på hvor mye energi som absorberes, reflekteres eller transmitteres (Thue, 2016).

2.6 WUFI

WUFI (akronym for Wärme- Und Feuchtetransport Instationär) er et beregningsprogram for koblet varme- og fukttransport i bygningskonstruksjoner, utviklet av Fraunhofer institutt for bygningsfysikk. Programmet kan brukes til å utføre beregninger av én- eller todimensjonale konstruksjoner. I denne masteroppgaven er det benyttet endimensjonale WUFI Pro 6.4.

Programmets input-parametere er konstruksjonsoppbygning, materialdata, samt ute- og inneklimate. Oppbygningen av konstruksjonen som skal analyseres legges inn i WUFI ved å legge inn sjikt med riktige tykkelser. Materialdata til hvert sjikt kan velges fra en database eller defineres selv. Materialelegenskapene kan være fukt- og temperaturavhengige. Hvilke materialelegenskaper som er med kan sees i Vedlegg 2.

2.6.1 Transportmekanismer i WUFI

Kalkulasjonsgrunnlaget og fysikken bak WUFI er basert på en doktorgrad av Hartwig Künzle (Künzel, 1995) ved Fraunhofer institutt for bygningsfysikk i Tyskland. Tabell 4 viser en oversikt over hvilke transportmekanismer for fukt- og varmetransport som er inkludert og ekskludert i WUFI.

En av de største forenklingene som er gjort av programmet er at fukt- og varmetransport gjennom konveksjon er utelatt. Dette er gjort siden luftstrømmer gjennom luftlekkasjer er vanskelig å kvantifisere og implementere i en matematisk modell. Luftlekkasjer er dessuten uønsket og vil i praksis finne sted kun i uplanlagte tilfeller eller defekte bygningskomponenter (Fraunhofer IBP, 2009).

Dreneringsstrømning er også utelatt av WUFI. Denne væsketransportformen finner sted kun i spesielle tilfeller. Det er stort sett bare i porer større enn 1 mm at

dreneringsstrømning har betydning. For vanlige finporøse, kapillæraktive bygningsmaterialer vil dreneringsstrømning spille en neglisjerbar rolle på fukttransporten (Geving & Thue, 2002). Osmose, elektrokinese og hydraulisk strømning er også spesialtilfeller i bygningsformål og er ikke inkludert i modellen (Fraunhofer IBP, 2009).

Tabell 4: Oversikt over transportmekanismer som er inkludert og utelatt i WUFI (Stellander, 2012).

	Inkludert i WUFI	Ikke inkludert i WUFI
Varmetransport	<ul style="list-style-type: none"> - Varmeledning - Entalpiendringer ved faseoverganger i fukt - Varmestråling 	<ul style="list-style-type: none"> - Varmetransport ved konveksjon
Damptransport	<ul style="list-style-type: none"> - Dampdiffusjon - Løsningsdiffusjon - Effusjon 	<ul style="list-style-type: none"> - Fukttransport ved konveksjon
Væsketransport	<ul style="list-style-type: none"> - Kapillærledning - Overflatekryping 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulisk strømning - Dreneringsstrømning - Elektrokinese - Osmose

2.6.2 VTT – muggindeks

WUFI Mould Index VTT er en tilleggsfunksjon til WUFI som benyttes for å beregne og predikere muggvekst i bygningskonstruksjoner. Muggmodellen er laget i et samarbeid mellom det finske forskningsinstituttet VTT og Fraunhofer IBP. VTT-modellen er empirisk og basert på laboratorieforsøk. Forsøkene ble gjort på trevirke av gran og furu. Senere ble modellen utviklet til å også gjelde andre bygningsmaterialer. Forskjellige muggsopparter ble brukt i forsøkene (Vereecken, Saelens, & Roels, 2011).

Muggindeksen er basert på visuelle funn av mugg. Muggveksten uttrykkes med en muggindeks med nivåer som går fra 0-6. Nivåene er basert på graden av synlig mugg på overflaten (se Tabell 5). Ved nivå 1 og 2 er muggsoppen kun synlig med mikroskop, mens det er økende grad av muggvekst synlig for det blotte øye ved nivå 3-6. I tillegg til muggindeksnivå, oppsummeres muggrisiko med et signallys i form av grønt, gult eller rødt lys. Dette er en generell vurdering av om muggveksten er akseptabel (grønt), om nærmere undersøkelser må gjøres (gult) eller om muggveksten er uakseptabel (rødt).

Faktorene som inkluderes i VTT-modellen er relativ fuktighet, temperatur, tid ved gunstige vekstvilkår og materialenes følsomhet for muggvekst. Relativ fuktighet og temperatur kan importeres fra WUFI. Materialenes følsomhet for muggvekst inkluderes ved at brukeren velger en sensitivitetssklasse.

Det skal også velges en tilbakegangsfaktor. VTT-modellen er lagt opp slik at biologisk aktivitet begynner når relativ fuktighet når et kritisk nivå. Når forholdene er ugunstige for muggvekst over lengre tid, vil mengden synlig mugg reduseres (Viitanen H. , et al., 2019). Derfor går muggindeksnivået ned når forholdene ikke legger til rette for muggvekst.

Tabell 5: VTT muggindeks (Viitanen & Ojanen, 2007)

Muggindeks	Muggdekning	Beskrivelse
0	Ingen vekst	Sporer ikke aktivert
1	Små mengder vekst på overflaten (mikroskop)	Innledende stadier av vekst
2	Mugg på <10 % overflaten (mikroskop)	-
3	Mugg på 10 % - 30 % overflaten (synlig)	Nye sporer produseres
4	Mugg på 30 % - 70 % av overflaten (synlig)	Moderat vekst
5	Mugg på > 70 % av overflaten (synlig)	Mye vekst
6	Mugg på omtrent 100 % av overflaten.	Svært mye vekst

2.6.3 Grønne tak i WUFI

Fraunhofer institutt for bygningsfysikk har utviklet en hygrottermisk modell for beregninger av grønne tak til bruk i bygningssimuleringsprogram som WUFI. Modellen ble utviklet for ekstensive grønne tak med substrattykkelse opptil 150 mm.

Simuleringsmodellen er kontrollert mot målte feltverdier, og resultatene fra WUFI stemmer overens med virkelige forhold (Zirkelbach, 2017). Modellen skal egne seg spesielt på trekonstruksjoner (Schafaczek & Zirkelbach, 2013).

3 Metode

3.1 Litteraturstudie

3.1.1 Omfang

Til denne masteroppgaven ble det valgt å gjennomføre en litteraturstudie i form av «citation chaining», heller enn en omfattende og strukturert databasestudie. Citation chaining blir i litteraturen også omtalt som «snowballing» (Wohlin, 2014), men blir i de påfølgende avsnittene omtalt som citation chaining.

I tillegg til citation chaining, ble relevant litteratur funnet gjennom tips fra veileder og andre ansatte på NTNU, samarbeidspartner Multiconsult og medstudenter. Der det var hensiktsmessig, ble det også gjort sporadiske søk i Universitetsbibliotekets database Oria. Utover dette ble kildene Sintef Byggforskserien, Treteknisk institutt, EPD-Norge og Norsk Standard ansett å være troverdige og pålitelige kilder til informasjon.

Litteraturstudien er altså av noe redusert omfang sammenlignet med mer omfattende databasesøk. Årsaken til dette er at det er tenkt at litteraturstudien skal supplere de andre metodene som er brukt. Spørsmålene skulle i stor grad besvares med informasjon fra andre metoder, fortrinnsvis dokumentstudien, simuleringer og LCA. Litteraturstudien skulle gi forfatterne teoretisk bakgrunn for å kunne besvare forskningsspørsmålene.

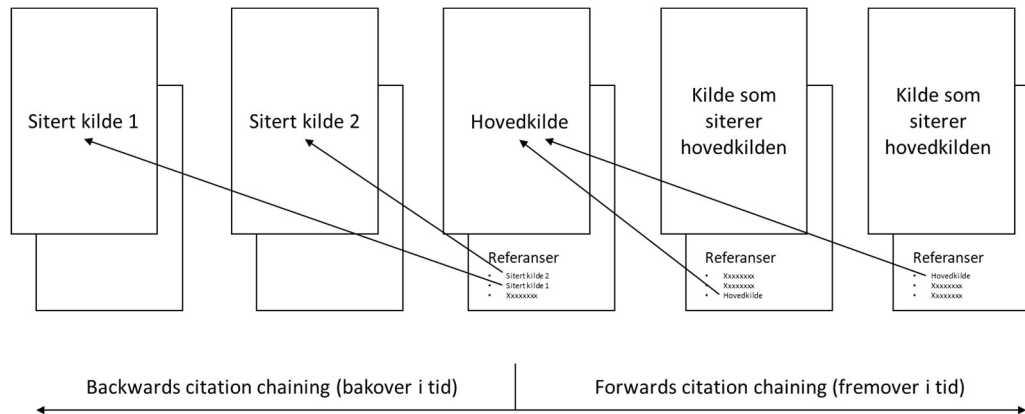
For massivtre ble en tilsvarende litteraturstudie utført i forbindelse med fordypningsoppgaven (Bakken & Kolsaker, 2019). Basiskildene for citation chaining-metoden var da en masteroppgave om massivtrebygging (Wahlstrøm, 2019) og en rapport fra Sintef om kompakte tak av massivtre (Time, et al., 2008). For celleglass ble det i masteroppgaven blant annet benyttet en masteroppgave fra UiT (Saeed, 2017) og en bok om «cellular ceramics» som basiskilder for citation chaining.

3.1.2 Metodebeskrivelse

Med «citation chaining» starter man altså med en eller flere kilder, som har høy relevans for undersøkelsen og samtidig er av god akademisk natur (Berry & Choi, 2012). Søkemetoden kan brukes både aktivt (aktiv søking etter informasjon) og passivt (der

informasjonssøkende adferd gir tilfeldig innhenting av relevant informasjon det ikke ble aktivt søkt etter) (Weigl, Page, Organisciak, & Downie, 2017).

I denne masteroppgaven ble det hovedsakelig brukt såkalt backwards citation chaining. Prinsippet for forwards og backwards citation chaining kan sees i Figur 19.



Figur 19: Forwards og backwards citation chaining (Berry & Choi, 2012)

Ved «backward chaining» benytter man referanselisten til den valgte hovedkilden til å finne relevante kilder til sin egen undersøkelse. På denne måten kan man raskt finne frem til tidligere utgitt materiale på temaet man undersøker. Ved «forward chaining» finner man relevante kilder ved å se på litteratur som har den valgte hovedkilden i referanse-kilden.

En annen form for citation chaining, er det som kalles forward citation chaining. Her benytter man søkemotorer til å identifisere artikler hvor basekilden er blitt sitert. På den måten kan man jobbe seg fremover i tid for å finne ny og mer oppdatert litteratur.

Citation chaining blir av noen oppfattet som en mer effektiv metode for å finne relevant litteratur fordi man lettere og raskere rettes inn mot litteratur man vet er relevant for undersøkelsen man selv skal gjøre. Metoden blir ikke anbefalt når man er ute etter informasjon om et vidt tema. Siden problemstillingene denne oppgaven tar opp er relativt spesifikke, ble denne metoden ansett som egnet.

Litteratursøket til denne masteroppgaven baserer seg på denne metoden. Det er imidlertid ikke gjort et systematisk søk gjennom hele kildelisten til hvert dokument. I stedet er kildene lest gjennom, og der det er funnet temaer som er relevant er det gjort en vurdering av kildene tilhørende disse temaene. Backwards chaining ble også brukt til å følge opp påstander i kilden (kalt verifisering) (Weigl, Page, Organisciak, & Downie, 2017). Denne verifiseringen kunne igjen føre til at nye kilder ble oppdaget.

3.1.3 Styrker ved metoden

Siden det ble bestemt at litteraturstudien ikke skulle stå for hoveddelen av informasjonsinnhenting i oppgaven, ble det naturlig å gjøre dette med en metode som ikke var alt for tidkrevende, samtidig som den ville gi tilstrekkelig mengde informasjon om emnet.

Tipsene fra personer med erfaring som var relevant for oppgaven er en snarvei til relevante kilder, fordi man bruker erfaringen til andre som kjenner til arbeid på området og kanskje har gjort lignende søk selv. Dette gjør at man slipper tidkrevende søking gjennom databaser for å finne relevant stoff.

Backwards citation chaining er en effektiv metode for å komme frem til flere relevante kilder fordi det er relativt enkelt å se gjennom referanselisten og deretter avgjøre hva som er relevant og ikke (Wohlin, 2014). Metoden er raskere enn omfattende strukturerte studier, og kan resultere i like mange relevante kilder (Wohlin, 2014). Disse resultatene baserer seg riktignok på en mer strukturert form for metoden, hvor man systematisk går gjennom hver kilde i kildelisten og vurderer hver enkelt. Dette er ikke gjort her, så resultatene er ikke direkte overførbare. Likevel gir det en indikasjon på at det å bruke referanselisten til en god og relevant kilde er en god metode for å finne nye og relevante kilder.

Citation chaining er en spesielt effektiv metode til informasjon om man finner en tilstrekkelig relevant og nylig produsert kilde å ta utgangspunkt i. Da vil det være stor sannsynlighet for det finnes referanser til annet relevant arbeid her. Dersom det i tillegg er utført en større litteraturstudie i utgangskilden vil dette styrke metoden betraktelig.

Simen Wahlstrøms masteroppgave fra 2019 ble tidlig vurdert som en god og svært relevant kilde til litteratur om massivtre. Yasir Saeeds gjorde i forbindelse med en masteroppgave i 2017 en litteraturstudie om skumglass bygninger. Ettersom begge disse oppgavene er gjort såpass nylig, ble backwards citation chaining vurdert som en godt egnet metode.

3.1.4 Svakheter ved metoden

Selv om «citation chaining» ble vurdert som en egnet metode i dette arbeidet, finnes det fortsatt noe usikkerhet knyttet til hvor god metoden er sammenlignet med andre litteratursøk-metoder. I tillegg er metoden veldig god dersom man benytter den i kombinasjon med andre metoder, men den burde nødvendigvis ikke bli sett på som et substitutt for et databasesøk (Wohlin, 2014). Metoden er også svært avhengig av at man velger ut et godt sett med utgangskilder. Kildene må være av god nok kvalitet. Dersom man bruker metoden på for få kilder som ikke er diversifisert nok med tanke på utgivelsesår, forfattere og utgivere, vil dette også utgjøre en svakhet som påvirker effektiviteten til metoden. Hvis man ikke har inkludert kilder fra alle relevante forskningsmiljøer kan det føre til at artiklene man finner klynger seg, og at viktig litteratur fra forskningsmiljøene man ikke har inkludert blir oversett (Wohlin, 2014).

3.2 Simuleringer

Det ble gjennomført fuktberegninger for å undersøke hvilken innvirkning ulike parametere har på takkonstruksjonens fuktprestasjoner. Fuktberegningene ble gjennomført som en parameterstudie i WUFI. Dette programmet ble valgt fordi det er «state-of-the-art», og forfatterne av masteroppgaven hadde kjennskap til programmet fra flere emner på NTNU.

Totalt ble det gjort beregninger av 25 varianter av startbetingelser og oppbygninger. Parameterne som ble undersøkt var konstruksjonsoppbygning, tykkelse på massivtreelementet og byggfuktnivå i massivtreelementet. Potensialet for muggvekst, i tillegg til total fuktighet og uttørkingstid i massivtre, ble vurdert for variantene. De følgende avsnittene redegjør grunnlaget for beregningene.

3.2.1 Beregningsvarianter

Tabell 6 viser en oversikt over alle beregningsvariantene og hvilke variabler som er valgt.

Tabell 6: Beregningsvarianter i WUFI

Parametere	Variabler	Beregningsvarianter																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Oppbygning	Grønt tak, celleglass, massivtre	x	x	x	x	x	x													x	x	x	x	x	x	x
	Grønt tak, XPS, mineralull, uten sperresjikt, massivtre							x	x	x	x	x	x													
	Grønt tak, XPS, mineralull, dampspærre, massivtre													x	x	x	x	x	x							
Tykkelse massivtre	CLT 160 mm	x	x	x				x	x	x				x	x	x				x		x		x		
	CLT 320 mm				x	x	x				x	x	x				x	x	x		x		x		x	x
Byggfukt	Lavt (12%)	x			x			x			x			x			x									
	Middels (15%)		x			x			x			x			x				x							x
	Høyt (20%)			x			x			x			x			x				x						
	Middels (18%)																				x	x				
	Middels (17%)																						x	x		
	Middels (16%)																								x	x
Inneklima	Normal fuktbelastning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Høy fuktbelastning																									x

3.2.2 Parametervariasjoner

Oppbygning

Det ble valgt tre ulike oppbygninger som ble sammenlignet mot hverandre. Illustrasjon av celleglasskonstruksjonen kan sees i Figur 21 og mineralullkonstruksjonene i Figur 24. Alle oppbygningene har grønt tak. Oppbygningene som ble valgt ble gjort i sammenheng med valgene til miljøanalysedelen i kapittel 3.4.3. Det ble lagt vekt på at konstruksjonene skulle ligne de som blir brukt i praksis, samtidig som det ble forsøkt å forenkle oppbygningene i WUFI der det var hensiktsmessig. Dette gjelder for eksempel at det ikke er tatt med PE-folier som ligger inntil asfaltmembranen, da damp tettheten til sistnevnte vil dominere.

For valget av isolasjonsmateriale ble det gjort samme vurdering som i miljøanalysekapittelet. Det ble sett på som mest interessant å undersøke hvordan en celleglasskonstruksjon presterer i forhold til de mest sannsynlige alternativene, og en konstruksjon med steinull som isolasjonsmateriale ble valgt. Siden det ikke er klarhet i om dampspærre bør benyttes eller ikke i mineralullkonstruksjoner, ble begge

alternativene sammenlignet med celleglassoppbygningen. Både Wahlstrøm (2019) og Bakken & Kolsaker (2019), samt intervju med massivtreprodusenten (kapittel 4.2) viste at det er uenighet blant aktørene i byggenæringen om hvorvidt det bør benyttes dampsperrsjikt i ytterkonstruksjoner med massivtre eller ikke. Smarte dampsperrer i mineralullkonstruksjoner ble vurdert å være utenfor prosjektets omfang.

Byggfukt

Som forklart i kapittel 2.4.5 er det uklart byggenæringen om hva som er akseptable fuktforhold i massivtre ved lukking av taket. Byggfuktnivå ble derfor sett på som en naturlig parameter å undersøke. Det ble i utgangspunktet bestemt å undersøke tre ulike byggfuktnivåer, 12, 15 og 20 vektprosent fuktighet.

12 vektprosent fuktighet ble valgt fordi det er det massivtre typisk leveres med. Dette er rimelig tørt. Flere av de intervjuede aktørene satte krav til 15 vektprosent som øvre grense for fuktinnhold i massivtre ved lukking (Bakken & Kolsaker, 2019). 20 vektprosent ble valgt for konstruksjoner med høyt byggfuktnivå. Dette kan være aktuelt for massivtrebygg der trevirket har stått eksponert for nedbør i lengre tid før lukking.

Etter å ha gjennomført de første 18 beregningsvariantene, ble det observert at 15 vektprosent virket å gi akseptable resultater, mens 20 vektprosent ga muggvekst. Derfor ble det bestemt å nærmere undersøke ved hvilket byggfuktnivå muggveksten når et uakseptabelt nivå. Fordi det ikke var helt tydelig hvilken påvirkning massivtreelementenes tykkelse hadde, ble denne parameteren tatt med videre. Derfor ble det gjennomført to nye beregninger for fuktnivåer på 18 %, 17 % og 16 %.

Tykkelse massivtre

Det ble tidlig sett på som interessant å undersøke innvirkningen massivtreets tykkelse har på fuktegenskapene til konstruksjonen. Massivtreelementer leveres vanligvis i tykkelser mellom 60 og 320 mm (Stora Enso, 2013). Med så store variasjoner i tykkelse ble det sett på som sannsynlig at tykkelsen har mye å si for uttørkingshastighet.

De minste dimensjonene ble vurdert å være uaktuelle som bærekonstruksjon i aktive tak. Det ble valgt to ulike tykkelser som skulle representere tykkelser som anvendes i byggeprosjekter. Tykkelsene som ble valgt, var, 160 mm og 320 mm. Førstnevnte skal representere et typisk dekke med konvensjonell spennvidde, omtrent 4-4,5 m. Dekket på 320 mm ble valgt for ekstra store spennvidder, omtrent 7 m.

Inneklima

Fuktbelastning legges inn i WUFI ved å velge Høy, normal eller lav fuktbelastning etter EN 15026. I utgangspunktet ble det bestemt å ikke undersøke effekten av inneklimatets fuktbelastning på fuktforholdene i takkonstruksjonene. Derfor ble beregningsvariant V1-V24 gjort med normal fuktbelastning.

Det ble likevel gjort en simulering med høy fuktbelastning. Etter å ha gjennomført de første 24 variantene kom man fram til et byggfuktnivå som så ut til å gi akseptable fuktforhold og moderat muggvekst. Hensikten med beregningsvariant V25 var å

undersøke om dette byggfuktnivået ga akseptable resultater, også om innendørs fuktbelastning for høyere enn normalt. V25 hadde den oppbygningen som ble sett på som den med størst risiko for muggvekst. Tanken var at om V25 gir godkjente resultater med høy innendørs fuktbelastning, ville også de andre oppbygningene gjøre det.

3.2.3 Andre inputparametere

Grønt tak

Det grønne taket ble modellert etter WUFIs retningslinjer for beregning av ekstensive grønne tak (Schafaczek & Zirkelbach, 2013). Denne modellen har et vekstmedium på opptil 150 mm, noe som er i nedre grense for intensive tak (Elvebakk, Time, Skjeldrum, & Kvande, 2018). Det ble likevel vurdert å være tilstrekkelig, i mangel på modeller for semi-intensive eller intensive grønne tak.

Modellen innebærer at det legges inn et substrat kalt «Generic substrate» fra WUFIs database på 150 mm. I de nederste to cm av substratet legges det inn en fuktkilde. Fuktkilden legges inn som en andel (40 %) av regn på overflaten, og vannmengden begrenses til fri vannmetning. I tillegg velges kortbølget strålingsabsorpsjonstall til 0,3, og langbølget strålingsemissivitet til 0 (Schafaczek & Zirkelbach, 2013).

Materialer

All materialdata er hentet fra databasen til WUFI. En komplett oversikt over fuktavhengige og ikke-fuktavhengige materialdata kan sees i vedlegg 2. Alle materialer i WUFIs materialdatabase er målt og verifisert av Fraunhofer IBP (Fraunhofer IBP).

U-verdi

Det ble utført enkle håndberegninger for å bestemme hvilke isolasjonstykkelser som skulle velges. Beregningene tok sikte på møte kravet til U-verdi i tak i henhold til energitiltaksmetoden i TEK17. U-verdien for taket skulle da ligge på 0,13 W/m²K. Beregningene kan sees i vedlegg 3.

XPS-tykkelse ble valgt til 50 mm, da dette sjiktet hovedsakelig er ment som beskyttelsessjikt. Med materialparametere som angitt i vedlegg 2, og tykkelse på massivtre lik 160 mm, ble nødvendig tykkelse på celleglassisolasjonen 223 mm og mineralullen 161 mm. For enkelhets skyld ble det derfor valgt hhv. 250 mm og 200 mm tykkelser for celleglass- og mineralullisolasjonen.

Startbetingelser

Startbetingelser og andre valg gjort i WUFI kan sees i vedlegg 2. For startfuktighet ble valgt «Angi typisk byggfukt» i WUFI valgt for materialene, med unntak av XPS og KL-treet. For alle materialer ga dette rimelige byggfuktnivåer, med unntak av XPS. Ved «typisk byggfukt» ble det lagt inn fuktighetsnivå på 11 kg/m³, noe som virker altfor høyt.

Ved 80 % RF viser sorpsjonskurven at materialet skal ha vanninnhold på 0,28 kg/m³. Dette virket mer sannsynlig og ble valgt som startfuktighet.

Beregningsperiode

Det er valgt beregningsperiode på fem år, med starttidspunkt 1. oktober 2020. Fem år ble sett på som tilstrekkelig for å se trender for fuktakkumulasjon og når likevekt ville innstilles. Hvis det skulle oppstå muggsopp ble det sett på som sannsynlig at det ville skje i løpet av de første fem årene.

Uteklima

Oslo ble valgt som geografisk plassering for alle simuleringene. Værdata for lokasjonen hentes automatisk av programmet.

3.2.4 Vurdering i VTT

WUFI Mould Index VTT 2.1.4 ble brukt til etterbehandling av data fra WUFI-simuleringene. Programmet ble valgt fordi det ble sett på som å være den beste metoden til å objektivt vurdere muggrisiko.

Det ble laget en case for hver beregningsvariant. Relativ fuktighet og temperatur for monitorposisjonen beregnet av WUFI ble importert til hver case. Valgene som ble gjort i VTT kan sees i Tabell 7. «Occupant exposition class» ble valgt til overflate inne i konstruksjoner uten kontakt med inneluft. Dette valget har kun konsekvenser for signallyset, altså tolkningen av muggindeksen, og ikke selve muggindeksnivået for hver case. Hjelpenfunksjonen til programmet klassifiserer høvlet trevirke som «sensitive», og siden massivtreelementer består av høvlede lameller ble dette «sensitive» valgt. Samme hjelpenfunksjon antyder at tilbakegangsfaktoren inneholder betydelig usikkerhet og anbefaler at brukeren velger «relatively low decline» for å være på den sikre siden. «Softwood» ble valgt siden trevirket er av bartre.

Tabell 7: Valg i WUFI VTT

Occupant exposition class	Surfaces inside constructions without direct contact to indoor air
Material	Spruce Board
Sensitivity class	Sensitive
Material class	Relatively low decline
Type of wood	Softwood

3.3 Kvalitativ informasjonsinnhenting

Ved siden av litteraturen som ble funnet i litteraturstudien, ble det nødvendig med noen flere kilder til informasjon i oppgaven for å kunne besvare forskningsspørsmålene på en

tilstrekkelig god måte. Dette kan være nødvendig siden informasjonen en finner i litteraturen noen ganger kan være utdatert og noen ganger stemmer den ikke med hva som er erfaringene i praksis.

Intervjuer stod for en viktig del av informasjonsinnhenting i fordypningsprosjektet. Som nevnt i kapittel 1.2, er deler av responsen som ble gitt der også relevant for forskningsspørsmålene i masteroppgaven. Selv om det ikke er et resultat produsert i arbeidet med masteroppgaven er det likevel så tett knyttet til forskningsspørsmålene at det er brukt som grunnlag når disse skal besvares.

Da arbeidet med masteroppgaven startet opp ble det besluttet at de fleste intervjuene som var nødvendig allerede var gjennomført. Det ble besluttet at det likevel var behov for å intervjuer noen flere aktører som ikke ble intervjuet høsten 2019. Mer spesifikt gjaldt dette en massivtreprodusent og en celleglassprodusent.

Videre har det i studien forgått kommunikasjon over e-post og telefonsamtaler med diverse aktører. I hovedsak ble dette gjort med samarbeidspartner Multiconsult, hvor det ble diskutert flere ulike problemstillinger knyttet til oppbygning og utførelse av takkonstruksjoner ble diskutert med personer med ulike roller innenfor bedriften.

3.3.1 Intervjuer

Intervjuer er en av de vanligste formene for datainnsamling i kvalitativ forskning. De kan være nyttige i situasjoner der man ønsker informasjon om et tema fra informantens/intervjuobjektets ståsted (Tjora, 2010). Ettersom masteroppgaven er relativt spisset, ble det etter det initiale litteratursøket vurdert at det var nødvendig å supplere med intervjuer av en celleglassprodusent og en massivtreprodusent for å få deres synspunkt på den spesifikke problemstillingen.

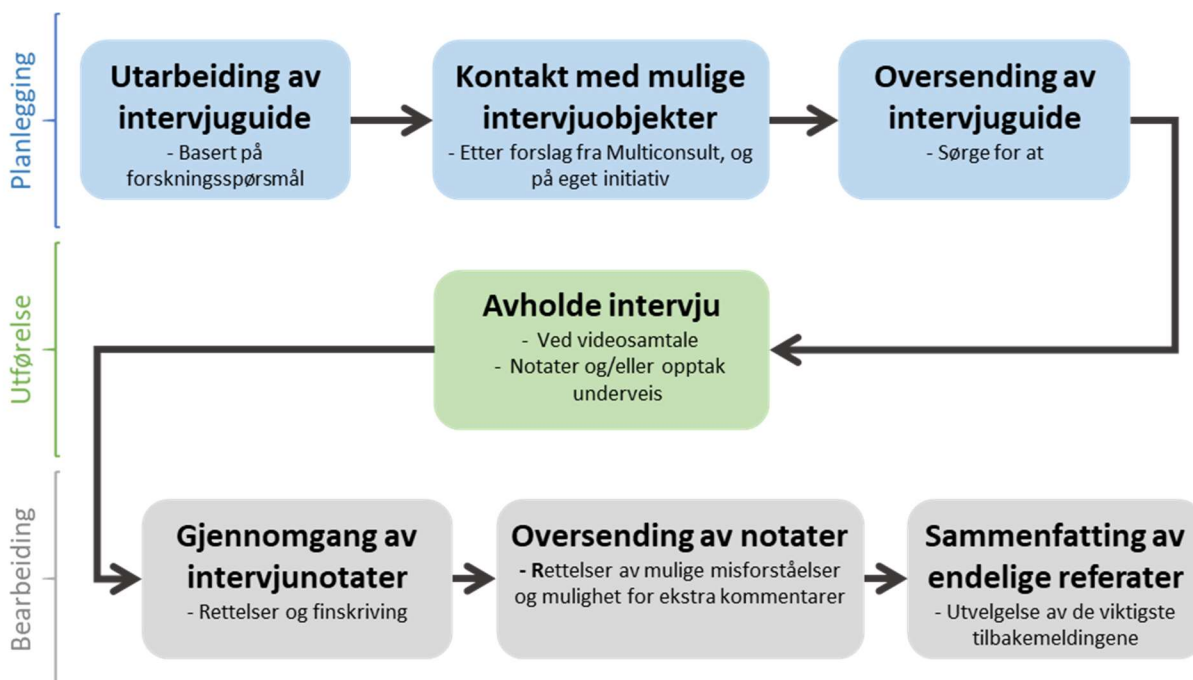
Ifølge Tjora (2010) egner intervjuer seg der man ikke har tilstrekkelig kunnskap om temaet til å lage gode nok spørsmål til en kvantitativ spørreundersøkelse, og/eller ikke har tilgang til et stort antall informanter. Tjora trekker også inn at man med intervjuer har stor kontroll over fremdrift, datamengde og innhold og at dette er en styrke ved metoden. Dette støttes opp av Yin (2009), som trekker frem fordelene av å kunne sikte seg inn på et spesifikt emne og dermed styre innholdet i datamengden i stor grad.

Det finnes likevel noen svakheter med metoden. Yin mener det er viktig å huske på at intervjuene kun er verbale rapporter som kan være svekket på grunn av:

- Intervjuobjektet svarer partisk fordi spørsmålene er uheldig formulert eller fordi den har egeninteresse i resultatet av forskningen
- Feil på grunn av utilstrekkelig erindring av innholdet
- Intervjuobjektet sier det den tror intervjueren vil høre (Yin, 2009).

I gjennomføringen av intervjuene har det blitt forsøkt å minimere disse ulempene. Blant annet ved opptak og notater underveis i intervjuene for å sikre mest mulig korrekt gjengivelse av responsen. Korrekt gjengivelse har også blitt sørget for, ved å oversende referatene av intervjuene til de intervjuede i etterkant. Spørsmålene har blitt formulert mest mulig åpent innenfor tema, slik at de ikke skal lede inn mot ønskede svar.

Flytdiagrammet i Figur 20, viser den generelle fremgangsmåten som ble benyttet under intervjuene. De enkelte stegene er nøyere beskrevet i de påfølgende avsnittene.



Figur 20: Flytdiagram over gjennomføring av intervjuer

Intervjutype

Det ble besluttet å utføre såkalte fokusintervjuer. Dette er relativt korte, åpne intervjuer med varighet på omtrent én time. Fokusintervjuer er mer fleksible og har større mulighet for avsporinger enn det spørreundersøkelser har. Samtidig er de mer rigide og inneholder flere forutbestemte spørsmål enn et dybdeintervju (Yin, 2009). I de to kildene som er brukt på temaet, skilles det mellom dybdeintervjuer og fokusintervjuer, men beskrivelsen av de to er noe ulik i de to kildene. Tjora beskriver et dybdeintervju som en fri samtale rundt noen spesifikke temaer, på én time eller mer, med relativt åpne spørsmål hvor informanten kan gå i dybden der de har mye å fortelle (2010). Dette kan minne om det som tidligere ble omtalt som et fokusintervju. Et fokusintervju beskrives derimot av Tjora som et intervju med sterkt avgrensede temaer, med korte refleksjoner om informantens erfaringer og eksemplifiseres med intervjuer med varighet på rundt 20 minutter (Tjora, 2010).

Hvem ble intervjuet?

Det ble utført to intervjuer vinteren og våren 2020 i tillegg til 7 intervjuer som ble utført høsten 2019 ifb. fordypningsprosjektet. Mange av de intervjuede aktørene hadde god kjennskap til massivtre, men få hadde brukt det i kompakte tak. Det var også få som hadde erfaring med både celleglass og massivtre, og ingen hadde erfaring med

kombinasjonen av de to i kompakte tak. Aktive tak og massivtre var også lite utprøvd blant de spurte. Det ble derfor besluttet at det også var nødvendig med et intervju av en massivtreprodusent få deres vurderinger av kombinasjonen celleglass og aktive tak. Få av aktørene som ble intervjuet høsten 2019 hadde særlig erfaring med bruken av celleglass i tak. Med bakgrunn i dette, og at problemstillingen i oppgaven i stor grad dreide seg om celleglass ble det vurdert som nødvendig å gjennomføre en samtale med en celleglassprodusent som hadde god kjennskap til det norske markedet. Etter tips fra samarbeidspartner Multiconsult ble det opprettet kontakt med en representant fra celleglassprodusenten.

Intervjuguide

Det ble utarbeidet en intervjuguide for hvert intervju. Intervjuguidene som ble brukt i fordypningsoppgaven ble brukt som utgangspunkt, da noen av spørsmålene fortsatt var aktuelle. Forskningsspørsmålene ble brukt som grunnlag for intervjuguiden for begge intervjuene, men noen mer spesifikke spørsmål ble stilt til hvert intervju.

Det ble lagt vekt på å formulere spørsmålene slik at de var spisset mot det en ønsket svar på, samtidig som de ikke skulle være for ledende. Det er heller ikke heldig at spørsmålene virker truende eller anklagende på intervjuobjektet. Dette kan føre til at intervjuobjektet går inn i en forsvarsposisjon og svarer mindre åpent i intervjuet. Av denne grunn ble det satt fokus på å unngå for mye bruk av ord som «hvorfor» da dette kan virke truende på intervjuobjektet (Yin, 2009). Det ble også fokusert på å holde spørsmålene mest mulig åpne innenfor temaene, slik at de ikke skulle være for ledende og på den måten ødelegge formålet med intervjuet. I tillegg ble spørsmålene formulert slik at en fikk frem intervjuobjektets eller bedriftens mening og erfaring om temaet, og ikke generelle oppfatninger.

Spørsmålene var ment som et utgangspunkt for intervjuene, og det var meningen at alle spørsmålene skulle gjennomgås. Intervjuene ble imidlertid mindre strukturerte enn forfatterne ønsket. I praksis endte intervjuene mer opp som ustrukturerte samtaler om temaene, enn at de ga svar på samtlige svar i intervjuguiden. Dette er på mange måter en god ting, da det gir intervjuobjektet muligheten til å sette fokus på de tingene han/hun synes er viktigst og mest sentralt innenfor temaet. Det gir også en bedre mulighet til å komme inn på andre tilstøtende problemstillinger som forfatterne ikke hadde tenkt på i forkant. Samtidig er det mulig at samtalen ender opp på utsiden av omfanget til problemstillingen og på den måten resulterer i et dårligere sluttprodukt.

Gjennomføring

Intervjuene ble gjennomført fredag 6. mars og mandag 27. april våren 2020. Med bakgrunn i at bedriftene ikke holdt til i Trondheim hvor forfatterne holder til, samt COVID-19-situasjonen, ble det vurdert som mest hensiktsmessig å utføre intervjuene ved videosamtale.

Det ble diskutert om det var nødvendig å gjøre opptak av intervjuene. Dette gir ifølge Yin (2009) mer korrekte gjengivelser av intervjuet og man kan ha økt fokus på responsen til intervjuobjektet ved å slippe å notere. Dette burde derimot ikke brukes når intervjuobjektet ikke ønsker det eller blir tydelig ukomfortabel. Det burde heller ikke

brukes dersom man bruker opptaket som et substitutt for å ikke følge med underveis i intervjuet (Yin, 2009). Av disse årsakene ble det ikke tatt opptak av intervjuene i fordypningsprosjektet. Det ble derimot observert noen svakheter ved å ikke gjøre dette, blant annet var det enkelte tilfeller der det var usikkerhet om hva intervjuobjektet mente, og det var også et tilfeller der opplevelsen var at intervjuobjektet trakk tilbake ting de tidligere hadde sagt. Basert på disse erfaringene ble det vurdert som gunstig å gjøre opptak av intervjuene.

Samtalen med skumglasprodusenten var først ment å være en mindre strukturert samtale og ikke et strukturert intervju. Inn mot samtalen ble det derimot vurdert som gunstig å gjennomføre samtalen på en mer strukturert måte, og samtalen ble gjennomført som et fokusintervju. Denne sene endringen gjorde at det ikke ble avtalt at det skulle gjøres opptak av samtalen. Det ble derimot tatt notater underveis i samtalen, som ble finskrevet i etterkant av intervjuet og sendt over til intervjuobjektet som fikk komme med endringer og tillegg.

Intervjuet med massivtreprodusenten ble imidlertid gjort opptak av. Her ble intervjuobjektet informert om opptaket, og det ble spurt om tillatelse til å ta opp samtalen. I etterkant ble opptaket transkribert og oversendt intervjuobjektet. Dette ga mulighet for å rette opp eventuelle misforståelser og nærmere forklaring av uklarheter.

3.3.2 Dokumentstudie

En dokumentstudie kan defineres som innsamling, behandling og tolkning av sekundærdata. Metoden er nyttig i de situasjonene der det er begrenset tilgjengelighet på primærdata og når en ønsker å finne ut hva som faktisk er blitt utført i praksis og ikke bare hva som er anbefalt fra litteraturen. I masteroppgaven er det valgt å definere all dokumentasjon, løsninger og prosjekteringsgrunnlag som en del av dokumentstudien. Publiserte artikler, rapporter og bøker går inn under litteraturstudien.

Siden det fantes lite norsk litteratur som omtalte celleglassisolasjon og spesielt kombinasjonen massivtre, celleglass og aktive tak ble dokumentstudie vurdert som en gunstig metode.

Innhenting av data til dokumentstudien har foregått over e-post med ulike aktører og ved å hente ut dokumentasjon som ligger direkte tilgjengelig på produsentenes nettsider.

Dokumentene som dokumentstudien resulterte i ble videre gjennomgått og undersøkt for å finne argumentasjon og eksempler på utførelse som ville være aktuelt for problemstillingen i oppgaven. Det ble også benyttet til å finne produktegenskaper for de aktuelle materialene i oppgaven.

3.3.3 Andre informasjonskilder

I flere tilfeller ble det behov for å diskutere ulike deler av oppgaven med fagkyndige personer. I de tilfellene var ofte temaene det var interesse av å finne ut av relativt små, og ikke omfattende nok til å gjennomføre et helt intervju. Korrespondansen foregikk derfor som regel bare over telefon eller over e-post. Dette ble gjort mye med

samarbeidspartner Multiconsult som delte mye kunnskap og erfaringer over både e-post og telefon. De bidro også ved å sette oss i kontakt med andre fagpersoner.

3.4 Miljøanalyse

Målet med oppgaven var å vurdere egnetheten til kompakte aktive massivtretak med celleglassisolasjon. Massivtrekonstruksjoner og grønne tak blir ofte brukt i bygg med høye miljøambisjoner. Miljøpåvirkning er derfor en vesentlig faktor når det skal gjøres en vurdering av egnetheten til løsningen. Det finnes få norske studier som tar for seg miljøegenskapene til celleglass, og forfatterne har heller ikke funnet mange utenlandske studier som undersøker dette. Det ble imidlertid funnet to kilder i oppstarten av arbeidet som indikerte ganske gode miljøegenskaper på celleglass. Begge studiene er basert på europeiske utslippstall, så dette kan avvike litt fra norske tall. I europeisk sammenheng presterer materialet bedre eller tilsvarende som det glassull, steinull og plastisolasjon gjør når det gjelder utslipp av SO_x, NO_x og volatiler og på forbruk av vann. Når det gjelder utslipp av CO₂ viser noe litteratur at det presterer bedre enn plastisolasjon og ganske likt med mineralull med høy densitet. Mineralull med lav densitet presterer imidlertid betydelig bedre (Papadopoulos, 2004). Etter den initiale litteraturgjennomgangen ble det utført en overslagsberegning av GWP til noen norske isolasjonsmaterialer sammenlignet med utslippene fra celleglass. Disse tallene indikerte at celleglass presterte ganske mye dårligere enn de andre materialene. Det var altså en mulig uoverensstemmelse mellom den litteraturen som var funnet og de faktiske utslippstallene. Basert på dette ble det sett på som interessant å gjøre en beregning av GWP for de ulike løsningene. Det ble bestemt at det måtte gjøres en vurdering av løsningene og ikke bare selve isolasjonsproduktene, siden valget av isolasjonsmateriale kan ha innvirkning på resten av oppbygningen og dermed også total GWP.

Det er valgt å kalle metoden for en miljøanalyse og ikke LCA eller livsløpsvurdering. Dette er fordi det ikke utføres en fullstendig LCA, men bare en analyse av en miljøpåvirkningskategori (GWP). Analysen innhenter bare data fra allerede produserte miljødeklarasjoner og det gjøres ikke en total vurdering av alle materialene og fasene til hvert produkt i analysen. Metoden har likevel store likheter med en LCA, og arbeidet har blitt utført med bakgrunn i beskrivelse av hvordan livsløpsvurderinger skal utføres. Beskrivelser og kjennetegn som blir nevnt i teksten som i hovedsak gjelder for livsløpsvurderinger er antatt og også gjelde for miljøanalysen som er utført i studien. Videre i teksten når LCA nevnes er det derfor innforstått at dette gjelder for oppgavens miljøanalyse også.

Hovedmålet med en LCA, er ifølge Menoufi (2011) å redusere miljøpåvirkning ved å lede til valg av mer miljøvennlige produkter og løsninger. I denne oppgaven er målet med livsløpsanalysen og vurdere om en kompakt takkonstruksjon med celleglassisolasjon er et godt miljømessig alternativ til en lignende takkonstruksjon med alternative isolasjonsmaterialer. Basert på dette ble det utført livsløpsvurderinger av 7 ulike takkonstruksjoner som er listet under.

1. Celleglasskonstruksjon
2. Glassullkonstruksjon, uten betong

3. Glassullkonstruksjon, med betong
4. Steinullkonstruksjon, uten betong
5. Steinullkonstruksjon, med betong
6. Plastisolasjonskonstruksjon, uten betong
7. Plastisolasjonskonstruksjon, med betong

Det ble lagt ned arbeid for å finne de mest plausible og hensiktsmessige konstruksjonene. I de påfølgende delkapitlene følger en beskrivelse av hver av oppbygningene samt en egenprodusert tegning av hver oppbygning. Tegningene inkluderer ikke dreneringssjikt, separasjonslag, vekstmedium eller beplantning, fordi det er antatt at disse delene er like i alle konstruksjonene og dermed ikke har noen innvirkning på sammenligningsgrunnlaget. Tegningene inkluderer imidlertid bærekonstruksjonen fordi det ble ansett som viktig for å gjøre det tydelig for leseren hvordan konstruksjonene er bygd opp. Det er imidlertid viktig å påpeke at bærekonstruksjonen ikke er inkludert i analysen.

De ulike oppbygningene er beskrevet i kapittel 3.4.3. Det er også inkludert egenproduserte tegninger av de ulike oppbygningene.

I de videre delkapitlene følger en beskrivelse av metoden. Den første delen gir en gjennomgang av generelle aspekter ved livsløpsvurderinger. Deretter følger den spesifikke fremgangsmåten som er benyttet. Her er det også beskrivelse og forklaring av valg som er gjort underveis.

3.4.1 Generelt om LCA

Livsløpsvurdering er en analysemetode som brukes til å vurdere miljøpåvirkningene fra et produkt eller et system sammensatt av flere produkter. Metoden blir også kalt LCA (Life Cycle Assessment eller Life Cycle Analysis) og livssyklusanalyse. I denne oppgaven blir både livsløpsvurdering og LCA brukt for å betegne prosessen.

I bygningssammenheng benyttes metoden stort sett til å vurdere miljøpåvirkningene til løsninger, enkeltprodukter eller hele bygg. Analysen kan omfatte hele, eller deler av livsløpet avhengig av hva en ønsker å analysere og hvor grundig analyse en ønsker. Resultatene kan benyttes til å gi en vurdering av hvordan det man analyserer påvirker miljøet, og kan for eksempel resultere i en miljødeklarasjon for en løsning eller et enkeltprodukt.

Dette er ikke ment som en grundig gjennomgang av alle aspektene ved livsløpsanalyser, men skal gjøre det enklere å forstå hva en slik analyse innebærer, hvordan den utføres og hvilke usikkerheter som følger med. I hovedsak er kapitlet basert på Sintef Byggforsk sine datablader og Norsk Standard. Bruksanvisningene for hvordan tolke EPD-er som blir utgitt av EPD-Norge blir også benyttet i stor grad. De angir blant annet fremgangsmåte og regler for hvordan skalere opp transportavstander hvis produktene produseres i utlandet og hvilke livsløpsfaser som inkluderes for de ulike produkttypene.

Faser i en livsløpsvurdering

En LCA inneholder de fire fasene som er listet i punkt 1-4 under (Standard Norge, 2006). Forklaringene til fasene er hentet fra Sintef Byggforsk (Byggforskserien 470.101)

1. Fastsette hensikt og omfang med analysen
2. Livsløpsregnskapsfasen: regnskap for ressurser som benyttes og tilhørende utslipp
3. Livsløpseffektvurderingsfasen: evaluere miljøpåvirkningen utslippene har
4. Tolkningsfasen: tolke regnskap og resultater, samt å rapportere resultatene

Funksjonelle- og deklarererte enheter

I livsløpsanalyser skilles det som regel mellom funksjonelle og deklarererte enheter.

En deklarerert enhet blir brukt i miljødeklarasjoner, og utslippene i en slik deklarasjon er angitt som utslipp per deklarerert enhet. For eksempel er det vanlig at utslippene fra isolasjonsmaterialer er gitt i utslipp per m² isolasjonsmateriale med en varmemotstand $R = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ (EPD-Norge).

Når en skal gjøre en livsløpsvurdering er det derimot nødvendig å ha en felles enhet for produktene og løsningene i analysen. Dette er viktig for å kunne summere opp de totale utslippene for en løsning, samt ved en sammenligning av ulike løsninger. Det må derfor velges en *funksjonell enhet* for analysen. Det er også vanlig å angi en standard levetid som inngår i den funksjonelle enheten. Dersom produktet i en miljødeklarasjon har en annen levetid enn dette, må utslippstallene justeres til å stemme med referanselevetiden som er bestemt for analysen.

Når levetid er justert, må utslippene angitt for de deklarererte enhetene regnes om til utslipp per funksjonell enhet i stedet. I Norge er en vanlig funksjonell enhet 1 m² ferdig konstruksjon med levetid 60 år (Byggforskserien 470.102).

Miljødeklarasjoner

Miljødeklarasjoner er altså ofte målet med en livsløpsvurdering, men de kan også fungere som en datakilde i analyser som inkluderer produktene de beskriver.

En miljødeklarasjon er et dokument som beskriver miljøegenskapene og utslippene til et produkt, et system eller en løsning. Deklarasjonene omtales ofte med den engelske forkortelsen EPD (environmental product declaration), og disse ordene er synonyme i denne oppgaven. En EPD skal være basert på regler fastsatt i NS-EN 15804, mens formatet til deklarasjonen beskrives i NS-EN 15942 (Byggforskserien 470.103). En EPD inneholder informasjon om hvilken deklarerert enhet som er brukt, totale utslipp innenfor de ulike kategoriene, samt utslipp i hver livsløpsfase. Det skal også inneholde en beskrivelse av produktet, hva det inneholder og hva som er bruksområdet. Det inkluderes en beskrivelse av hvordan analysen er gjennomført, ved bruk av hvilken database, hvilket program og hvilke antagelser som er gjort.

Andre datakilder

Det finnes også andre kilder som kan benyttes til å finne utslippsdata. Kildene kan i hovedsak deles inn i to hovedkategorier: generiske data og produktspesifikke data (Byggforskserien 470.102). Generiske data finner en som regel i vitenskapelige artikler eller fra databaser. Noen eksempler på databaser er: Ecoinvent, ELCD, PE-international. Det finnes også flere ulike analyseprogrammer som ofte er koblet opp mot databasene. Disse programmene kan benyttes til å gjennomføre en LCA eller til å hente ut generiske data fra databasen. Livsløpsvurderingsprogrammene SimaPro og Gabi er de vanligste programmene i Norge.

Produktspesifikke data får en ved direkte kontakt med produsenten eller fra allerede produserte miljødeklarasjoner.

Når det i denne oppgaven er valgt å vie størst oppmerksomhet til å beskrive EPD-er og mindre til de andre datakildene, er det fordi dataene som benyttes i all hovedsak er funnet i deklarasjoner. Det er derimot viktig å vite om de andre kildene som finnes, siden dataene i miljødeklarasjonene er hentet herfra.

Vurdering av EPD-data

Analyser som baserer seg på dataene fra miljødeklarasjoner er ofte enklere å gjennomføre, fordi en slipper det tidkrevende arbeidet det er å finne data og gjennomføre en analyse i et dataprogram. Det må sørges for at dataene er sammenlignbare og å kontroll på hvilke antagelser som ligger til grunn for analysene.

For å være garantert at dataene en benytter er sammenlignbare, burde deklarasjonene være basert på standardene NS-EN 15804 og NS-EN 15942 (Byggforskserien 470.103).

Bruksanvisningene for hvordan tolke EPD-er fra EPD Norge gir også anbefaling på hvilke livsløpsfaser som burde inngå for de ulike materialtypene. For at en sammenligning skal være mulig må en være nøye på hvilke livsløpsfaser deklarasjonene dekker (EPD-Norge).

Noen deklarasjoner gjelder for produkter som benyttes i Norge, men som er produsert i utlandet. I slike tilfeller vil det som oftest være nødvendig å øke transportavstanden fra produksjonssted til utsalgssted som er inkludert i deklarasjonen.

Ofte finnes det ikke miljødeklarasjoner på norske produkter. Utslippstallene for produktene kan da estimeres ved å benytte utenlandske EPD-er for lignende produkter. Det er imidlertid sannsynlig at utslippene er høyere for de utenlandske produktene, fordi energiforsyningen i Norge i stor grad er fornybar. Det er derfor viktig å være klar over at utslippstallene fra utenlandske miljødeklarasjoner ofte kan være høyere enn det de hadde vært for et tilsvarende norsk produkt.

Et annet problem som kan oppstå, er at en eller flere livsløpsfaser ikke er inkludert i deklarasjonene. I disse tilfellene skal det ifølge EPD-Norge benyttes gjennomsnittstall fra lignende produkter (EPD-Norge).

Livsløpsfaser

Analysen kan inkludere hele eller deler av livsløpet til det man skal vurdere. Livsløpet kan i hovedsak deles inn fire hovedfaser: produktfase, gjennomføringsfase (konstruksjons- og installasjonsfase), bruksstadium og livsløpets slutt (Standard Norge, 2006).

Ifølge Standard Norge er de fire hovedfasene igjen delt opp i seksten livsløpsfaser som vist i Tabell 8 (Standard Norge, 2011). Siden miljødeklarasjonene skal være basert på denne standarden er det også disse fasene som er inkludert i EPD-ene som er brukt i oppgaven.

Tabell 8: Oversikt over livsløpsfaser (Standard Norge, 2011)

Hovedfaser	Underfaser	
Produktfase	A1	Tilførsel av råmateriale (Råvareuttak)
	A2	Transport
	A3	Tilvirkning
Gjennomføringsfase	A4	Transport
	A5	Byggefase
Bruksstadium	B1	Monterte produkter i bruk
	B2	Vedlikehold
	B3	Reparasjon
	B4	Utskifting
	B5	Renovering
	B6	Driftsmessig energibruk
	B7	Driftsmessig vannbruk
Livsløpets slutt	C1	Riving
	C2	Transport
	C3	Håndtering av avfall
	C4	Avhending
Fordeler og ulemper utenfor systemgrensene	D	Gjenbruk gjenvinning, resirkuleringspotensial

I miljødeklarasjoner inkluderes det ofte en siste fase som angir fordeler og ulemper utenfor systemgrensene (D). Dette kan være gunstige bidrag fra gjenbruk eller resirkulering. Denne fasen er imidlertid definert å være utenfor byggets system og skal ikke være med i en livsløpsvurdering. Denne fasen er derimot bare ment som en informasjonsmodul som skal øke åpenheten (Fufa, Schlanbusch, Sørnes, Inman, & Andresen, 2016).

Gjøres det en vurdering av hele livsløpet brukes ofte betegnelsen fra «vugge til grav» for å beskrive omfanget til analysen. Det gjøres derimot også mange analyser av deler av livsløpet. En vanlig avgrensning er å se på det man kaller «vugge til port». Her fokuserer man bare på livsløpet frem til produktene ankommer byggeplass.

Miljøpåvirkningskategorier

En livsløpsvurdering tar som regel for seg flere ulike effektkategorier for miljøpåvirkning. I Byggforskserien nevnes de følgende kategoriene (Byggforskserien 470.101)

GWP – Global warming potential, potensiale for bidrag til global oppvarming

ODP – Ozone depletion potential, nedbrytning av ozonlaget

AP – Acidification potential, potensial for forsuring av jord og grunnvann

EP – Eutrophication potential (potensial for overgjødning)

POCP – Formation potential of photochemical oxidants (potensial for dannelse av ozon i troposfæren)

ADPE – Abiotic depletion potential for fossil resources (Potensiell utarming av abiotiske ressurser)

Det finnes flere andre miljøpåvirkningskategorier som ikke er gjengitt her.

3.4.2 Fremgangsmåte

Følgende fremgangsmåte ble benyttet i analysen.

- Bestemme hensikt og mål med analysen
- Valg av materialer og oppbygning
- Datainnsamling
- Vurdering av dataene
- Bestemme avgrensninger og kriterier for analysen
- Utrekning
- Oppsummering og tolkning

I de påfølgende underkapitlene følger en beskrivelse av hver av stegene og de spesifikke valgene og antagelsene som ble gjort underveis.

3.4.3 Oppbygning og materialvalg

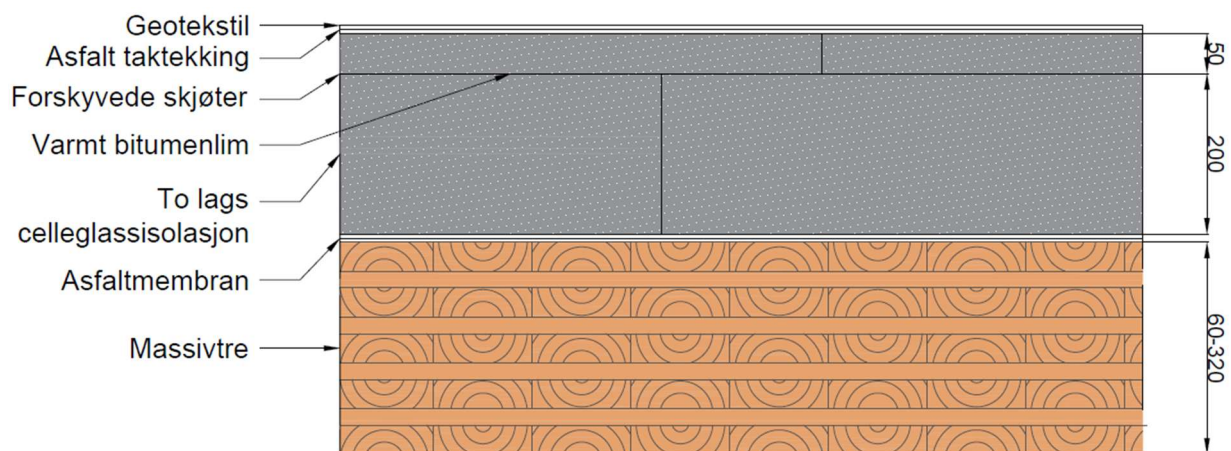
Det ble vurdert som viktig å finne så realistiske takoppbygninger som mulig, siden resultatet av livsløpsvurderingen er svært avhengig av oppbygningen og materialene som velges. En betydelig mengde arbeid ble derfor lagt ned for å finne de mest plausible og

hensiktsmessige konstruksjonene. I de påfølgende delkapitlene følger en beskrivelse av hver av oppbygningene samt en egenprodusert tegning av hver oppbygning.

Det ble tatt hensyn til resultatene fra simuleringene, tilbakemeldinger fra ulike aktører i næringen, samarbeidspartnere og funnene i litteratur- og dokumentstudiene når oppbygning skulle velges. Det har blitt prioritert å velge de oppbygningene som er mest sannsynlig og hensiktsmessig i aktive tak med massivtre som bærende konstruksjon, heller enn de produktene med lavest bidrag til global oppvarming. Når det er sagt, har valget falt ned på produktene med lavest bidrag til GWP der valget har stått mellom to produkter med tilsvarende egenskaper.

Celleglasskonstruksjon

Celleglasskonstruksjonen som er benyttet i miljøanalysen er vist i vist i Figur 21 under.



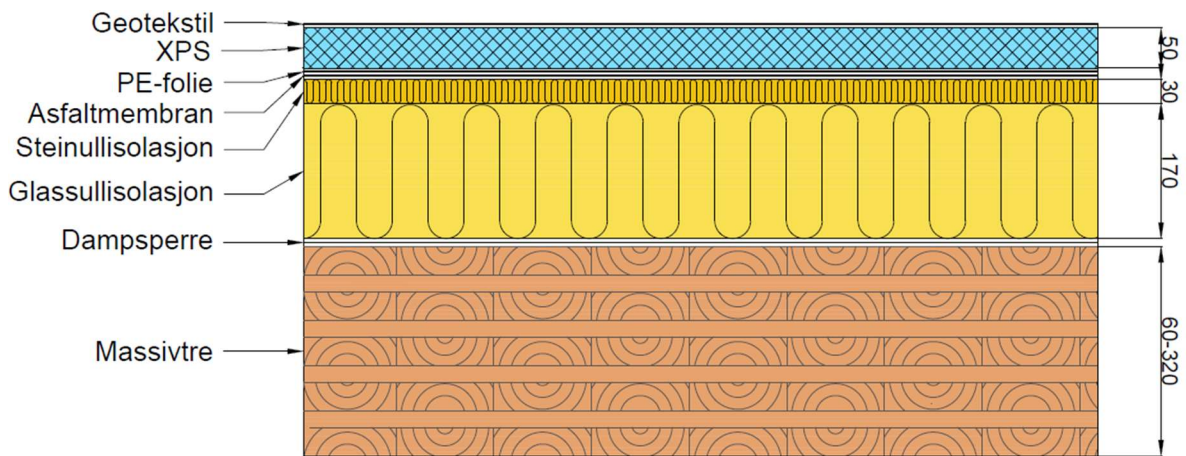
Figur 21: Oppbygning 1 - Celleglasskonstruksjon

Konstruksjonen er basert på dokumentstudien, intervjuene og e-postkorrespondansen som er beskrevet i kapittel 3.3. Valget av denne konstruksjonen er i stor grad basert på oppbygninger presentert av Foamglas for prosjekter de selv har vært med på. Disse oppbygningene er vist i Figur 38 og Figur 39 i kapittel 4.2. Det er imidlertid gjort noen endringer på disse. Bærekonstruksjonen er endret til massivtre, og det er benyttet en ett-lags asphaltmembran i stedet for en to-lags. Membranen har heller ikke dokumentert rotbestandighet, som det er anbefalt fra produsenten. Det er derfor plassert en rotsperre i form av en geotekstil av polypropylen i overkant av membranen.

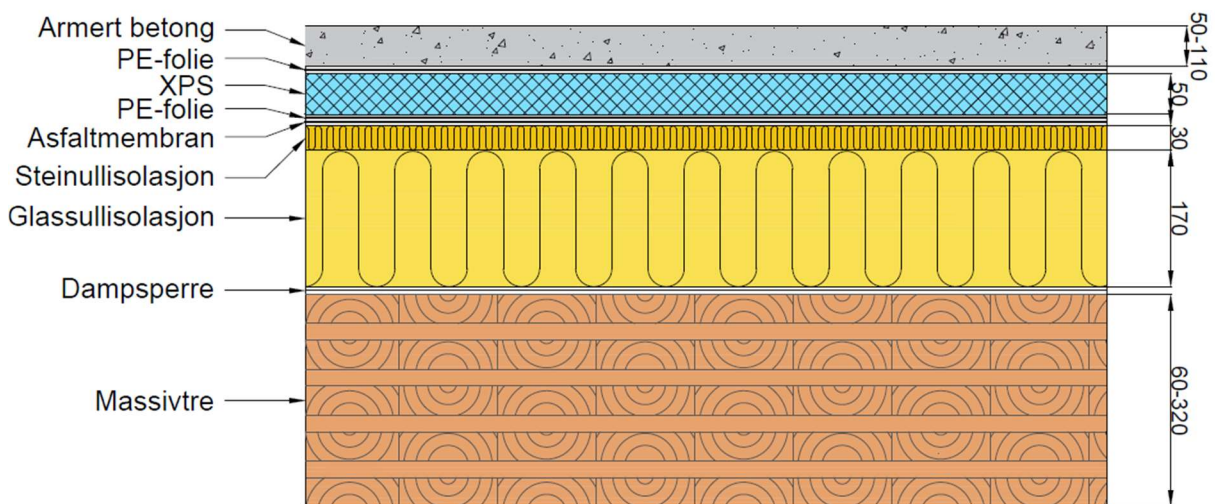
Alternative konstruksjoner

De seks konstruksjonene med alternative isolasjonsmaterialer er vist i figurene under. Det er fire mineralullkonstruksjoner derav to med glassull og to med steinull, og to konstruksjoner med plastisolasjon (EPS). Det er inkludert en løsning med betongpåstøp og en uten for hvert av isolasjonsmaterialene. Alle konstruksjonene har et

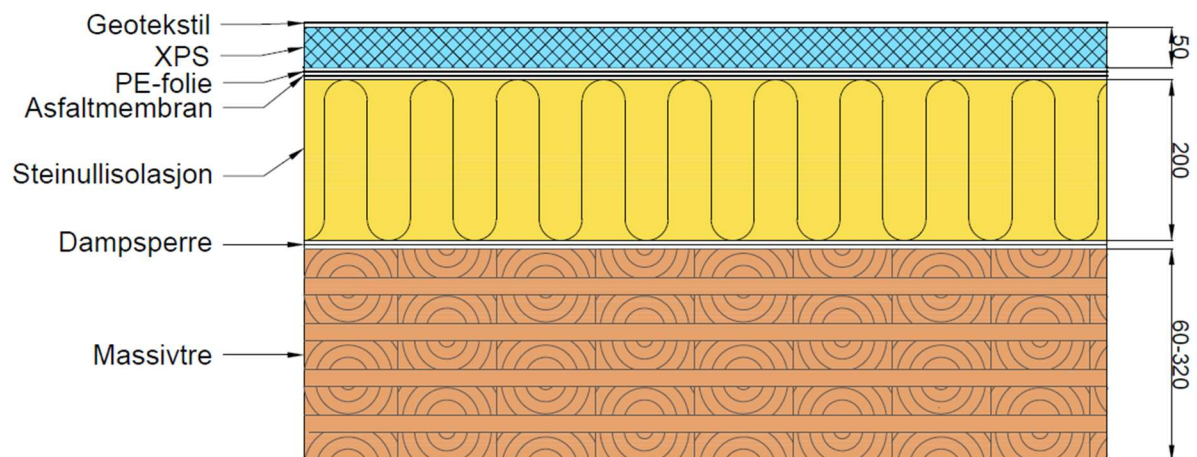
beskyttelseslag av XPS og PE-folier. I konstruksjonene uten betong, er den øverste PE-folien byttet ut med en rotsperre i form av en geotekstil av polypropylen.



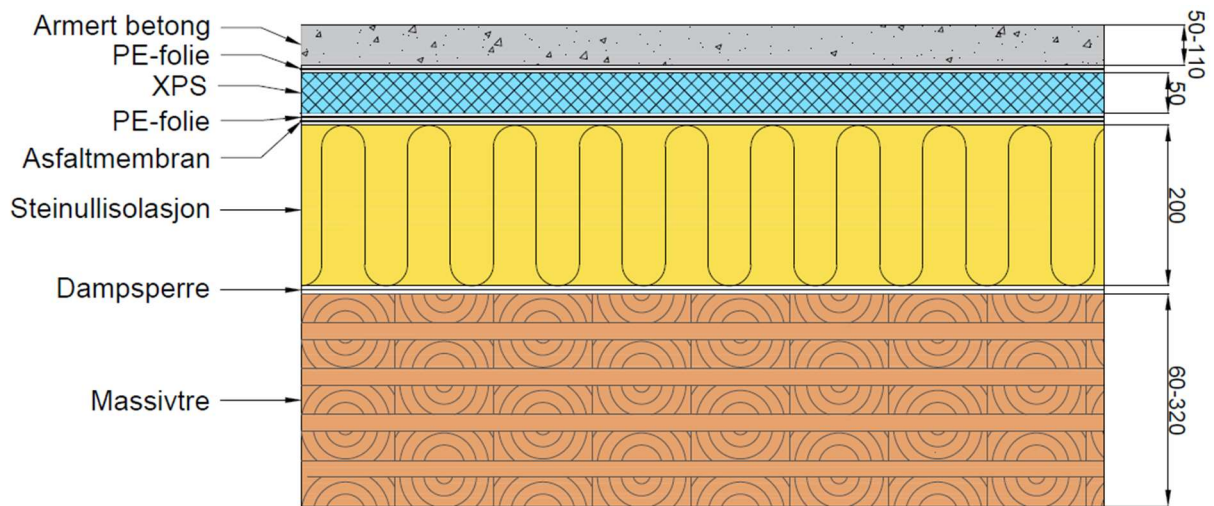
Figur 22: Oppbygning 2 - Glassull uten betongpåstøp



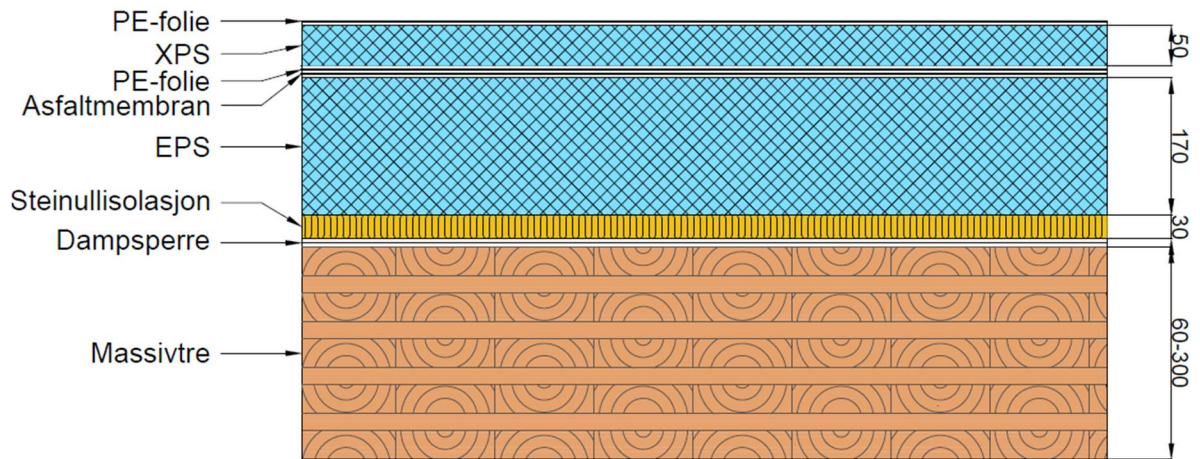
Figur 23: Oppbygning 3 - Glassull med betongpåstøp



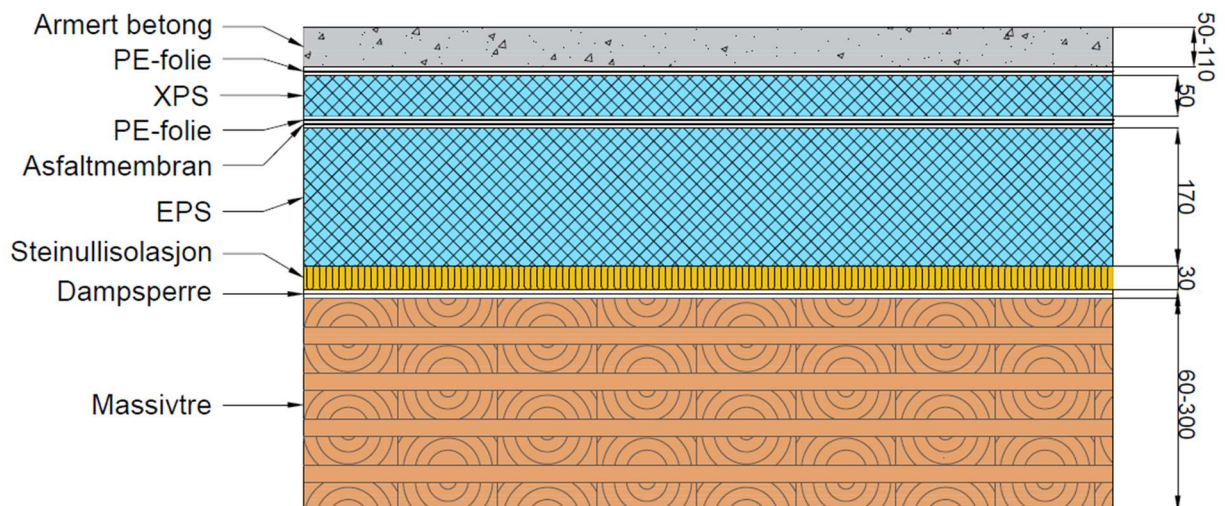
Figur 24: Oppbygning 4 - Steinull uten betongpåstøp



Figur 25: Oppbygning 5 - Steinull med betongpåstøp



Figur 26: Oppbygning 6 - EPS uten betongpåstøp



Figur 27: Oppbygning 7 - EPS med betongpåstøp

Konstruksjonene er i stor grad inspirert av konstruksjonene som er beskrevet i prosjektrapport 104 (Noreng, et al., 2012) og Sintef Byggforsk sitt blad om terrasser

med beplantning (Byggforskserien 525.306) (se kapittel 2.1.1 og 2.2.4). I tillegg er det lagt vekt på intervjuene og e-postkorrespondansen når oppbygningene har blitt valgt.

Valg av materialer og mengder

Det er valgt en glassullisolasjon med trykkfasthet på 40 kPa. Dette er lavere enn anbefalingen på 60 kPa som Sintef har for trykkfasthet på isolasjonen i intensive grønne tak (Byggforskserien 525.306). Resultatene fra kapittel 4.2 viste imidlertid at det i visse tilfeller er greit å benytte isolasjon med lavere trykkfasthet enn denne anbefalingen. Det er likevel valgt å legge inn et trykkfast topplag av steinull (80 kPa) i glassullkonstruksjonene for å bidra til å fordele punktlaster.

Steinullisolasjonen har en trykkfasthet på 60 kPa, mens det på EPS-isolasjonen er valgt en trykkfasthet på 150 kPa. Dette er mye høyere enn kravet, men tatt i betraktning at slik isolasjon har en langtidsfasthet på 45 kPa ble dette vurdert som hensiktsmessig i det intensive grønne taket (Sundolitt, 2020).

Det er valgt å inkludere en plastisolasjon selv om en i utgangspunktet ikke kan benytte brennbar isolasjon i massivtretak. Når det likevel er gjort det, er det fordi løsningen som er foreslått kanskje kan brukes så lenge det blir gjort en brannteknisk analyse. Det er valgt å legge inn et ubrennbart mineralullsikt under EPS-isolasjonen for å tilfredsstille brannkravet om ubrennbart materiale på begge sider av isolasjonen. Dette er en preakseptert løsning for korrugerte ståplater, men ikke for bærekonstruksjon i trevirke (Takprodusentenes forskningsgruppe, 2019). Det understrekes derfor at denne løsningen i utgangspunktet ikke er akseptert og dermed er noe usikker. Det sees uansett på som interessant å inkludere konstruksjoner med EPS for å sammenligne miljøegenskapene til EPS med celleglassisolasjon.

Tykkelsen på isolasjonssjiktene ble bestemt basert på U-verdikravet for tak fra energitiltaksmetoden TEK17 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Beregningen av tykkelsene er vist i vedlegg 3. Tykkelsen på beskyttelseslaget i XPS og betongpåstøpen ble begge satt til 50 mm og med et armeringsnett av typen K189 \varnothing 6mm basert på anbefalinger fra TPF (Noreng, 2017).

Geotekstilen som er valgt, er basert på en generisk EPD av en geotekstil av polypropylen med vekt på 300 g/m² (One Click LCA, 2015). Denne ble valgt ettersom det var vanskelig å finne noen norske deklarasjoner på slike produkter. Deklarasjonen står på fransk, og dette skaper noe usikkerhet knyttet til om produktet har det tenkte bruksområdet. Når det er sagt stemmer vekten bra med norske produkter, og polypropylen er et vanlig materiale i slike produkter. I tillegg utgjør geotekstilen en liten andel av de totale utslippene og vil derfor ikke ha stor innvirkning på de totale resultatene.

Utslippene fra asfaltlimet er basert på en generisk miljødeklarasjon som har en deklareret enhet på utslipp per kg (One Click LCA, 2015). Ifølge de tekniske databladene til Foamglas brukes det fra 5-7 kg/m² varmt bitumen per lag med celleglass. Kapittel 4.2 viste imidlertid en mer spesifikk anbefaling er 4 kg/m² varmt bitumen per lag med celleglass og 2 kg/m² per tettesjikt som limes. Det regnes med at den nederste membranen spikres, og dermed blir totalt varmt bitumen lik $4+4+2=10$ kg/m²

En forenkling som er gjort i studien er at det ikke er tatt hensyn til bidraget til GWP fra spikrene som brukes til å feste den nederste membranen til massivtredekket.

3.4.4 Datainnsamling

Livsløpsvurderingen ble i stor grad utført med data hentet fra EPD-er fra produsenter, der man kan hente ut utslippsdataene for produktene direkte. Mange av produktene ble valgt nettopp fordi EPD var tilgjengelig for disse produktene, siden dette ville gjøre utslippsdataen sikrere, og øke kvaliteten på analysen. Det var likevel tilfeller der EPD ikke var tilgjengelig. I disse tilfellene, ble programmet «OneClickLCA» benyttet for å finne utslippsdata for materialene som ble brukt. Dette gjaldt varmt bitumenlim og geotekstil.

I noen tilfeller er det valgt utenlandske produkter siden det ikke er funnet tilsvarende norske produkter med miljødeklarasjon. Dette ses på som konservativt siden det som oftest vil være større utslipp tilknyttet utenlandske produkter gjennom lengre transportavstander og mindre miljøvennlige energikilder. Det understrekes derfor at utslippstallene i denne analysen bare er et estimat, og at de faktiske utslippene dersom en velger norske produkter i stedet for utenlandske, mest sannsynlig er lavere.

3.4.5 Usikkerhet

Siden det ofte er vanskelig å finne helt nøyaktig informasjon til analysen, vil det alltid være behov for å gjøre nødvendige antagelser i en livsløpsvurdering. Dette gjør at nøyaktigheten til analysen i stor grad er avhengig av personen som utfører den, og dette representerer en usikkerhet. Antagelser om hvilke faser som skal være med, type energiforsyning, type transportmidler og transportavstander mellom de ulike leddene av produksjonen er eksempler på kilder til usikkerhet i en livsløpsvurdering. Ofte vil man utelate faser, prosesser eller materialer med bakgrunn i en vurdering om at det ikke har stor innvirkning på sluttresultatet. Dette kan være dumt fordi en antar at det man utelater har lite innvirkning før en vet det faktiske bidraget (Byggforskserien 470.102). Et eksempel på dette, kan være materialer som utgjør en liten del av den totale massen i en konstruksjon. I et slikt tilfelle kan det være lette å se bort ifra dette materialet, siden andelen er så liten. Dette materialet kan derimot ha store utslippstall per kilo, som kan gjøre at bidraget ikke blir like ubetydelig som først antatt. Generelt er prosessene ofte mer komplekse enn de man kan se for seg på forhånd, og det er derfor vanskelig å spå bidraget til en prosess eller et materiale før man har gjort en analyse av det (Byggforskserien 470.102).

Analysen er imidlertid ikke bare avhengig av antagelser som blir gjort av den som utfører den, men også av andre aktører som er involvert i livsløpet til produktene en ser på. Blant annet vil en alltid være helt avhengig av tall og informasjon fra produsenter, leverandører og andre aktører. Disse aktørene vil også ha gjort egne valg gjennom sine analyser og dette bidrar til å øke usikkerheten.

3.4.6 Avgrensninger og kriterier for analysen

Funksjonell enhet og levetid

Det ble valgt å sette funksjonell enhet til 1 m² takareal med 60 års levetid. Dette er i tråd med både Sintef Byggforsk, som angir dette som den vanligste funksjonelle enheten for hele bygninger (Byggforskserien 470.102). Andre kilder støtter opp under denne funksjonelle enheten som den mest vanlige for hele bygninger (Fufa, Schlanbusch, Sørnes, Inman, & Andresen, 2016). Selv om analysen ikke tar for seg en hel bygning vurderes de likevel som den mest passende referanseenheten for en takkonstruksjon.

Isolasjonsproduktene fra Glava (XPS og Glava Robust Lamell) har miljødeklarasjoner som gjelder for mange ulike isolasjonsprodukter. Det vil si at utslippstallene er angitt for et basisprodukt med en gitt tykkelse densitet. For å få utslippstallene til andre produkter er det derfor angitt skaleringsfaktorer som skal benyttes til å skalere opp utslippstallene.

Som nevnt er levetiden satt til 60 år for konstruksjonen. Dette samsvarer bra med de fleste produktene i konstruksjonene, siden de fleste har en oppgitt levetid på minst 60 år. Steinullisolasjonene har imidlertid en levetid på 50 år. Basert på metodene angitt i EPD-Norge sine bruksanvisninger er det derfor benyttet en levetidsfaktor for å justere til riktig levetid for disse produktene (EPD-Norge). Levetidsfaktorene gitt av følgende formel:

$$\text{Levetidsfaktor} = \frac{60 \text{ år}}{\text{angitt levetid}}$$

Basert på de deklarererte enhetene, skaleringsfaktorene, levetidsfaktorene og mengdene av de ulike materialene er det beregnet en omregningsfaktor for hvert produkt som er vist i vedlegg 6. Denne er benyttet til å justere utslippstallene fra miljødeklarasjonene.

Miljøpåvirkningskategori

Klimaendringene blir av miljødirektoratet sett på som den største miljøutfordringen vi står overfor (Miljødirektoratet, 2013). Forfatterne har også inntrykk av at det er global oppvarming utbyggere og andre i næringen er mest opptatt av når de skal bygge miljøvennlig. I denne oppgaven ble derfor potensiale for bidrag til global oppvarming (GWP) sett på som den mest interessante miljøpåvirkningskategorien. Resultatene i denne analysen er derfor bare basert på utslippene tilknyttet GWP og ingen av de andre kategoriene.

Livsløpsfaser

Det ble i størst mulig grad forsøkt å gjøre en analyse på hele livsløpet til produktene, altså «fra vugge til grav».

Det ble utført en gjennomgang av en stor mengde miljødeklarasjoner for betong i databasen til EPD-Norge. Ingen av disse inkluderte livsløpsfaser etter fase A4 (transport til byggeplass). Dette vil nødvendigvis redusere det totale bidraget til GWP fra betongen. Det finnes imidlertid forskning som har pekt på at disse fasene uansett står for en liten

del av de totale utslippene og at det dermed ikke er vesentlig for sluttresultatet (Nordby, Solli, & Dahlstrøm, 2015). Av denne årsaken og mangelen på data ble det besluttet å se bort ifra disse fasene for betongen.

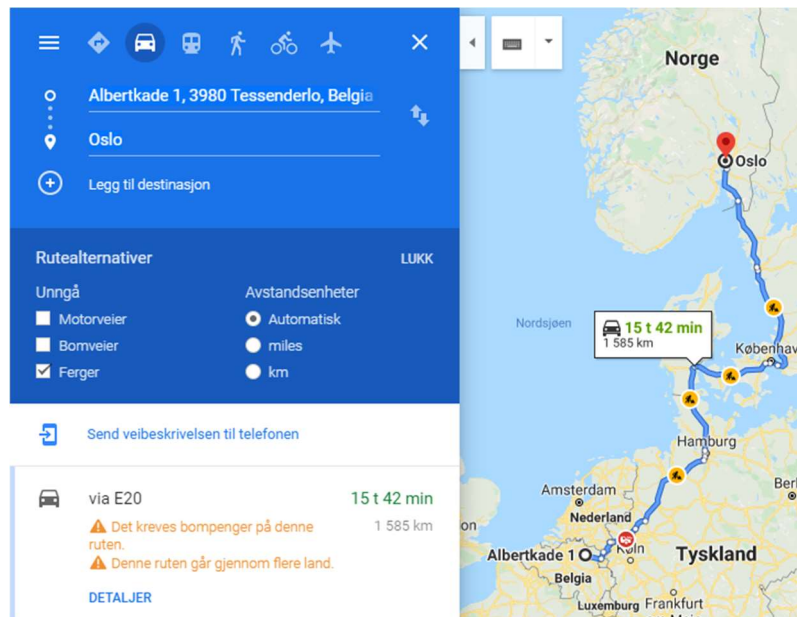
En annen fase det var knyttet usikkerhet til var rehabiliteringsfasen B4. I miljødelrasjonen til asfaltmembranen er det regnet med en rehabiliteringsperiode på 30 år. Dette gjør at utslippstallene fra rehabilitering er relativt høyt for dette produktet. Ettersom membranen ligger så godt beskyttet i grønne tak, er det derimot vanlig å regne med at levetiden til membranen dobles (Chenani, Lehvavirta, & Hakkinen, 2014). I tidligere studier har det også blitt antatt at ingen av sjiktene under vekstlaget skiftes ut i løpet av levetiden til konstruksjonen (Chenani, Lehvavirta, & Hakkinen, 2014). Det er derfor valgt å se bort ifra GWP-bidraget fra rehabilitering (fase B4) for asfaltmembranen.

Transport

Det ble også gjort en vurdering av hvilke transportavstander som lå til grunn for utslippstallene. For produktene som produseres i Norge, er det vanskelig vurdere de nøyaktige transportavstandene noe bedre enn de som er antatt i miljødeklarasjonene, fordi det ikke er bestemt en spesifikk adresse for byggeplassen. De antatte transportavstandene for de norske produktene er derfor ikke endret. For produkter som produseres i utlandet er imidlertid avstanden som oppgis ofte ikke korrigert for at varene skal sendes fra produksjonssted og til Norge. Dette kan føre til at en underestimerer bidraget fra transportfasen A4. I disse tilfellene er det derfor gjort en justering

Noen av disse utenlandske produktene har egne miljødeklarasjoner utgitt av EPD-Norge, og det er her angitt hvilke transportavstander som må regnes med til Norge. I disse tilfellene er det antatt at de ekstra avstandene som er angitt i EPD-ene er riktig, og utslippstallene er dermed justert for disse transportavstandene. Dette gjelder blant annet steinullisolasjonen fra Paroc som produseres i Sverige og Finland, og asfaltmembranen som er en generisk EPD basert på mange europeiske membraner.

Celleglassisolasjonen har imidlertid en EPD som er produsert i utlandet, og ingen EPD utgitt av EPD-Norge. Det er derfor ikke angitt hvilke transportavstander en må regne med når det skal fraktes til Norge. For å estimere den virkelige transportavstanden for produktet er Google maps benyttet. Det er antatt at produktet fraktes fra produksjonssted for Foamglas i Belgia til Oslo og at hele transporten foregår med lastebil uten ferjer. Ruten er vist i Figur 28 under.



Figur 28: Transportdistanse fra produksjonssted for Foamglas i Belgia til Oslo (Google, 2020)

I de tilfellene utslippstallene fra transportfasen A4 er justert, er det tatt utgangspunkt i metoden som er angitt av EPD-Norge. Denne går ut på å finne utslipp per km ved å dividere utslippstallet med angitt transportavstand før dette tallet multipliseres med den estimerte antatte transportavstanden (EPD-Norge, Bruksanvisninger i hvordan tolke EPD'er - Takteking). I denne oppgaven er det valgt å finne en transportavstandsfaktor som så multipliseres med utslippstallene fra A4. Dette gir det samme resultatet, men forfatterne så på denne løsningen som ryddigere.

$$\text{Transportavstandsfaktor} = \frac{\text{Antatt transportavstand [km]}}{\text{Angitt transportavstand [km]}}$$

Utrekning

De angitte utslippene fra de ulike produktene ble oppsummert i et regneark som er å finne i vedlegg 5.

Utslippene for hvert produkt ble deretter multiplisert med omregningsfaktor og levetidsfaktor, samt transportavstandsfaktor for utslippene i fase A4 (vedlegg 6). Dette ga omregnede totale utslipp for hvert produkt per m² takareal over en levetid på 60 år.

Til slutt ble de totale utslippene fra hver oppbygning regnet ut basert på de omregnede totale utslippene for hver del av konstruksjonene (vedlegg 4).

4 Resultater

4.1 Resultater fra simuleringer

De følgende avsnittene går gjennom de viktigste resultatene fra simuleringene. Det blir først vist en kommer en oversikt over resultatene, før det blir gjort en gjennomgang av de ulike oppbygningene.

Tabell 9 er en utvidelse av Tabell 6 fra kapittel 3.2.1. Tabellen viser resultatene av muggberegningene av de ulike beregningsvariantene i form av beregnet muggindeks og en fargekode. Betydningen av muggindeksverdier er beskrevet i kapittel 2.6.2. Nederste rad i tabellen viser signallys-vurderingen gitt av WUFI-VTT. Fargene grønt, gult og rødt tilsvarer henholdsvis muggindeks fra 0-2, 2-3 og 3-6. Tabell 10 viser fuktighetsnivået i massivtreelementet ved start og slutt, samt prosentvis endring.

Vedlegg 1 viser resultater for samtlige beregningsvarianter. Dette omfatter muggindeks, totalt fuktinnhold i massivtre lag og temperatur-relativ fuktighet gjennom beregningsperioden for alle variantene.

Tabell 9: Oversikt over varianter og beregningsresultater

Parametre	Variabler	Beregningsvarianter																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Oppbygning	Grønt tak, celleglass, massivtre	x	x	x	x	x	x													x	x	x	x	x	x	x
	Grønt tak, XPS, mineralull, uten sperresjikt, massivtre								x	x	x	x	x													
	Grønt tak, XPS, mineralull, dampsperre, massivtre													x	x	x	x	x	x							
Tykkelse massivtre	CLT 160 mm	x	x	x				x	x	x				x	x	x				x		x		x		
	CLT 320 mm				x	x	x				x	x	x				x	x	x	x		x		x	x	
Byggfukt	Lavt (12%)	x			x			x			x			x			x									
	Middels (15%)		x			x			x			x			x				x							x
	Høyt (20%)			x			x			x			x			x				x						
	Middels (18%)																				x	x				
	Middels (17%)																						x	x		
	Middels (16%)																								x	x
Inneklima	Normal fuktbelastning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Høy fuktbelastning																									x
Muggindeks		0,0	0,5	4,3	0,0	1,2	4,4	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,4	0,0	0,3	4,1	0,0	1,0	4,3	3,4	3,9	2,5	3,3	1,4	2,4	1,3
Vurdering		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabell 10: Oversikt over fuktighetsnivå i massivtreelementet for beregningsvariantene

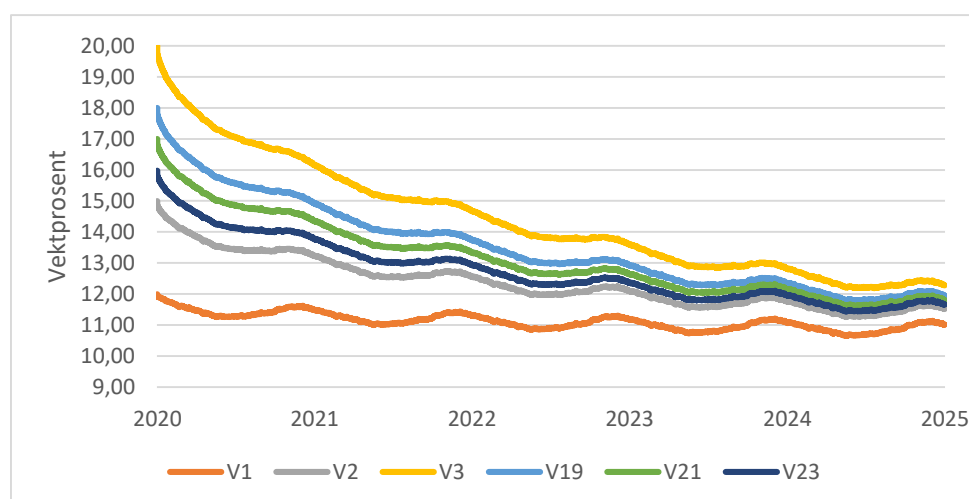
	Beregningsvarianter																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Startfukt [vektprosent]	12	15	20	12	15	20	12	15	20	12	15	20	12	15	20	12	15	20	18	18	17	17	16	16	15
Fukt etter fem år [vektprosent]	11,0	11,5	12,3	11,5	13,2	16,0	11,0	11,5	11,5	11,4	12,1	12,9	10,9	11,4	12,1	11,5	13,1	15,8	12,0	14,8	11,8	14,3	11,7	13,7	13,6
Prosentvis endring	-8	-23	-39	-4	-12	-20	-9	-23	-42	-5	-19	-36	-9	-24	-40	-4	-13	-21	-34	-18	-30	-16	-27	-14	-9

4.1.1 Oppbygning med celleglass

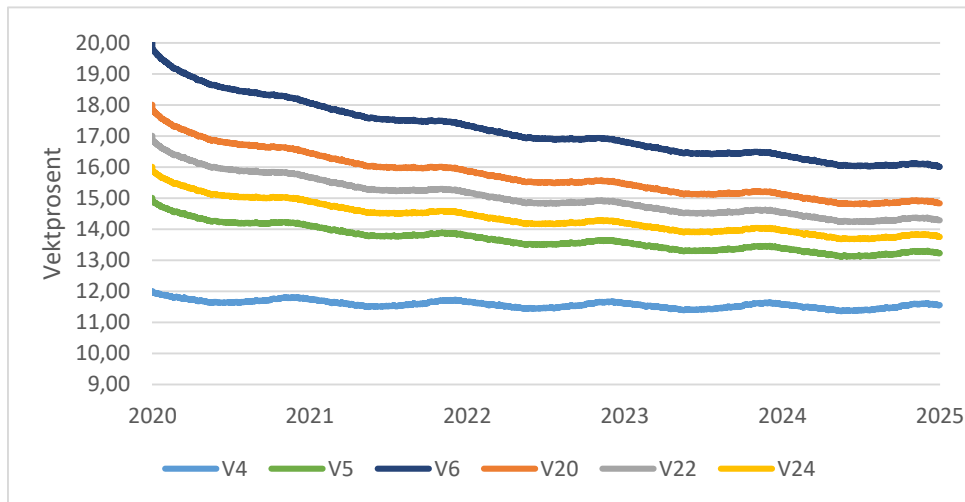
Oppbygningene med celleglass er beregnet i beregningsvariant V1-V6 og V19-V25 og resultatene er vist grafisk i figurene nedenfor. Figurene viser utviklingen i vanninnhold i massivtreelementet over fem år med ulik byggfukt ved lukking av konstruksjonen. Figur 29 og Figur 30 viser beregningene med KLT-tykkelse på henholdsvis 160 mm og 320 mm.

Vanninnholdet i alle variantene minsker i løpet av beregningsperioden på fem år. Vanninnholdet i konstruksjonene med 160 mm massivtre nærmer seg alle en likevektsfuktighet på omtrent 12 vektprosent mot slutten av beregningsperioden. Dette gjelder også V3, som starter med 20 vektprosent og ender på 12,3 vektprosent. Vanninnholdet minsker også for alle variantene med massivtretykkelse på 320 mm, men ikke i like stor grad. V6, som starter med 20 vektprosent, ender på 16 vektprosent etter fem år.

Det er tydelig at uttørkingen går saktere for de tykke KLT-elementene. Fra Tabell 10 kan en se at celleglasskonstruksjoner med dobbel tykkelse og ellers like betingelser, opplever halvparten så mye uttørking som de tynnere elementene. Eksempelvis går V6 ned med 20 prosent av opprinnelig vanninnhold, mens V3 mister 39 prosent.



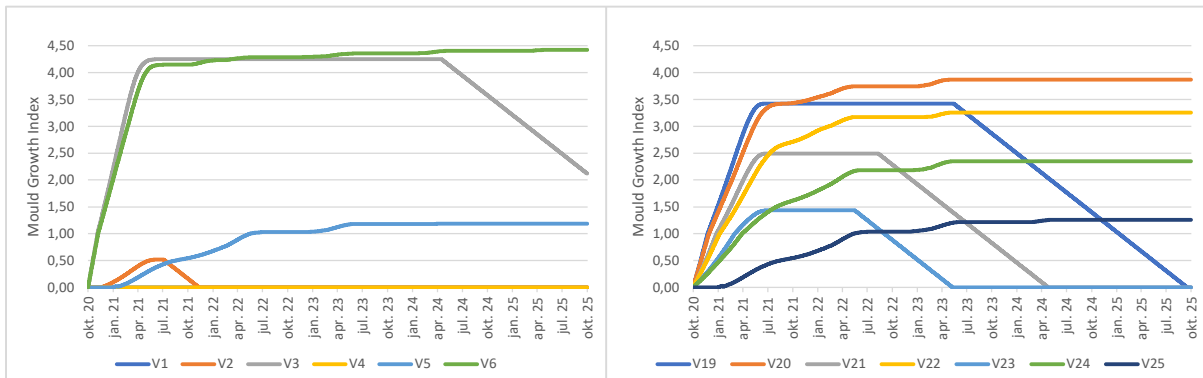
Figur 29: Vanninnhold i KLT (celleglasskonstruksjon med 160 mm massivtre)



Figur 30: Vanninnhold i KLT (celleglasskonstruksjon med 320 mm massivtre)

Figur 31 viser muggindeks for beregningsvariantene med celleglass. Variantene med 20 vektprosent byggfukt (V3 og V6) fikk muggindeksverdi på over fire. Videre ser en at også 18 og 17 vektprosent også gir muggvekst, (hhv. V19-V20 og V21-V22). 16 vektprosent gir muggindeks på omtrent 1,4 og 2,4 med massivtretykkelse på 160 og 320 mm.

Fra figuren ser en også at beregningsvariantene med likt byggfuktnivå, men ulike tykkelse følger hverandre en stund. Etter et halvt års tid flater variantene med 160 mm ut, før de etter hvert får reduksjon av muggindeksnivået. Variantene med 320 mm KLT stiger litt videre, før de flater ut. Muggveksten vil altså minske for de tynneste massivtreelementene, mens den vil vare ut beregningsperioden for de tykkeste.



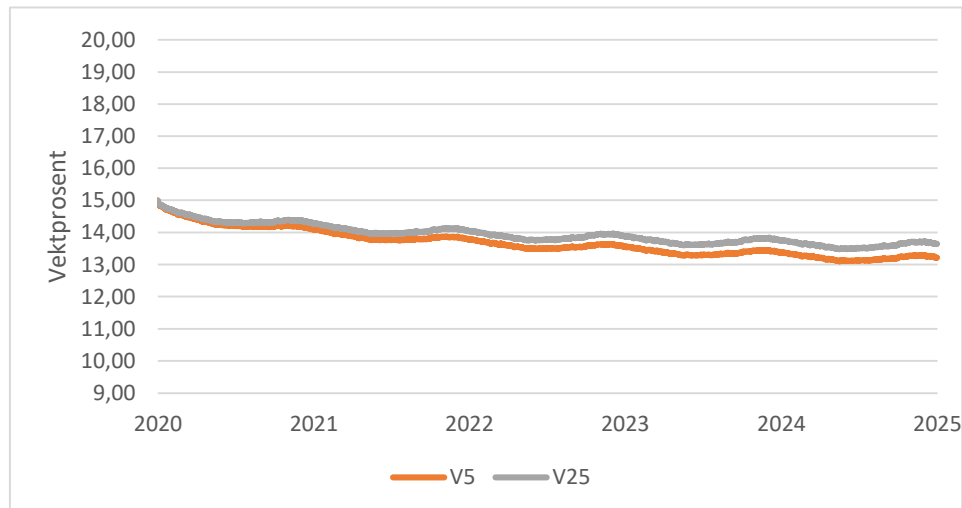
Figur 31: Muggindeks V1-V6 og V19-V25

Vurdering av betydning av inneklime

Effekten fuktbelastningen fra inneklime ble ikke undersøkt nøye. Alle beregningsvariantene har normal fuktbelastning, bortsett fra V25 som har høy

fuktbelastning. V25 har samme oppbygning og startbetingelser som V5, men innvendig fuktbelastning er satt til høyt.

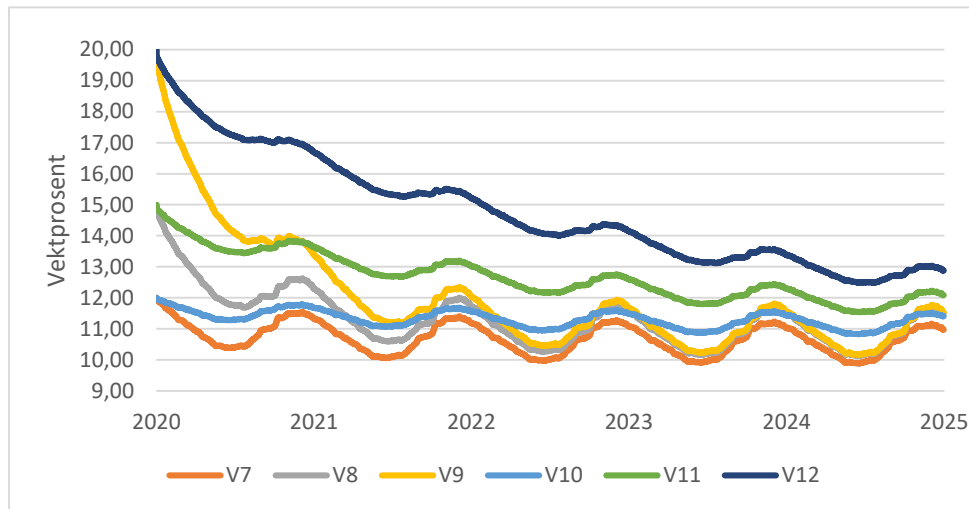
Fra Figur 31 ser man at muggindeksen for V25 og V5 mer eller mindre følger hverandre. Figur 32 viser at vanninnholdet for de to variantene er ganske likt gjennom beregningsperioden. V5 ender opp med 13,2 vektprosent, mens V25 ender opp med 13,6 vektprosent. Det virker med andre ord som at inneklimate har begrenset innvirkning på uttørking og muggvekst.



Figur 32: Vanninnhold i KLT (celleglasskonstruksjon med normal (V5) og høy fuktbelastning (V25))

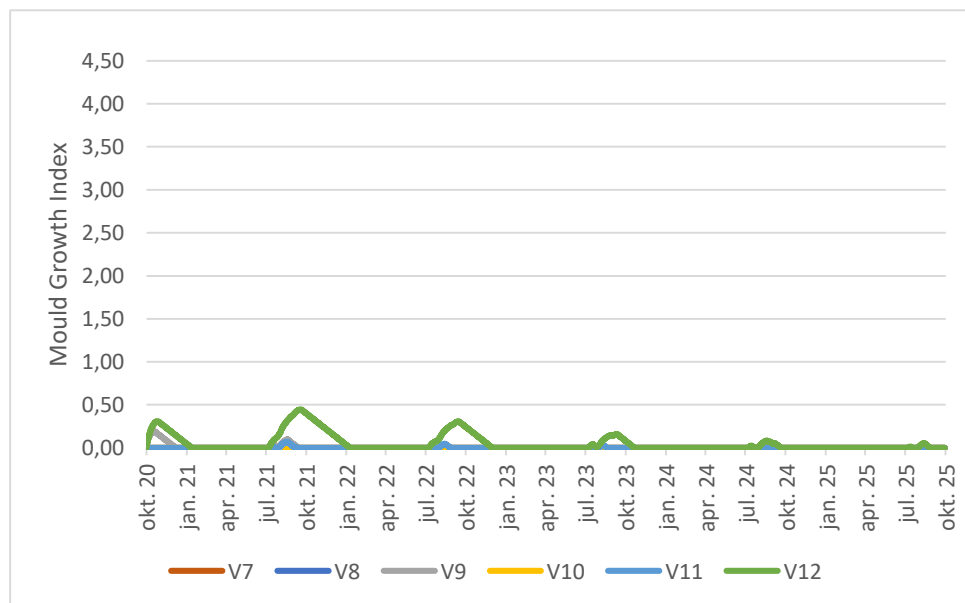
4.1.2 Oppbygning med mineralull uten sperresjikt

Figur 33 viser utviklingen i vanninnhold for konstruksjonen uten sperresjikt. Variantene med 160 mm massivtre (V7, V8 og V9) tørker ut hurtig det første året, spesielt fra oktober til april/mai. Uttørkingen går saktere for konstruksjonene med 320 mm massivtre (V10-V12). Variantene V8 og V9 (med 160 mm KLT og startfuktighet på 20 % og 15 %) tar igjen V11 og V10 (med 320 mm KLT og startfuktighet på 15 % og 12 %) etter omtrent ett år.



Figur 33: Vanninnhold i KLT (mineralullkonstruksjon uten sperresjikt)

Beregningene viser at det ikke vil oppstå muggvekst for noen av konstruksjonsvariantene med mineralull uten sperresjikt. Dette kan sees i Figur 34. Selv varianten med 320 mm KLT og 20 % byggfukt (V12) vil maksimalt få muggindeks på 0,44.



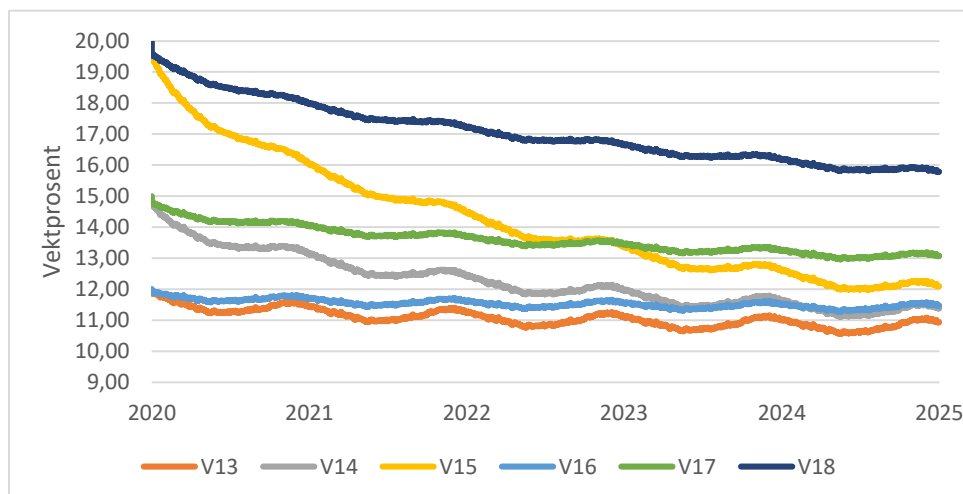
Figur 34: Muggindeks V7-V12

4.1.3 Oppbygning med mineralull og dampsperre

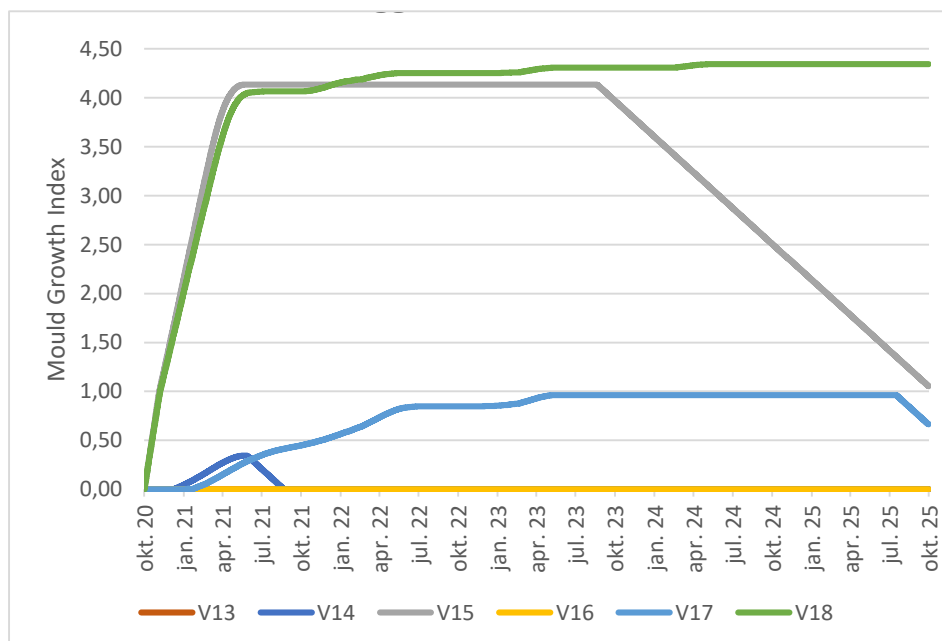
Figur 35 viser utviklingen i vanninnhold for konstruksjonen med dampsperre. V13-V15 viser beregningene for en KLT-tykkelse på 160 mm og V16-V18 viser for KLT-tykkelse på 320 mm. Vanninnholdet i alle variantene minsker i løpet av beregningsperioden på fem år.

Vanninnholdet i konstruksjonene med 160 mm massivtre nærmer seg alle en likevektsfuktighet på omtrent 12 vektprosent mot slutten av beregningsperioden.

Vanninnholdet minsker også for alle variantene med massivtretykkelse på 320 mm, men ikke i like stor grad. V18, som starter med 20 vektprosent, ender på i underkant av 16 vektprosent etter fem år.



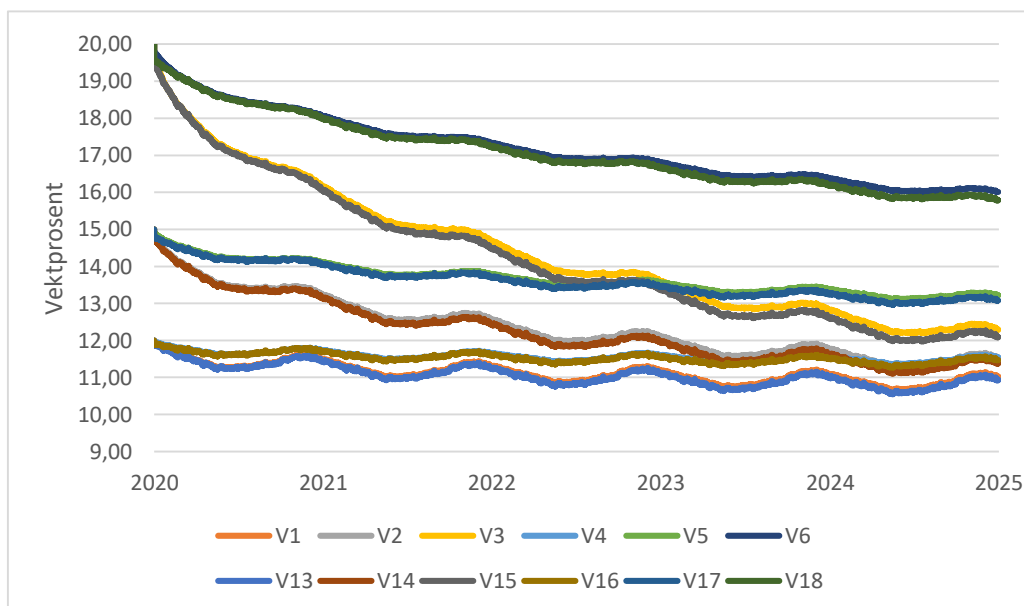
Figur 35: Vanninnhold i KLT (mineralullkonstruksjon med dampsperre)



Figur 36: Muggindeks V13-V18

Celleglass og dampsperre

Figur 37 viser vanninnholdet over beregningsperioden for oppbygning med celleglass og for mineralullkonstruksjon med dampsperre. For like startbetingelser vil konstruksjonene være tilnærmet like, med tanke på fuktighetsnivå og uttørking. Også RF-temperaturkurvene er tilnærmet identiske, som vist i vedlegg 1.



Figur 37: Vanninnhold i KLT (celleglass og mineralull med dampsperre)

4.2 Resultater fra den kvalitative informasjonsinnhenting

Resultatene av intervjuene ble utført på en mindre strukturert måte enn det forfatterne hadde planlagt. Alle spørsmålene ble ikke besvart, noe som gjorde det vanskelig å sammenligne svarene fra de to aktørene. Den frie formen gjorde også at flere av svarene var noe på utsiden av tema som gjorde de mindre relevant for oppgaven. I denne delen er det derfor valgt å plukke ut de mest relevante tilbakemeldingene fra intervjuene som hadde størst innvirkning på oppgaven. Tilbakemeldingene er hentet fra intervjureferatene som ble produsert i etterkant av intervjuene.

Intervju massivtreprodusent

I intervjuet med massivtreprodusenten var fokuset rettet mot isolasjonstype og sperresjikt i kompakte massivtreetak, og deres erfaringer knyttet til kompakte og grønne massivtreetak.

Intervjuobjektet identifiserte fukt i ytterste del av massivtreet som det største bygningsfysiske problemet. De mente at den beste måten å unngå problemet, var å bygge en konstruksjon som lar massivtreet tørke ut og omfordele fuktighet. Dette er bedre enn å lukke konstruksjonen så tidlig som mulig for å forhindre mer fukt fra å komme inn. De var ikke spesielt positive til et dampstett sperresjikt i overkant massivtreet, og mente at en dampåpen løsning som tillater uttørking utover i isolasjonssjiktet er mest hensiktsmessig for å forhindre mugg- og råtevekst. Det ble understreket her at en måtte sørge for at massivtressjiktet var lufttett med teiping av skjøter eller ved å benytte en vindsperre.

En av de viktigste tilbakemeldingene var at de ikke anbefalte plastisolasjon sammen med massivtreelementer. Årsaken er at isolasjonstypen har mye større dampmotstand enn mineralull. I tillegg er plastisolasjon ugunstig med hensyn til brann. Plastisolasjon er

dermed ikke aktuelt i kombinasjon med massivtre i tak i Norge. Det blir brukt i noen grad i andre land.

Når det gjelder celleglass, hadde de lite erfaring med produktet, men var i utgangspunktet positiv til den høye trykkfastheten og ubrennbarheten. Som med sperresjiktet, var de imidlertid skeptiske til det damptette sjiktet som celleglassisolasjonen skaper. Intervjuobjektet foreslo at det damptette celleglasslaget skilles fra massivtre med et luftet hulrom. Dette gir mulighet til å tørke trevirket dersom det er for fuktig. En entreprenør de hadde jobbet med, hadde gjennomført prosjekter med luftelyrer som kunne brukes til å blåse luft gjennom isolasjonslaget ved vannskade eller høy annen fuktighet.

Massivtreprodusenten mente også at det var mulig å bruke teknologi til å følge opp takene, mer enn det som gjøres i dag. Sensorer er vesentlig billigere enn de var tidligere og er nå mer kommersielt interessante. Med sensorer er lettere å oppdage og lokalisere skaden raskt. Dette gjør mest sannsynlig at reparasjonskostnadene reduseres fordi en kan utbedre skadene raskere og en slipper å åpne hele taket for å lokalisere skaden.

Et annet tiltak en kan gjøre for å øke fuktsikkerheten, er å legge inn fall på selve massivtreelementet. Hvis en lekkasje når massivtrelaget, bør vann kunne renne til et synlig sted slik at utbedringstiltak kan iverksettes. Fall på elementene vil ikke hjelpe med å hindre en eventuell lekkasje eller lokalisere den, men gjør at den lettere blir oppdaget. Med dagens teknologi på massivtrefabrikker er det ikke vanskelig eller dyrt å legge inn dette.

Intervjuobjektet uttrykte også skepsis til modellering av KL-tre i programmer som WUFI. Fukt transporteres og omfordes på en måte som er vanskelig å simulere. Man har ikke fått validert modellene så man er sikre på at de fungerer tilstrekkelig. I tillegg er det uvisst hvilken innvirkning limet har. Limtype, mengde og påføringsteknikk spiller mest sannsynlig inn på limets fuktegenskaper.

Intervju celleglassprodusent

Celleglassprodusenten var positiv til bruken av materialet i kompakte massivtretak. Ubrennbarheten, den lange levetid, ingen miljøgifter og høy trykkfasthet ble trukket frem av intervjuobjektet som de mest gunstige egenskapene til celleglassisolasjon.

Bedriften hadde relativt få prosjekter med kombinasjonen av massivtre og celleglass, men hadde flere prosjekter i Norge hvor celleglass var benyttet i tak. Intervjuobjektet kjente ikke til at celleglass ble gjenbrukt i særlig grad, men mente at dette stammet fra den lange levetiden til produktet, og at det rett og slett er revet svært få bygg med celleglass.

Ifølge intervjuobjektet er det først og fremst i aktive tak at celleglass er aktuelt. Trykkfastheten, fuktsikkerheten og et svært slitesterkt sperresjikt gir en ekstra sikkerhet mot lekkasjer som ifølge intervjuobjektet gjør at det i tak med ekstra belastning er verdt den store investeringskostnaden. Det ble også tatt opp at en betongpåstøp for å beskytte sperresjiktet vil dette gi større laster på bærekonstruksjonen enn det celleglass gir.

Det ble også nevnt noen problemer som kan oppstå i slike konstruksjoner. Det viktigste for å unngå problemer, er at utførelsen gjøres riktig. Eksempler på feil utførelse kan

være å ikke benytte nok asfaltlim slik at celleglassjiktet ikke blir tett, eller å ikke sørge for at KLT-elementet er tørt nok. Punktlasten kan også være et problem som må tas hensyn til, selv om trykkfastheten er høy. Det ble også stilt spørsmål om det ville være hensiktsmessig å lime celleglassen direkte på massivtreet. Her mente intervjuobjektet at det gikk fint med tanke på brann, men at det måtte gjøres en vurdering av bevegelsene til massivtredekket, da celleglasset hverken utvider seg eller beveger seg. Dette kommer av at det er et «dødt» materiale som heller ikke suger opp noe vann.

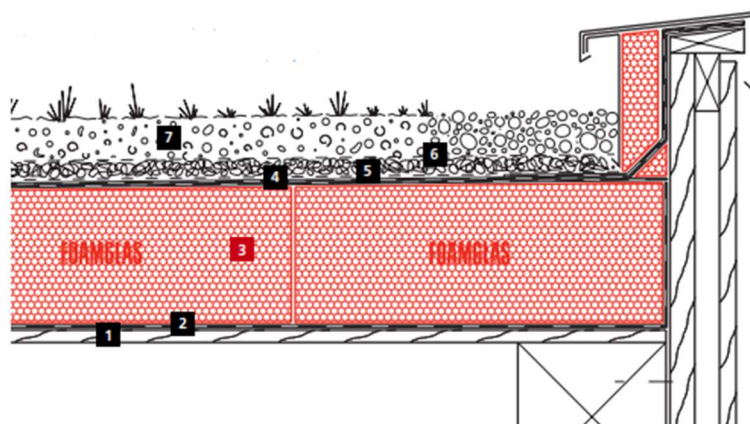
Ellers var intervjuobjektet kritisk til at det blir benyttet 50 års levetid i miljødeklarasjonene til ulike plastisolasjoner. Det trekkes frem at isolasjonsevnen blir betraktelig dårligere med årene for slike isolasjonstyper.

Dokumentstudie

Dokumentstudien resulterte i hovedsak i en rekke dokumenter med løsninger, tekniske datablader, ytelseserklæringer og case-studier fra produsenter og Multiconsult. De fleste av disse ble funnet direkte fra produsentenes nettsider, men noen dokumenter ble også tilsendt fra de aktuelle aktørene.

Under er de viktigste resultatene fra dokumentstudien presentert. Det er stort sett figurer og løsninger fra produsenter og prosjekteringsgrunnlag med tilhørende kontekst og forklaring.

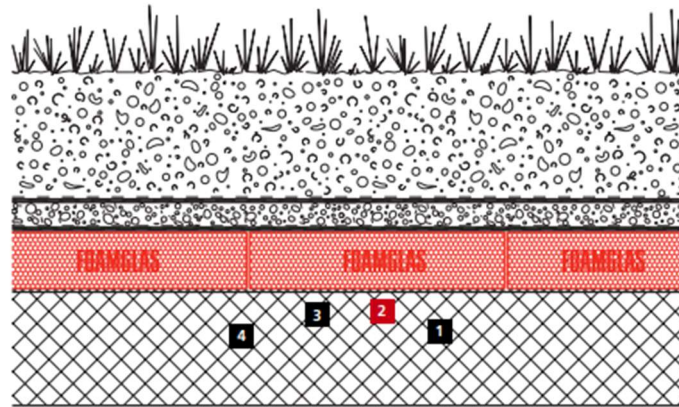
Oppbygningen i Figur 38 er løsningen for et prosjekt kalt «School for therapeutic pedagogy, Thun-Steffisburg». Løsningen har et ekstensivt grønt tak (punkt 7 på bildet) med 142 mm celleglassisolasjon (punkt 3) med varmt bitumenlim. Det er også to lag asfaltmembran (punkt 4) samt et beskyttelseslag av glassfiber over membranene (punkt 5). Det er også inkludert et dreneringslag mellom det ekstensive taket og beskyttelseslaget (punkt 6) (FOAMGLAS Nordic AB, 2010). Legg merke til at membranen trekkes opp langs parapeten og festes på toppen, lignende det som er vanlig i kompakte tak i Norge.



Figur 38: Ekstensivt grønt tak på bærende dekke av tre (FOAMGLAS Nordic AB, 2010)

Oppbygningen i Figur 39 er hentet fra prosjektet kalt «Swarovski Group, Wattens». Løsningen ligner på oppbygningen over, men er ment for et intensivt grønt tak med

bærekonstruksjon i betong og 100 mm celleglass (Foamglas T4+). Videre er det to lag med asfalt takmembran, en beskyttelsesmatte som ikke er noe nærmere definert. Et dreneringslag og et filterlag (FOAMGLAS Nordic AB, 2010). Legg merke til at på denne figuren er det skjedd en feil med tallene som skal indikere de ulike sjiktene.



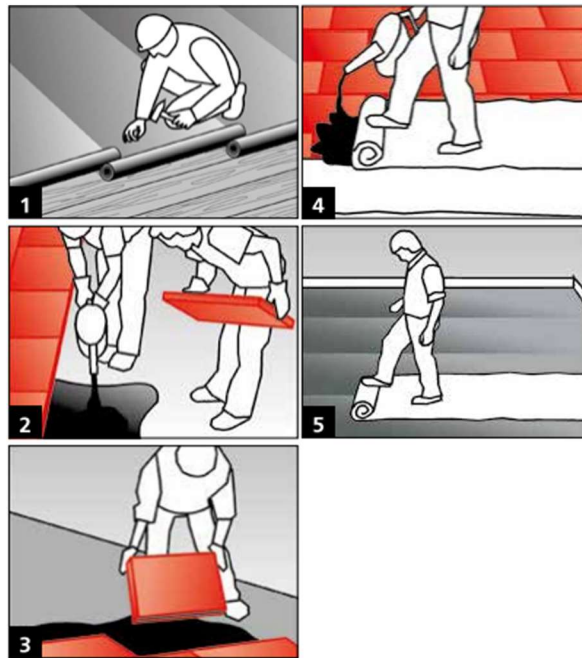
Figur 39: Intensivt grønt tak på betongdekke (FOAMGLAS Nordic AB, 2010)

Det ble også gjort en undersøkelse av løsninger for kompakte tak og gitt av ulike isolasjonsprodusenter. Resultatet av denne undersøkelsen viste at oppbygningene som ble presentert her stemte bra med anbefalingene i Byggforsk for kompakte tak. Det ble imidlertid lagt merke til at flere av produsentene anbefalte løsninger med lavere trykkfasthet i mineralullisolasjonen enn det Byggforsk anbefaler (Rockwool), (GLAVA AS), (PAROC). Produsentene angir som regel et topplag med høy trykkfasthet rundt 80 kPa, men så har isolasjonen under dette 30-40 kPa trykkfasthet. Byggforsk anbefaler 50 kPa i underlaget og 60 kPa i topplaget (Byggforskserien 525.207). Forfatterne lykkes ikke å finne eksempler med mineralull og intensive grønne tak hos produsentene.

Foamglas har et teknisk datablad for intensive tak på bærelag i tre hvor følgende oppbygning og leggeanvisning er anbefalt (FOAMGLAS Nordic AB, 2016). Legganvisningen er også vist i Figur 40.

1. Glidesjikt av bitumen/asfaltmembran: legges løst til og spikres fast til underlaget med limte skjøter.
2. Foamglassplater: hellimes til underlaget med varmt bitumen og også forskyve skjøter fylt med bitumen.
3. Kortsida og langsida av platen dyppes i bitumenet som er helt ut og presses inntil forrige plate.
4. To sjikt bitumenmembran: overlapp på 100 mm i skjøtene. Må påføres umiddelbart etter isolasjonen er lagt.
5. Glide/beskyttessjikt: med overlappende skjøter. Burde påføres umiddelbart etter bitumenmembranen er lagt.

Det påpekes også at underlagstemperaturen og lufttemperaturen ikke må være under +5°C.



Figur 40: Leggeanvisning for Foamglas på tak med bærende lag av tre

Andre informasjonskilder

Det var lite produserte resultater fra e-postkorrespondansen og telefonsamtalene som ble utført underveis i arbeidet. Dette er naturlig, siden det i stor grad ble brukt til å forstå noen spesifikke aspekter ved løsninger. Spesielt når de ulike oppbygningene skulle bestemmes for miljøanalysen og WUFI ble dette brukt.

Et spesifikt resultat var vurderingen til den rådgivende ingeniøren som omhandlet isolasjonstype og trykkfasthet på isolasjonen. Anbefalingen gikk på at det fint kunne fungere med en mineralullisolasjon med lavere trykkfasthet enn anbefalingen fra Sintef Byggforsk på 60 kPa. Dette måtte imidlertid underbygges med beregninger av trykkfastheten til isolasjonen sett i sammenheng med belastningen fra det grønne taket, snølast og nyttelast. Når det er sagt mente de at en trykkfasthet på rundt 40 kPa ville gi relativt god sikkerhet i hvert fall mot fordelte laster. Når det gjaldt punktlaster måtte det gjøres en ekstra vurdering om det var behov for forsterkning med betongpåstøp eller lignende. Det ble også trukket frem at dersom den fordelte lasten var for stor for isolasjonssjiktet ville denne kunne bli presset sammen. Noe som vil skape strekk på membranen og føre til at den løsner i oppbrett (Personlig kommunikasjon, 27. mai 2020).

I de tekniske databladene til celleglassprodusenten står det anbefalt en mengde på det varme bitumenlimet på 5-7 kg/m². Dette ble spesifisert produsenten selv til å være 4 kg/m² for hvert lag celleglass, og 2 kg/m² per tettesjikt som hellimes med varmt bitumen (Personlig kommunikasjon, 02. juni 2020)

4.3 Resultater fra miljøanalyse

Tabell 11 under gir en oppsummering av det totale globale oppvarmingspotensialet for hver konstruksjon. For en mer fullstendig gjengivelse av utslippene per materiale og prosentvist bidrag fra hvert av dem, se vedlegg 4. Det understrekes at dette ikke representerer de totale utslippene fra konstruksjonene, siden hverken bidraget fra massivtreet, dreneringssjiktet, sperresjiktet eller vekstlaget er tatt med. De prosentvise avvikene i Tabell 11 viser dermed ikke hvor mye bedre eller dårligere en komplett takkonstruksjon med celleglass er i forhold til alternativene.

Bidragene til global oppvarming er justert slik at de har den samme funksjonelle enheten som referanseenhet, det vil si utslipp per m². Videre er det justert for levetid i de tilfellene der levetiden er lavere enn 60 år. Transportavstanden (A4) er også justert i de tilfellene der den oppgitte transporten ikke er inkludert transport helt til Norge.

Tabell 11: Total GWP, for de syv takkonstruksjonene

Oppbygning	GWP, [kg CO2 ekv/m2]	Prosentvist avvik fra O1
Oppbygning 1: Celleglass	63,06	-
Oppbygning 2: Glassull + XPS	42,16	-36 %
Oppbygning 3: Glassull + XPS + påstøp	54,85	-16 %
Oppbygning 4: Steinull + XPS	54,86	-16 %
Oppbygning 5: Steinull + XPS + påstøp	67,54	3 %
Oppbygning 6: EPS + XPS	54,29	-17 %
Oppbygning 7: EPS + XPS + påstøp	66,98	2 %

Som en kan se av tabellen er det, ifølge analysen, størst bidrag til global oppvarming fra steinullkonstruksjonen med betong (oppbygning 5) mens konstruksjonen med glassull uten betong (oppbygning 2) har lavest total GWP. Som ventet er det betydelig større utslipp fra konstruksjonene som har betongpåstøp enn fra de som ikke har det. Den armerte betongpåstøpen står for et stort bidrag til utslippene med 25, 20 og 25 prosent av utslippene i henholdsvis oppbygning 3, 5 og 7.

Celleglasskonstruksjonen presterer ifølge analysen bedre enn steinull og EPS-konstruksjonene når disse har en betongpåstøp (oppbygning 5 og 7), men dårligere enn alle oppbygningene som ikke har betongpåstøp. Celleglasskonstruksjonen presterer hele 33 prosent dårligere enn oppbygning 2 og har også høyere GWP enn glassullkonstruksjonen med påstøp.

Det er interessant å se at det er en så betydelig forskjell på det to mineralullmaterialene. Glassull har faktisk så mye lavere GWP enn steinull at det veier opp for de ekstra utslippene en betongpåstøp gir.

I de påfølgende underkapitlene er det beskrevet de viktigste resultatene fra de spesifikke materialsjiktene i analysen. Avsnittene er basert på resultatene i vedlegg 4.

4.3.1 Celleglasskonstruksjoner

Ifølge analysen står isolasjonen står for det største bidraget i celleglasskonstruksjonen. Isolasjonsmaterialet i celleglasskonstruksjonen bidrar totalt med 34,3 kg CO₂ ekv/m². Dette er betydelig dårligere enn glassullkonstruksjonen hvor isolasjonsmaterialet totalt står for 26,5 kg CO₂ ekv/m². Det er imidlertid bedre enn de andre konstruksjonene hvor isolasjonsmaterialene står for over 38 kg CO₂ ekv/m² i alle. Når celleglassoppbygningen (oppbygning 1) likevel har høyere GWP enn mange av de andre konstruksjonene, kommer det av at asfaltmembraner gir store bidrag, og denne oppbygningen har to av dem.

4.3.2 Mineralullkonstruksjoner

Som nevnt har glassullkonstruksjonene ifølge analysen de laveste bidragene til global oppvarming. Selv med en betongpåstøp har konstruksjon fortsatt lavere GWP enn celleglasskonstruksjonen. Steinullkonstruksjonen presterer betydelig dårligere. Steinullkonstruksjonen med betongpåstøp presterer dårligere enn celleglasskonstruksjonen. For både steinull- og glassullkonstruksjonene står isolasjonen for det største bidraget, men det totale bidraget fra isolasjonsmaterialene er fortsatt mye høyere i steinullkonstruksjonen. Totalt bidrar isolasjonslagene i glassullkonstruksjonen med 26,5 kg CO₂ ekv/m², mens i steinullkonstruksjonen er tallet 39,2 kg CO₂ ekv/m². Det er verdt å nevne her at noe av forskjellen ligger i at steinullen har større trykkfasthet enn glassullen, noe som fører til høyere densitet og med det følger høyere utslipp. Utslippene er imidlertid såpass mye høyere at dersom densiteten endres vil fortsatt utslippene være vesentlig høyere for steinullen.

Det er også interessant å se forskjellen mellom PE-folien og asfaltmembranen hvor bidraget fra asfaltmembranen er over 17 ganger større. Ifølge analysen er det derfor svært mye bedre å velge en PE-folie som dampspærre enn en asfaltmembran hvis en skal tenke på bidraget til global oppvarming.

4.3.3 EPS-konstruksjoner

EPS-konstruksjonene presterer tilnærmet helt likt som steinullkonstruksjonene. Ettersom konstruksjonene utenom isolasjonen er tilnærmet like betyr dette i praksis at utslippstallene for isolasjonen er tilnærmet like. Dette stemmer med tallene fra analysen som viser 38,6 og 39,2 kg CO₂ ekv/m² for henholdsvis EPS-oppbygningene og steinullsoppbygningene.

4.3.4 Livsløpsfaser

I vedlegg 5 er det en oversikt over prosentvist bidrag fra de ulike livsløpsfasene til hvert produkt. Av oversikten kan en se at det i de fleste tilfeller er produktfasen (A1-A3) som står for de største utslippene. Asfalttaktekkingen er et unntak, hvor kun 29 % av

utslippene kommer fra disse fasene og 58 % kommer fra sluttbehandling av avfallet (C4). Dette gjelder også PE-folien hvor 53 % av utslippene kommer fra avfallsbehandlingsfasen (C3). XPS-isolasjonen har også en stor andel av bidragene fra C3 med 31 %.

Disse tallene er riktignok litt feil representert siden det i mange av deklarasjonene er sett bort ifra utslipp i forbindelse med livsløpets slutt (C2-C4). Dette kan i noen tilfeller være en hensiktsmessig antagelse fordi det er lite utslipp i forbindelse med disse fasene fra visse produkter.

Det er også gjort en utregning på utslippene hvert produkt har i fasene som inngår i en «vugge-til-port»-analyse (A1-A4) og i resten av livsløpet til produktene (A5+C2-C4). Resultatene fra dette er vist i Tabell 12 under.

Tabell 12: GWP fra de ulike livsløpsfasene

Produkt	Vugge til port, A1-A4		Port til grav, A5+C2-C4	
	Andel	GWP	Andel	GWP
Asfalt takteking	33 %	4,13E+00	67 %	8,45E+00
Varmt asfaltlim	78 %	3,56E+00	22 %	9,86E-01
Celleglassisolasjon	97 %	3,34E+01	3 %	8,88E-01
XPS	100 %	1,65E+00	0 %	2,14E-09
PE-folie	67 %	1,65E+00	33 %	2,14E-09
Topplag steinull	44 %	5,57E+00	56 %	2,72E+00
Underlag steinull	87 %	3,23E-01	13 %	4,04E-01
Glava robust lamell	87 %	6,74E+00	13 %	9,76E-01
Armeringsnett	91 %	2,70E+01	9 %	3,88E+00
Armert betong 50 mm	70 %	9,57E+00	30 %	9,17E-01
Totalt	81 %	1,19E+02	19 %	2,70E+01

Resultatene viser at totalt kommer 81 prosent av GWP fra fasene inkludert i vugge til port, mens 19 prosent kommer fra fasene etter A4. Det betyr at det ikke bare er produktene med små totale utslipp som har høye andeler av utslippene etter A4, når en så betydelig del av totalen kommer her. Ifølge analysen er det riktig at en mindre andel av utslippene kommer i disse fasene, men kanskje ikke tilstrekkelig liten andel til at en kan neglisjere de siste livsløpsfasene. Det understrekes her at dette er basert på en svært liten datamengde, og at det må undersøkes grundigere for å kunne konkludere med noe.

5 Diskusjon

5.1 Diskusjon av metode

5.1.1 Simuleringer

WUFI generelt

Det ble valgt å variere alle variablene mot hverandre, slik at f.eks. ulike massivtretykkelser kombineres med alle nivåer av byggfukt. Hensikten var at det ville være lettere å bestemme hvordan hver variabel påvirker fuktforholdene i konstruksjonen. Alternativet kunne vært å variere én og én parameter mot en referansekonstruksjon. Da ville kanskje flere parametere kunne blitt undersøkt, som f.eks. inneklimate og geografisk plassering. Flere ulike typer sperresjikt eller isolasjonstyper kunne også blitt sett nærmere på.

Smarte dampsperrer eller dampbremsere ble ikke tatt med i simuleringene. Det ble sett på som viktigst å fokusere på celleglass, og de mest sannsynlige alternativene. De intervjuede aktørene ifb. fordypningsoppgaven var mest opptatt av om dampsperre skulle benyttes eller ikke. Vanlig dampsperre og ingen dampsperre ble derfor sett på som de mest sannsynlige alternativene. Massivtre har dessuten en fuktvariabel SD-motstand (som en smart dampsperre), i størrelsesordenen det en dampbrems har (jf. 2.4.5).

Det kan diskuteres om disse alternative sperresjiktene likevel burde vært inkludert i mineralullkonstruksjonene. Prosjektrapport 30 kom frem til at dampbrems var det gunstigste alternativet i kompakte tak, dersom KL-treet hadde høyt byggfuktnivå (Time, et al., 2008). Smarte dampsperrer i massivtretak er sannsynligvis ikke prøvd ut i stor grad, og kunne vært en interessant løsning å undersøke. Det ble imidlertid nevnt i fordypningsprosjektet det at slike produkter ikke er vanntette kan være et problem hvis det vanntettende sjiktet ikke monteres raskt etter den smarte dampperren er montert.

Som nevnt i kapittel 2.6.1- Transportmekanismer i WUFI, er fukt- og varmetransport gjennom konveksjon er utelatt i WUFI. Fukt transportert ved luftlekkasjer gir normalt en større risiko for fuktproblemer enn fukt transportert ved diffusjon (Time, et al., 2008). Denne fuktrisikoen blir dermed ikke tatt med i simuleringene. For å ta med eventuelle konveksjonsbidrag kunne muligens andre varme- og fuktsimuleringsprogram, som Delphin, vært benyttet (Bauklimatik Dresden). Det er også mulig å legge inn et brukerdefinert luftskifte med inneluft eller uteluft i WUFI. Dette er bla. gjort av Geving og Holme (2010).

Selv om fukt transportert gjennom luftlekkasjer kan være en fuktrisiko, er det på den annen side også mulig at luftlekkasjer kan bidra til en uttørring av taket. Ifølge Uvsløkk (2008) vil det på grunn av utilsiktede utettheter langs takkantene være en viss

selvuttørkingsevne i kompakte tak. I visse tilfeller kan denne uplanlagte selvuttørkingen bli relativt stor. Dette fordrer riktignok luftåpent (permeabelt) isolasjonssjikt, og er ikke relevant for tak med celleglass. I tilfeller med høyt byggfuktnivå vil kanskje luftlekkasjer bidra mer til uttørking enn oppfuktning.

Massivtre i WUFI

I prinsippet er det ulike måter å modellere massivtre i WUFI. Massivtre ble i denne masteroppgaven simulert ved å velge produktet «Stora Enso CLT» i WUFIs materialdatabase. Materialeegenskapene for massivtreelementet i WUFI er sammenlignet og validert med praktiske eksperimenter (Stora Enso, 2013). Ved å velge materialer fra databasen sikrer man at materialeegenskapene stemmer med målte verdier.

På den annen side kan det tenkes at man med denne måten å modellere massivtre ikke får undersøkt hvordan fuktfordelingen foregår inne i materialet. Massivtreelementet blir forenklet til et homogent materiale, når det i realiteten ikke stemmer. I beregningene er det for eksempel lagt inn ett byggfuktnivå for hele massivtreelementet. Det kan tenkes at lamellene i midten har stor forskjell fra de på rendene. Dette kan være noe som kunne blitt sett nærmere på i simuleringene. Massivtreprodusenten uttrykte i intervjuet en skepsis til hvor tilfredsstillende WUFI klarer å etterligne massivtre. Intervjuobjektet mente man ikke kan være helt sikre på at de fungerer bra nok. Dessuten er limets innvirkning på fukttransporten uklar.

En annen egenskap med massivtre som ikke er inkludert i WUFI-simuleringene er limfugenes betydning for fukttransporten. En produsent antyder at det kan være viktig å ta hensyn til limets dampmotstand (Stora Enso, 2013). På den annen side kommer Time et al. (2008) frem til at limets betydning på dampmotstanden er liten i forhold til trevirket i seg selv (ett limsjikt har dampmotstand som tilsvarer dampmotstanden til 5 mm trevirke).

Bruk av muggindeks

VTT-utvidelsen til WUFI ble brukt til å vurdere risikoen for muggvekst i konstruksjonene. RF-temperaturgrafer og grafer for fuktinnhold i ulike sjikt ble også sett på, men grønt lys fra VTT ble brukt som akseptkriterium for om en beregningsvariant var tilfredsstillende eller ikke. Det ble gjort fordi det ble sett på som gunstig å ha en objektiv og automatisert metode for å vurdere de ulike variantene mot hverandre.

Det kan være konservativt å bruke muggprediksjonsprogram som WUFI VTT for å avgjøre om en konstruksjon er godkjent eller ikke. Holme skriver at slike program for muggvekst ofte overvurderer mengden mugg og veksthastigheten (2010). For denne masteroppgaven kan det derfor hende at noen beregningsvarianter forkastes, selv om det i virkeligheten ikke hadde blitt muggvekst.

Alternative metoder for vurdering av muggvekst kunne vært å benytte isopleth-modeller, WUFI BIO, temperaturrelatio eller ESP-r muggprediksjonsmodell. Disse ble sammenlignet av Vereecken et al. (2011). De ulike modellene baserer seg på ulike ting og kan trekke ulike konklusjoner av samme konstruksjon. Det vil derfor høre med en usikkerhet ved valget av VTT-modellen.

Muggvekstrisiko ble med andre ord sett på som den viktigste bygningsfysiske utfordringen. Det kan tenkes at andre kriterier kunne vært brukt til å vurdere konstruksjonene mot hverandre. Det kunne for eksempel vært en vurdering av risiko for kondens og fuktakkumulering i isolasjonssjiktet eller av redusert varmeisolasjonsevne i mineralull. Sykliske uttørkinger og oppfuktninger av massivtre kan også tenkes er ugunstig, om det gir oppsprekking av materialet.

Grønt tak

For alle simuleringene ble det lagt inn et grønt tak etter WUFIs retningslinjer for grønne tak. Denne modellen har den store begrensningen at den kun gjelder for ekstensive tak, med substrattykkelse opp til 150 mm. I denne oppgaven søkes det svar på hvordan *aktive tak* av massivtre og celleglass presterer. Blågrønne/blågrå tak og takhager kan ha substrat på opp mot 400 mm eller mer, altså vesentlig mer enn 150 mm.

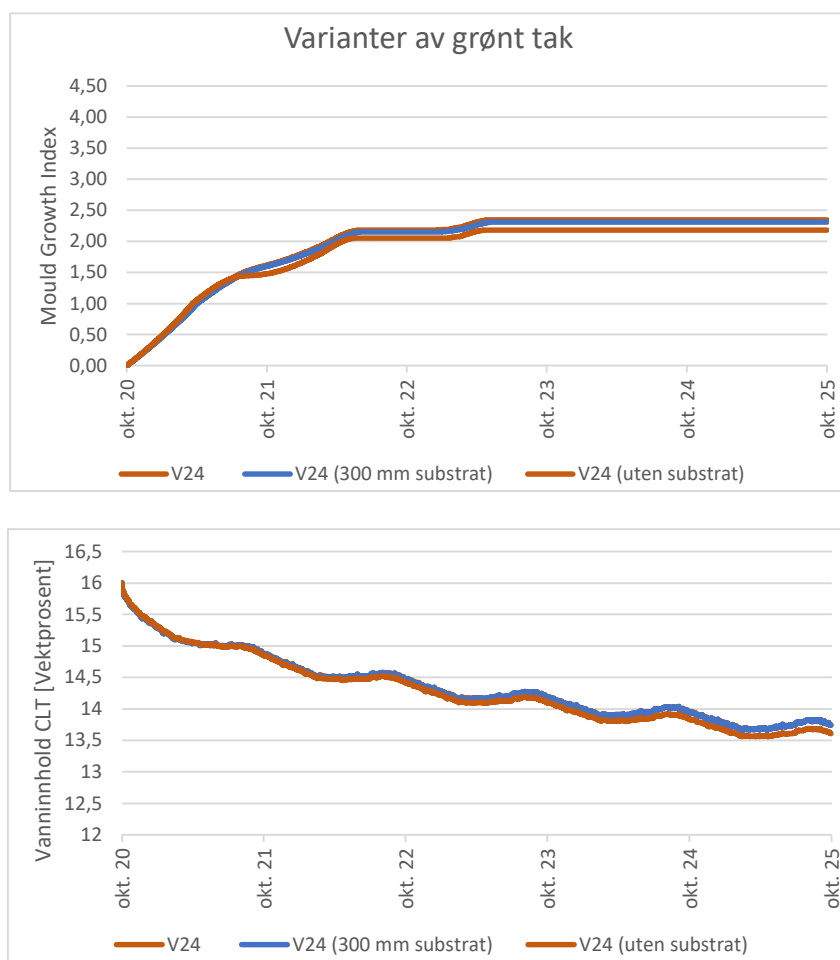
Det grønne taket vil isolere, øke fuktbelastning på membran, samt redusere stråling fra sola på membranen. Dette vil sannsynligvis redusere fuktvandring innover i konstruksjonen. Det er sannsynlig at temperatursvingninger blir mer dempet jo tykkere jordlaget blir. At temperaturgradienten over massivtresjiktet blir lavere, vil sannsynligvis gi tregere uttørking.

Etter tips fra stipendiat Erlend Andenæs ved NTNU (personlig kommunikasjon, 14. april 2020), ble ulike fremgangsmåter for å simulere intensive grønne tak vurdert.

- Først simulere et jordlag på 150 mm og finne forholdene i bunnen av dette jordlaget. Output fra første simulering brukes som input i ny simulering, i stedet for værdata. Slik kan man i teorien simulere seg nedover 150 mm av gangen.
- Simulere ulike tykkelser under 150 mm. Med tre eller flere måleserier kan man si noe om trenden, og kunne estimere hvordan resultatet hadde blitt for tykkelser over 150 mm.
- Anta at modellen virker greit for tykkelser også over 150 mm. Utføre simuleringer med ønsket substrattykkelse.
- Bruke modellen som den er, med substrattykkelse på 150 mm.

Det ble likevel valgt å ta i bruk den etablerte modellen, med substrattykkelse på 150 mm. Det ble gjort fordi modellen er utarbeidet av WUFI og kontrollert og sammenlignet med målte verdier i virkelige grønne tak. I tillegg er 150 mm relativt tykt, og regnes av noen som intensivt (Elvebakk, Time, Skjeldrum, & Kvande, 2018). Tykkelsen vil derfor være tilstrekkelig i mange tilfeller.

Det ble gjennomført en enkel kontroll for å se om tykkelse på jordlaget ville ha mye å si. Det ble undersøkt om det å fjerne substratet helt, eller å enkelt doble tykkelsen til 300 mm ville påvirke muggvekst eller fuktinnhold i massivtreelementet i stor grad. Variant V24, som har celleglass, 320 mm CLT og byggfukt på 16 % ble undersøkt. Kontrollen viste at samme konstruksjon uten substrat og med 300 mm substrat får omtrent like resultater (se Figur 41). Dette kan tyde på at resultatene og konklusjonene fra fuktsimuleringene også gjelder for samme oppbygninger uten det grønne taket. Dette er dog ikke helt sikkert, siden det kun er sjekket for én variant.



Figur 41: Vurdering av substrattykkelse

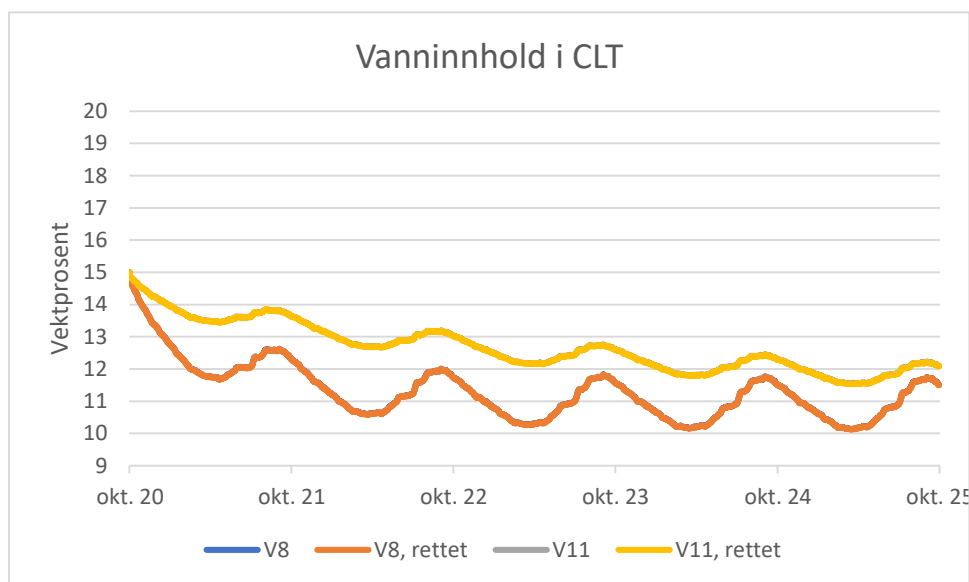
Feil oppbygning i WUFI

En potensiell feilkilde ved noen av simuleringene er at takmembranen ble plassert feil i noen av beregningsvariantene. Membranen ble lagt over beskyttelseslaget i mineralullkonstruksjonene i WUFI. Dette gjelder med andre ord beregningsvarianter V7-V18. Mineralullkonstruksjonene skulle være en duotaksløsning, der XPS-isolasjon legges over membranen for å beskytte den. Membranen er damptett med SD-verdi på 100 m. Med duotaksløsningen ligger XPS-laget over membranen og er eksponert for fuktighet, mens XPS-laget i simuleringene ligger under membranen.

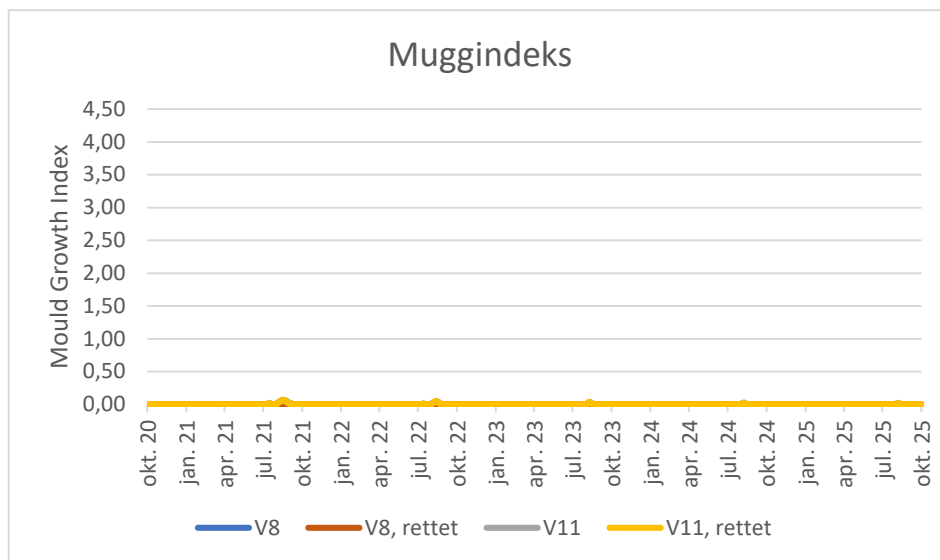
Det ser imidlertid ut til at denne feilen ikke har merkbare konsekvenser for massivtrelaget (se Figur 42 og Figur 43). Feilen ble oppdaget etter at simuleringene var gjennomført. Derfor ble det valgt å beholde resultatene og konklusjonene som kan trekkes fra disse.

For mineralullkonstruksjonen uten dampsperre ble to av variantene (V8 og V11) valgt ut for å undersøke om konsekvensene av feilkilden. Både fuktinnholdet og muggveksten er nær identiske for de to grafene. For mineralullkonstruksjonen med dampsperre (V13-V18) vil dampsperreren over massivtrelaget uansett føre til at fuktighet ikke kan transporteres mellom mineralulllaget og massivtre.

Årsaken til at feilen har neglisjerbar betydning kan være fordi diffusjonsmotstand og varmekonduktivitet for XPS er helt uavhengig av fuktighet i WUFI (se vedlegg 2). Forskjellen blir da kun at dampspærren flyttes 5 cm lenger inn i konstruksjonen. I noen grad vil dette påvirke temperaturprofilen gjennom konstruksjonen (og dermed også metningstrykk og RF), men dette er altså neglisjerbart.



Figur 42: Vurdering av feilkilde, vanninnhold



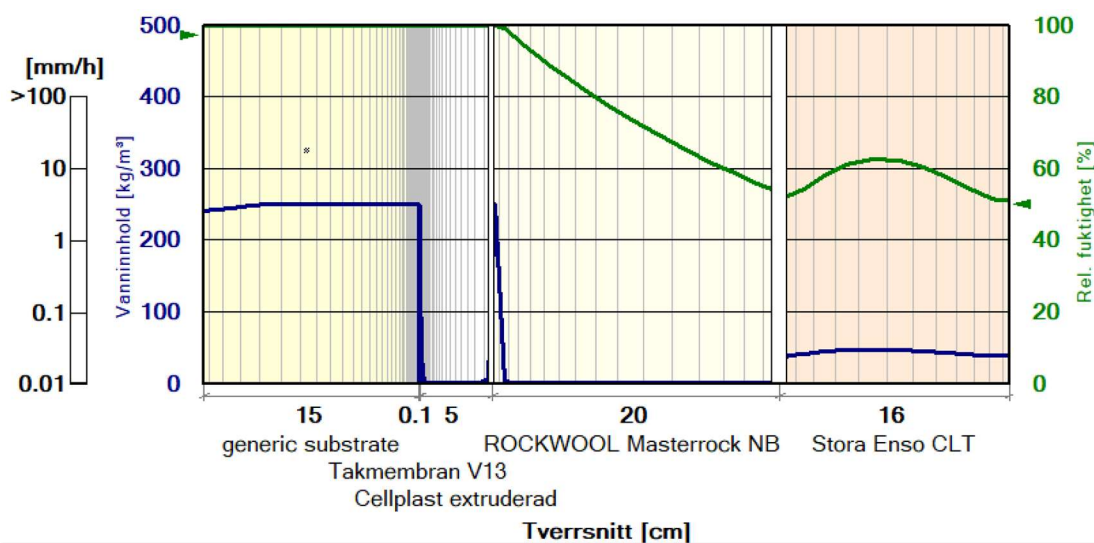
Figur 43: Vurdering av feilkilde, muggvekst

Usikkerhet ved beregninger uten dampspærre (V7-V12)

Samtlige av beregningene gjort av variantene med mineralull uten dampspærre gir tilfredsstillende resultat, som vist i kapittel 4.1.2. Selv konstruksjonen med 320 mm

massivtre og 20 % byggfukt tørker ut så hurtig at muggindeks aldri blir høyere enn 0,4. Etter ca. to år har denne varianten tørket ut til 15 vektprosent fuktighet. Det er imidlertid knyttet en del usikkerhet til disse resultatene.

For variantene V7-V12 (mineralull, uten dampsperre), blir vanninnholdet i ytterste del av mineralullsjiktet svært høyt hvis startfuktigheten i massivtreelementet er høyt. Figur 44 viser vanninnhold og RF over de ulike delene av konstruksjonen for variant V8, etter ca. halvannet år. I de ytterste delene av mineralullsjiktet blir vanninnholdet ca. 250 kg/m³. Oppfuktningen virker urealistisk høy siden mineralull i utgangspunktet tar opp svært lite fuktighet. Fuktøkningen i mineralullsjiktet vil sannsynligvis være med på å redusere fuktighet i massivtreelementet og kan være medvirkende årsak til at muggindeksen blir såpass lav. Det er ikke undersøkt om det vil bli muggvekst på mineralullen.



Figur 44: Simulert vanninnhold og RF april 2022, V8

Det viser seg at RF ligger på 100% i ytterste del av mineralullsjiktet over nesten hele beregningsperioden, noe som tilsvarer vanninnhold på 73,9 kg/m³, (se Tabell 13). Siden det blir kondens, fortsetter fuktoppsamlingen imidlertid forbi 100 % RF, frem til maksimal fuktmetning. Denne er gitt som porøsitet x 1000 kg/m³ (Fraunhofer IBP). For den valgte mineralullen vil det si at maksimal fuktighet er 938 kg/m³.

Den mulige feilen skyldes antageligvis at WUFI er laget for å simulere hygrottermiske prosesser i porøse bygningsmaterialer. Mineralull har diskontinuerlig faststoff og er ikke hygroskopisk, men er modellert slik i programmet. Siden WUFI utelater hydraulisk strømning og dreneringsstrømning, kan det også tenkes at væsketransporten fra den ytterste delen av mineralullsjiktet ikke gjøres på en tilstrekkelig måte.

Problemstillingen med for høyt fuktinnhold i mineralull ble til en viss grad undersøkt av Markus Stellander (2012). Han viste at for å unngå problemet kan det lages en egendefinert sorpsjonskurve for mineralullsjiktet som begrenser vanninnholdet ved høy RF. Stellander tilegnet mineralullen forskjellige sorpsjonskurver avhengig av om takkonstruksjonen hadde dampsperre eller PE-folie. Det samme kunne muligens blitt gjort for takkonstruksjonen uten sperresjikt. Hvis sorpsjonskurven senkes for mye, vil det bli numeriske problemer og konvergensfeil i WUFI (Stellander, 2012). For tilfellet

med beregningene V7-V12, må også porøsiteten endres for å unngå at fuktinnholdet overstiger verdien ved 100 % RF. Ved å endre på mange av parameterne er det risiko for at materialets egenskaper stemmer dårlig overens med materialet i virkeligheten.

Tabell 13 viser sorpsjonskurven for materialet «Rockwool Masterrock NB», som er benyttet i simuleringen. 100 % RF tilsvarer altså et svært høyt vanninnhold.

Tabell 13: Sorpsjonskurve steinull

RF [-]	Vanninnhold [kg/m ³]
0	0
0,65	0,81
0,8	1,01
0,93	1,35
0,97	1,37
0,99	2,2
0,995	2,7
0,999	4,3
0,9995	5,2
0,9999	8,1
1	73,9

5.1.2 Miljøanalyse

I miljøanalysen er det kun inkludert globalt oppvarmingspotensiale (GWP). Dette ble av forfatterne vurdert til å være den viktigste miljøpåvirkningskategorien, og den som får mest oppmerksomhet i næringen. De andre kategoriene er imidlertid også viktige, og det er derfor ikke mulig å gjøre en total vurdering av miljøegenskapene til løsningene, kun basert på beregningene i denne oppgaven. Det gir likevel et godt grunnlag for utbyggere når de skal velge produkter og har mål om en form for lavutslippsbygning som ZEB (Zero Emission Building), da det i disse beregningene kun tas hensyn til CO₂-utslippene til bygget.

I intervjuet med celleglassprodusenten ble det stilt spørsmål ved levetiden til plastisolasjon. Intervjuobjektet mente at isolasjonsevnen ble svekket over tid i slike produkter og at levetiden som blir oppgitt for slike konstruksjoner er noe overdrevet. Forfatterne har imidlertid ikke funnet noen kilder i litteraturen som støtter denne påstanden. Det er derimot klart at isolasjonsevnen til XPS-isolasjonen vil gå noe ned dersom den blir fuktig, selv om den ikke trekker inn like mye vann som en EPS-isolasjon. Dette er ikke tatt hensyn til i beregningen av u-verdiene til konstruksjonen og vil føre til et større varmetap. Når det er sagt er det valgt en større tykkelse enn nødvendig på isolasjonslagene i mineralullkonstruksjonene for å oppnå ønsket u-verdi. Det er dermed antatt at den lille reduksjonen i varmemotstand fra fuktighet i isolasjonen ikke vil øke varmetapet mer enn den ekstra varmemotstanden fra den overdimensjonerte tykkelsen. Fastheten til plastisolasjon er imidlertid noe som reduseres betydelig over tid, og dette er noe en må ta hensyn til når en prosjekterer.

Transportavstanden som er antatt for celleglassproduktene er gjort enkelt med Google maps og en antagelse om at varene blir transportert med lastebil hele veien fra fabrikk til leveringssted sentralt i Oslo. Det er antatt at det er like store kvantum som det som sendes til andre steder i Europa, men det er mulig at siden det bygges relativt lite med celleglass i Norge foreløpig, en må regne med tommere lastebiler og dermed høyere utslipp per kilo produkt. Det er også ikke sikkert at varene vil fraktes hele veien til Norge med bil. Dersom skip benyttes, vil kanskje utslippene endres noe.

Det er heller ikke tatt hensyn til karbonatiseringsprosessen i betongen. Dette kan bidra til å senke total GWP og reduksjonen kan være mellom 5 og 20 % av CO₂-utslippene fra produksjonen av sement. For at effekten skal ha praktisk betydning må imidlertid betongen knuses og spres utover etter endt levetid (Nordby, Solli, & Dahlstrøm, 2015). Det betyr at det meste av karbonatisering skjer i fase D av livsløpet, og er derfor utenfor omfanget til analysen.

Det er heller ikke tatt hensyn til varmemotstanden til betongen i u-verdiberegningen. Dette bidraget kunne bidratt til at isolasjonstykkelsen kunne reduseres. Det er imidlertid svært stor forskjell i varmemotstand på isolasjonsmaterialene og betongen. Det betyr at en må ha en svært tykk betongpåstøp før en kan redusere isolasjonstykkelsen i særlig grad. Tatt i betraktning at betongpåstøpen bare er 50 mm og at det ofte bare tilbys bestemte tykkelser på isolasjonsmaterialene sees det på som usannsynlig at en kan gå ned til en lavere tykkelse på isolasjonslagene basert på den ekstra varmemotstanden fra betongpåstøpen.

Som nevnt i kapittel 3.4.1 er det valgt å utelate livsløpsfasene etter transport til byggeplass(A4) for noen av produktene. Dette ble i hovedsak gjort i mangel på data, men det ble også argumentert for at utslippene i disse fasene uansett er lave for eksempel for betong. Dette er en antagelse forfatterne er noe usikre på, da det må tungt maskinelt utstyr til for både riveprosessen og eventuell transport bort fra byggeplassen. Resultatene i kapittel 4.3.4 viste også at 19 % av totalt GWP for materialene i analysen stammer fra fasene etter fase A4. Dette kan bety at å neglisjere bidraget for disse fasene for betong og andre materialer er en noe usikker antagelse. Nå skal det sies at det ikke er sikkert at betongen nødvendigvis trenger å fraktes vekk fra byggeplassen etter riving. Med ren betong er det også relativt vanlig at betongen blir lagt igjen på plassen. En må også ta hensyn til at resultatene fra analysen er fra et begrenset datagrunnlag som det er vanskelig å trekke noen sikre slutninger fra. Det er heller ikke nødvendigvis sånn at det at andre materialer har store utslipp fra fasene etter A4 så trenger ikke betong å ha det.

Det er valgt å se bort ifra bidraget til GWP fra spikrene som brukes til å feste den nederste membranen til massivtredekket. Dette kan vanligvis være et stort bidrag til GWP i celleglasskonstruksjoner siden spiker har høye utslipp per kg. Det er imidlertid antatt at det benyttes mye mindre spiker i celleglasskonstruksjonen i analysen, siden en kan dra nytte av ballasteringen fra det intensive grønne taket. Det er derfor mindre behov for å holde fast membranen og isolasjonen til takoverflaten.

5.1.3 Kvalitativ informasjonsinnhenting

Kvalitative intervjuer ble vurdert som en god metode for å innhente erfaringer og meninger fra relevante aktører. En usikkerhet knyttet til kvaliteten på intervjuene er forfatterens begrensede erfaring med intervjuer. Det ble for eksempel glemt å opplyse om at intervjuobjektet og svarene fra intervjuet ville bli anonymisert. Dette kan ha gjort at intervjuets delingsvilje ikke ble så stor som den kunne ha blitt.

Det ble, som nevnt i kapittel 3.3.1, valgt å gjøre opptak av kun et av intervjuene. Det første intervjuet ble utført med notater underveis. Etter en vurdering av dette intervjuet ble det besluttet at det var bedre å gjøre opptak. Årsaken var å kunne ha mer korrekte gjengivelser av intervjuet, samt å fokusere mer på det som blir sagt, enn på noteringen.

Opptak burde ikke brukes når intervjuobjektet ikke ønsker det eller blir tydelig ukomfortabel og dersom man bruker opptaket som et substitutt for å ikke følge med underveis i intervjuet. Ved et video- eller telefonintervju er det vanskelig å vurdere om intervjuobjektet føler seg ukomfortabel med opptaket eller ikke. Et annet argument er om opptaket kan virke skremmende, og i noen grad redusere viljen intervjuobjektet har til å oppgi meninger om tema.

Begge intervjuene ble gjort over videosamtale på grunn av koronasituasjonen 2020 og store avstander. Det er her mulighet for at noe av innholdet i svarene har gått tapt på grunn av dårlig forbindelse. I tillegg kan dårlig lyd- og bildekvalitet ha gjort at intervjuobjektene ble forstyrret og mistet et resonnement. Bruken av telefonsamtaler som intervjuform kan også ha gjort at noe av innholdet har blitt feiltolket fordi viktige faktorer som ansiktsuttrykk og kroppsspråk går tapt.

I innsamlingen av data til dokumentstudien ble hovedtyngden av dokumenter og dokumentasjon innhentet direkte fra produsentene av de ulike materialene. Det ble også forsøkt å få tak i prosjekteringsgrunnlag for prosjekter gjort med celleglass og eventuelt med andre isolasjonsmaterialer. Dette resulterte imidlertid ikke i noe særlig som var direkte relevant for oppgaven. Dette er noe som kanskje kunne styrket beslutningsgrunnlaget til oppgaven noe og som kunne vært prioritert å bruke mer tid på. Det ble imidlertid litt knapt med tid og det måtte gjøres prioriteringer på tidsbruken. Det ble det i stedet valgt å benytte mer tid på de andre metodene i oppgaven, som ble vurdert som viktigere.

5.2 Diskusjon av forskningsspørsmål

5.2.1 Hvor godt egnet er celleglassisolasjon i kombinasjon med dekker av massivtre i aktive tak?

Utgangspunktet for å velge celleglassisolasjon er de spesielle egenskapene som materialet innehar. Disse egenskapene blir spesielt godt utnyttet i aktive tak der det er høy belastning. Produktet er godt egnet i konstruksjoner der sperresjiktet ligger utilgjengelig. Det er fordi fuktettheten til materialet gjør at en ender opp med et slitesterkt sperresjikt med stor motstand mot perforeringer. Fukt- og dampettheten kan

imidlertid også være negativt siden fukt i massivtreet ikke får tørke utover i isolasjonslaget. Dette diskuteres mer under forskningsspørsmål 2.

Alternative løsninger

For å vurdere egnetheten til celleglass er det nødvendig å gjøre en vurdering av de alternative isolasjonsmaterialene.

Massivtre er et brennbar materiale, noe som gjør at en i utgangspunktet må ha en ubrennbar isolasjon i taket for å ha en preakseptert løsning. Dette er i samsvar med anbefalingene fra massivtreprodusenten, som ikke anbefalte brennbare isolasjonstyper i massivtreetak. Det er heller ikke en preakseptert løsning å dekke til den brennbare isolasjonen på over og undersiden som det er et i tak med korrugerte stålplater.

Hvis en skal ha en preakseptert løsning er det derfor bare de ubrennbare isolasjonsmaterialene som er aktuelle. Her er mineralull og celleglass de mest aktuelle. Anbefalingen fra Sintef Byggforsk og TPF er at varmeisolasjonen har en trykkfasthet på 60 kPa. Blant isolasjonsmaterialene forfatterne har funnet er det ingen glassullisolasjoner ment for store kompakte tak som har tilstrekkelig høy fasthet til å tilfredsstille denne anbefalingen. Steinull er dermed det eneste alternativet med både høy nok trykkfasthet til å tilfredsstille anbefalingene og god nok brannmotstand til å være en preakseptert løsning. En kan derfor argumentere for at enhver sammenligning som gjøres må gjøres med konstruksjoner med steinull og ingen av de andre isolasjonsmaterialene. Resultatene fra miljøanalysen viste at celleglassisolasjonen presterte mye jevnere med konstruksjonene med steinull enn det den gjorde med glassullkonstruksjonene. Dersom det er såpass store laster at en betongpåstøp er nødvendig i steinullkonstruksjonene presterer faktisk celleglassisolasjonen bedre.

En kan også tenke seg at det er konstruksjoner der lasten på taket er så stor at mineralullen har for liten trykkfasthet, for eksempel i parkeringsdekker. Dersom det da er bæring i massivtre er celleglass det eneste alternativet som både er preakseptert og har høy nok trykkfasthet.

Det kan imidlertid stilles spørsmålstegn ved hvor ofte en vil ha kombinasjonen høye punktlaste og massivtredekker siden disse dekkene har en mer begrenset bæreevne enn det betong- og stålkonstruksjoner har. I tillegg kan punktlaste også være et problem i celleglasskonstruksjoner, noe som celleglassprodusentene selv nevnte i intervjuet som ble gjort med dem. De har også en anbefaling for parkeringsdekker der de har inkludert en påstøp. I et slikt tilfeller mister en noe av fordelene med å velge celleglass.

Når det gjelder bruk av brennbar isolasjon i massivtreetak er det visse ting som tyder på at forskriftene er noe konservative. En kan derfor tenke seg at en form for tildekking av brennbar isolasjon i fremtiden også blir en preakseptert løsning i massivtreetak. Det sees derfor på som relativt sannsynlig at en brannteknisk analyse ville kunne resultere i en konstruksjon med brennbar isolasjon som ligner på de i Figur 26 og Figur 27. En sammenligning av disse konstruksjonene er dermed ikke så usannsynlig. I så fall har en da et alternativ til celleglasskonstruksjonene med høyere trykkfasthet enn steinullkonstruksjonene.

En kan også argumentere for at en mineralull med trykkfasthet som er lavere enn anbefalingen faktisk er en god løsning som en helt fint kan benytte i tak med store laster. Den rådgivende ingeniøren mente at det var vanlig å benytte lavere trykkfastheter enn den anbefalte. Selv med relativt tykke jordlag og dimensjonerende snølast så kunne en isolasjon med for eksempel 40 kPa være tilstrekkelig. Dette stemmer bra med anbefalingene fra isolasjonsprodusentene som også har løsninger med lavere fasthet på isolasjonslaget. En kan også argumentere med at eventuelle punktlaster vil fordeles utover et større område av vekstmediumet og ved å benytte et beskyttelseslag i XPS og en betongpåstøp.

Likevel vil en med en celleglassløsning benytte mindre av trykkfasthetskapasiteten og på den måten ha mer å gå på. Dette gjør at taket i større grad er i stand til å tåle endringer i lastsituasjonen på takoverflaten. Det er også viktig å påpeke at selv om en i visse tilfeller også må benytte en betongpåstøp i tak med celleglass skal det mye mer last til før det er nødvendig. Det er også sannsynlig at en vil klare seg med kun forsterkninger i områder med store punktlaster, mens en vil måtte ha betongpåstøp over hele takoverflaten i en tilsvarende konstruksjon med mineralull. I tillegg til dette skaper celleglassjiktet et robust vanntettende og dampnettende sjikt som er mye mindre utsatt for skader og lekkasjer underveis i byggeperioden og når takoverflaten er i bruk.

Kombitaksløsningen med flere lag av mineralull, EPS, XPS og ev. betongpåstøp er også med på å øke kompleksiteten til løsningen. Flere aktører peker på enkelheten til celleglass som en fordel som fører til reduksjon i antall arbeidsoperasjoner og antall sjikt. Færre sjikt og arbeidsoperasjoner reduserer antall ledd hvor det kan oppstå feil. Det er også lettere å identifisere feil når det er færre sjikt å forholde seg til. Det trekkes også frem som en fordel ved celleglass at tykkelsen på takkonstruksjonen blir mindre. Dette er kanskje ikke et stort problem i nybygg, men kan vise seg å være svært nyttig i påbygg og ombyggingsprosjekter der en skal få takkonstruksjoner til å passe med eksisterende bygg, samtidig som nye og strengere krav til varmemotstand tilfredsstilles.

Økonomi

Et tema som ikke har blitt adressert i særlig grad er den økonomiske vurderingen av de ulike alternativene. Det kan virke som om dette er en av de største barrierene for å øke populariteten til celleglass. Kostnader er en av de viktigste faktorene når avgjørelser skal gjøres i byggeprosjekter og derfor kunne det med fordel vært utført en analyse av kostnadene til de ulike løsningene. Det ble likevel valgt å fokusere på de mer bygningsfysiske og bygningstekniske aspektene da egnetheten til løsningen skulle vurderes siden det er her kompetansen til forfatterne ligger. Når det er sagt, er det i de påfølgende avsnittene en gjennomgang av noen vurderinger og tanker rundt emnet. Det understrekes at dette kun er vurderinger forfatterne har gjort selv og ingen systematisk analyse er utført. Vurderingene er riktignok gjort med bakgrunn i det lille som finnes i litteraturen og intervjuene av aktører i byggenæringen utført høsten 2019 og våren 2020.

Som beskrevet i kapittel 2.3.5 er det tydelig at celleglass har en betydelig større investeringskostnad enn det de alternative isolasjonsmaterialene har. Dette er riktignok basert på noe usikre tall siden prisene er hentet fra litt ulike typer kilder. Tallene tyder likevel på at investeringskostnaden i isolasjonsmateriale vil være større i

celleglasskonstruksjoner. Når det er sagt vil en konstruksjon med mineralull kreve flere komponenter (betongpåstøp, beskyttelsessjikt osv.) som ikke nødvendigvis må inkluderes i en celleglasskonstruksjon. Når konstruksjonen er avhengig av flere ulike komponenter krever dette også flere ulike arbeidsoperasjoner og flere ulike aktører involvert i prosessen. Dette kan senke effektiviteten og øke den totale arbeidsmengden.

Disse bidragene vil mest sannsynlig bidra til å minske avstanden i det økonomiske regnestykket mellom løsningene. Basert på tilbakemeldingene fra aktørene i bransjen ser forfatterne det likevel som sannsynlig at løsningen med celleglass blir dyrere. Når det er sagt kan det argumenteres for at det er verdt den ekstra kostnaden å velge celleglass dersom en med det reduserer risikoen for fremtidige skader. I prosjektrapport 104 nevnes beskyttelsen av det vanntettende sjiktet spesifikt som et område en absolutt ikke skal spare penger på, siden kostnadsrisikoen ved en skade er såpass stor i intensive grønne tak (Noreng, et al., 2012).

5.2.2 Hvilke bygningsfysiske og bygningstekniske utfordringer kan oppstå i aktive tak av massivtreelementer og celleglassisolasjon?

Forfatterne har identifisert byggfukt i massivtreelementet som den viktigste bygningsfysiske problemstillingen å ta hensyn. Hvis fuktigheten til å begynne med er høy, vil det vokse mugg på ytre overflate.

Det er flere ulike utfordringer som kan oppstå med kombinasjonen av aktive tak, massivtreelementer og celleglassisolasjon. Prosjektrapport 30, «Tak basert på massivtreelementer», fra Sintef (2008) pekte på tre problemer som kan oppstå i en kompakt takkonstruksjon.

1. Risiko for kondens og fuktakkumulering i isolasjonssjiktet.
2. Risiko for høy relativ luftfuktighet (RF) i ytre del av isolasjonssjiktet som kan føre til muggvekst
3. Risiko for høy RF på ytre overflate av massivtreelementet som kan føre til muggvekst.

De to første problemene er relatert til for høyt fuktnivå i isolasjonssjiktet. Siden celleglassisolasjon har tette porer og er damp tett, vil det være svært lite fuktighet i dette sjiktet. Fuktighet kan ikke akkumuleres og kondenseres i isolasjonssjiktet, så problem 1 og 2 fra prosjektrapport 30 vil ikke være aktuelle i en celleglasskonstruksjon.

Problem 3 er derimot veldig relevant for en celleglasskonstruksjon. Damp tettheten gjør at fuktighet ikke kan bevege seg utover i konstruksjonen om vinteren. Dette gjelder også for mineralullkonstruksjoner med dampspærre, da disse oppfører seg nær sagt identisk med celleglasskonstruksjoner. Fuktighet i massivtreelementet kan på grunn av dampmotstanden derfor kun tørke mot inneluft, noe som kan ta lang tid. Å redusere massivtreelementet vil gjøre at uttørkingen går fortere og redusere sannsynligheten for muggvekst. Effekten er imidlertid så liten at det sannsynligvis sjeldent vil være aktuelt å prosjektere bygget for å få tynnere massivtreelementer.

WUFI-beregningene viser at det kreves et byggfuktnivå på 15 prosent eller mindre for å unngå muggvekst på oversiden av massivtreelementet. Som diskutert i 5.1.1, kan dette kravet være konservativt, siden muggprediksjonsprogram kan indikere muggvekst for

tidlig. Selv om det er litt uenighet om hvilket fuktnivå som er tilstrekkelig, brukes 15 vektprosent som øvre grense for byggfukt av flere aktører i næringen (Bakken & Kolsaker, 2019). Beregningene bekrefter det som står i veiledning til TEK17, som angir 15 vektprosent som preakseptert ytelse for å unngå soppangrep på trevirke (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

Gjennom intervjuet med celleglassprodusenten kom det frem av bevegelser i KL-treet er en mulig kilde til skader på celleglasset. Celleglasset er et dødt materiale, og ikke hygroskopisk, noe som gjør at det er tilnærmet ingen bevegelse i materialet. Massivtre på den annen side, krymper og sveller med fuktinnholdet og med temperatur. En kan se for seg at tvangskrefter på grunn av forskjeller i bevegelse av de to materialene kan føre til at fugene eller selve celleglassplatene sprekker opp. Det er mulig at asfaltmembranen som celleglassplatene kan limes på, har mulighet til å ta opp noe av denne bevegelsen. Det har ikke lyktes forfatterne av masteroppgaven å finne forskning på denne problemstillingen.

I utgangspunktet er et aktivt tak med celleglassisolasjon rimelig trygt mot lekkasjer. Det har en vanlig takmembran, helt tett celleglassisolasjon med asfaltlim på alle sider, i tillegg til asfaltmembran mot massivtreelementet. Likevel vil det alltid være en viss risiko mot lekkasjer. Vann fra lekkasjer kan renne under asfaltmembranen mot massivtreet, dersom denne kun er spikret. Spesielt med et aktivt tak med fordrøyende effekt vil det kunne være større risiko for lekkasje, med større vanntrykk enn på tradisjonelle tak. Lekkasjer kan finne veien til trevirket og kunne gi mugg eller råteskader. Dette kan tenkes skje f.eks. i forbindelse med sprekker i celleglassplatene, punktlaster som svekker isolasjonen eller om utførelsen ikke er gjort riktig. Gjennomføringer og avslutninger kan også være svake områder hvor vann kan massivtre kan ta opp fuktighet.

5.2.3 Hvordan bør oppbygging og utførelse av aktive tak av massivtreelementer og celleglassisolasjon være for å sikre tiltenkt ytelse og lang levetid?

Det er i denne masteroppgaven valgt å følge oppbygningene som er anbefalt av celleglassprodusenten når en har et intensivt grønt tak. Oppbygningene anbefalt i denne studien er basert på reelle prosjekter som produsenten har vært involvert i. Dette er riktignok kun anbefalinger fra en produsent, og det er lite forskning på hvordan en burde bygge opp slike konstruksjoner eller hvordan de presterer. Det er spesielt lite erfaring i Norge og dette representerer en usikkerhet i oppbygningene da en ikke vet hvilke konsekvenser det norske klimaet kan ha på konstruksjonene. Det er alltid en usikkerhet når det skal introduseres nye materialer på det norske markedet. Lite erfaring i næringen og norsk forskning gjør risikoen for feil større og øker usikkerheten og viljen utbyggere har til å velge produktet. Når det er sagt, er materialet mye vanligere i Sverige og andre land med klima som ligner Norges. Det er dermed kanskje rimelig å anta at disse løsningene også vil fungere i Norge.

Som nevnt under forrige forskningsspørsmål, er det mye som tyder på at dersom det er et damptett sjikt rett i overkant av massivtredekket er det viktig at fuktighetsnivået ikke er for høyt. Det er derfor svært viktig at det settes fokus på at massivtreet er tilstrekkelig tørt før tettesjiktet og celleglassisolasjonen monteres. Det anbefales at nødvendige fuktsikringstiltak gjøres for å sikre dette.

Det ble av massivtreprodusenten foreslått en luftet løsning hvor celleglasslaget lektes opp, slik at det blir et hulrom mellom massivtre og celleglass. Dette ble også vurdert av forfatterne selv og nevnt av en annen aktør høsten 2019. Det er tydelig at flere ser potensialet denne løsningen har til å redusere problemet med fukt i den ytre delen av massivtreet. Det er imidlertid mange usikkerheter ved løsningen. Luftingen av hulrommet må løses på en praktisk gjennomførbar måte. Det er blitt tenkt på å koble ventilasjonsanlegget til hulrommet, men det er ikke tenkt ut hvordan dette skal løses. Andre forslag involverer å lede uteluften inn i hulrommet ved luftelyrer på takoverflaten eller spiler ved parapetene. Disse burde nok lukkes når massivtreet er tørt nok, slik at isolasjonsevnen til taket ikke blir redusert av luftutskiftningene. Løsningen vil også øke kompleksiteten til konstruksjonen og dermed kanskje redusere noe av fordelene med å velge celleglass. Et argument mot denne løsningen er at sikkerheten mot brann sannsynligvis kan bli dårligere. Med et hulrom over massivtreet kan en risikere fri brannspredning over takflaten. En mulig løsning på dette kan være å fylle mineralull i hulrommet.

For å unngå problemer med forskjell i bevegelse for massivtre og celleglass, kan det være nyttig å legge inn et glidesjikt. Anbefalingen fra celleglassprodusenten er å tettspikre asfaltmembranen til massivtreet. Deretter hellimes celleglassplatene direkte til asfaltmembranen. Det er litt usikkert for forfatterne hvor mye bevegelser på massivtreet en slik løsning vil tåle. Nå er det riktignok ikke sikkert at bevegelsene i massivtre er så store, siden det er relativt dimensjonsstabilt.

Membranen spikres til massivtreet for å sikre at isolasjonen og membranen ikke blåses av taket. Dette er som regel det eneste som holder isolasjonen festet til taket. I aktive tak er det imidlertid ofte et tykt lag med jord og vegetasjon som sørger for at isolasjonen er holdt fast. Det er dermed ikke sikkert at en spikring av membranen er nødvendig, og membranen kan da fritt fungere som et glidesjikt. Da kan også membranen benyttes som en fullverdig byggetidsteking for å hindre at fuktighet tas opp i byggeperioden.

Ved prosjektering av massivtrekonstruksjoner med celleglass må det tas hensyn til bruken av taket, og eventuelle punktlaster som kan skade isolasjonen. Der det for eksempel skal bli mye trafikk eller tunge maskiner eller graving kan det vurderes å legge betongpåstøp på hele eller deler av taket.

6 Konklusjon

I masteroppgaven har det blitt undersøkt hvorvidt aktive tak av massivtreelementer med celleglassisolasjon er en egnet kombinasjon. Studien tar også for seg de utfordringer som finnes ved kombinasjonen og hvordan oppbygning og utførelse burde være for å overkomme utfordringene. Det har blitt utført fuktsimuleringer, en dokumentstudie og en miljøanalyse av kombinasjonen og andre alternative oppbygninger for å vurdere egnetheten opp mot andre etablerte løsninger.

Studien viste at med korrekt utførelse og gitte betingelser er kombinasjonen en god løsning. Den høye trykkfastheten til celleglass gjør det godt egnet i aktive tak som ofte har stor mekanisk belastning. Ubrennbarheten gjør at det er godt egnet i kombinasjon med det brennbare massivtreet. Isolasjonen fungerer også som et mer slitesterkt tettesjikt enn mer tradisjonelle løsninger. Gjennom arbeidet har det kommet frem at materialet tilbyr en enklere og mer kompakt løsning enn det en får med alternative isolasjonsmaterialer. Celleglasskonstruksjonen presterte noe dårligere enn de fleste alternative oppbygningene i miljøanalysen. Likevel er det knyttet noe usikkerhet til om enkelte av de alternative løsningene er hensiktsmessige å benytte i kombinasjon med massivtre og aktive tak. Det er kun to av de alternative løsningene som er brannteknisk preaksepterte og samtidig har trykkfasthet i henhold til anbefalingene fra Sintef Byggforsk og TPF. Celleglasset hadde lavere utslipp enn én av disse, og høyere enn den andre.

Selv om kombinasjonen er godt egnet, er det likevel noen utfordringer knyttet til løsningen. Høyt byggfuktnivå ble identifisert av celleglassprodusenten som den største utfordringen ved celleglass i kompakte tak. Dette underbygges av fuktsimuleringene som viste at løsningen bare var gunstig dersom fuktnivået ble holdt under 16 vektprosent før montering det dampette isolasjonssjiktet. Dette resultatet støtter veiledning til TEK17, som også har som grense at trevirket må ha 15 vektprosent eller mindre.

Lekkasjer kan være en utfordring, dersom utførelsen er utilstrekkelig eller det forekommer for høye punktlaster. En annen mulig kilde til lekkasjer er forskjeller i bevegelser i massivtreet og celleglasset. Dette kan skape tvangskrefter og føre til oppsprekking i fuger eller i selve celleglasset. Det er imidlertid knyttet noe usikkerhet til størrelsen på bevegelsene i massivtreet og evnen asfalmembranen mellom de to materialene har til å ta opp disse kreftene.

God og korrekt utførelse er trukket frem som essensielt for at celleglasskonstruksjonen skal være en sikker løsning med lang levetid. Spesielt viktig er det å gjøre hensiktsmessige fuktsikringstiltak for å sikre at byggfuktnivået er lavt nok før lukking. Når massivtreelementene er montert, burde resten av isolasjonssjiktet monteres så fort som mulig. Asfalmembranen kan benyttes som midlertidig byggetidstekking frem til celleglassplatene legges. Når isolasjonsplatene monteres, bør leverandørens anvisning følges. Det er viktig å bruke nok lim, slik at alle fuger fylles.

Oppbygningen følger stort sett anbefalinger for vanlige kompakte tak, for eksempel i forbindelse med sluk og fallforhold. Om det aktive taket skal ha beplantning, må membranen ha høy nok rotbestandighet eller separat rotsperre. Det bør planlegges og tas hensyn til alle eventuelle laster, og vurdere om påstøp er nødvendig på hele eller deler av taket.

7 Videre arbeid

Gjennom arbeidet med studien har det blitt oppdaget områder som er usikre og trenger mer forskning for å kunne besvares. For noen av områdene ble de valgte metodene sett på som utilstrekkelige, mens for andre ble tid og omfanget av studien begrensende. Under følger noen av aspektene som sees på som interessante for videre forskning.

- Det er behov for mer laboratorieforsøk på krysslaminerte treelementer. Det er blant annet usikkert hvordan fuktvandring og -omfordeling skjer inne i massivtreelementene. Om byggfukt er det lite litteratur som forklarer hvor hurtig elementene tar opp fukt fra nedbør i byggeperioden. Det er også språk i hvilke verdier som brukes for eksempel for diffusjonsmotstand. Resultater fra fuktsimuleringer med KLT vil være usikre hvis ikke fuktvandringen innad i materialet modelleres riktig. Det burde derfor gjøres en studie i laboratoriet der det sees på fuktvandringen i materialet, for å gi et klarere bilde av fuktegenskapene til massivtre.
- Noe usikkerhet hersker fortsatt rundt bruken av sperresjikt i kompakte tak av massivtre. Simuleringene i denne oppgaven viste at det kan være gunstig å ikke ha et damptett sjikt over massivtredekket i kompakte tak ved høye fuktnivåer. Det er imidlertid oppdaget en stor oppsamling av fukt i mineralullsjiktet over massivtreet som kan påvirke både varmekonduktiviteten til isolasjonen og gi fuktproblemer i massivtreet senere. Det virker på forfatterne som om det er en svakhet med hvordan mineralullisolasjon er modellert i WUFI, som kan gi noe feilaktige resultater. Forfatterne ser ikke på det som sannsynlig at denne fukten skal bli værende i isolasjonslaget og at ikke noe av denne fukten skal bevege seg tilbake i massivtreet. Det burde derfor gjøres laboratorieforsøk av hele takkonstruksjoner av massivtre for å se om konstruksjonene oppfører seg slik simuleringene viser.
- Et annet tema det ble knyttet stor usikkerhet til var brannegenskapene til massivtredekkene. Det kan virke som om reglene som gjelder for brann i massivtrekonstruksjoner er noe konservative. Mer spesifikt for denne oppgaven var det knyttet usikkerhet til om noe brennbar isolasjon var greit i massivtreet dersom en gjorde tilsvarende tiltak som i tak med korrugerte stålplater. En studie som tar for seg brannegenskapene til massivtre kunne derfor vært nyttig for å kartlegge egenskapene bedre og gi klarere retningslinjer.
- Det ble oppdaget ulike anbefalinger på trykkfastheten til isolasjonen i kompakte tak. Litteraturen anbefaler minst 50 kPa i de nederste delene av isolasjonssjiktet mens flere av produsentene har løsninger som inkluderer 30 kPa trykkfasthet på det nederste isolasjonslaget. Det burde derfor gjøres en innsats for å kartlegge hvilke trykkfastheter som faktisk er nødvendig, og så gjøres en oppdatering enten av litteraturen eller hos produsentene.

- Metoden som ble benyttet for å simulere det grønne taket var basert på en modell fra WUFI. Denne er imidlertid bare ment for 150 mm tykke vekstlag. I denne oppgaven ble det derfor denne tykkelsen benyttet. Modeller for intensive grønne tak med vekstlag over 150 mm burde lages og kontrolleres mot reelle verdier.
- Et annet tema som ikke har blitt utforsket i særlig grad er kostnaden tilknyttet de ulike løsningene. Dette er et tema som er svært viktig generelt i byggeprosjekter og det ble også identifisert som den største grunnen til at celleglass ikke blir valgt. Det er liten tvil om at prisen per kg isolasjonsmateriale er mye større for celleglass enn for andre isolasjonsmaterialer. Likevel ser forfatterne potensialet celleglass har til å forenkle konstruksjonen og arbeidsprosessen og dermed redusere den totale kostnaden sammenlignet med andre materialer. Det betyr at forskjellen kanskje blir jevnet ut noe. I tillegg er det sannsynlig at celleglass reduserer sannsynligheten for lekkasjer noe som burde være en prioritet når kostnadene skal vurderes. Det vurderes derfor at en livssyklus-kostnad (LCC) ville vært nyttig å gjennomføre for celleglass.

Referanser

- Aarstad, J., & Glasø, G. (2008). *Fokus på tre nr. 20. Massivtre*. Oslo: Norsk Treteknisk institutt.
- Aasheim, E., Kleven, B., Sund, H., Jakobsen, B., Skaar, S.-Å., Kirkegaard, K. H., . . . Aarstad, J. (Hefte 1, 2006). *Bygge med massivtreelementer - Hefte 1 Generelt*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Aasheim, E., Kleven, B., Sund, H., Jakobsen, B., Skaar, S.-Å., Kirkegaard, K. H., . . . Aarstad, J. (Hefte 2, 2006). *Bygge med massivtreelementer - Hefte 2 Byggeteknikk*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Aasheim, E., Kleven, B., Sund, H., Jakobsen, B., Skaar, S.-Å., Kirkegaard, K. H., . . . Aarstad, J. (Hefte 3, 2006). *Bygge med massivtreelementer - Hefte 3 Dimensjonering*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Aasheim, P. A., & Lier, B. (2017). *Markedsanalyse massivtre markedet 2017-2024*. Vestby: Trebruk AS. Hentet mars 20, 2020 fra <https://woodworkscluster.no/wp-content/uploads/2017/06/markedsanalyse-massivtre-280217.pdf>
- Bakken, E. F., & Kolsaker, M. (2019). *Fukt i kompakte tak av massivtre*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Bauklimatik Dresden. (u.d.). *Simulation program for the calculation of coupled*. Hentet juni 03, 2020 fra Delphin: <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en>
- Berry, F., & Choi, C. (2012, Oktober 11). *Citation Chaining: How to find more information from one source*. Sidney: University of Sidney.
- Bjørheim, K. (2019, mai 7). *Splitkon åpner verdens største massivrefabrikk*. Hentet fra Teknisk Ukeblad: <https://www.tu.no/artikler/splitkon-apner-verdens-storste-massivrefabrikk-br/464045?key=AFNDKqjt>
- Borgström, E., & Fröbel, J. (2017). *KL-trähandbok - Fakta och projektering av KL-träkonstruksjoner*. Stockholm: Svenskt trä.
- Brekke, A. (2015). *EPD - EPS isolasjon (trykkklasse 80)*. EPD-Norge.
- Buck, D., Wang, X., Hagman, O., & Gustafsson, A. (2015). Comparison of Different Assembling Techniques Regarding Cost, Durability and Ecology - A survey of Multi-Layer Wooden Panel Assembly Load-Bearing Construction Elements. *BioResources*, Vol 10, No 4.
- Bugge, L. (2016). *Bruk av tre i offentlige bygg*. Asplan Viak. Hentet fra <https://d21dbafykdck9.cloudfront.net/1481729588/bruk-av-tre-i-offentlige-bygg.pdf>
- Byggeindustrien. (2018). Bærekraftige bygg gir flere positive effekter. *Byggeindustrien*. Hentet 3. mars 2020 fra <http://www.bygg.no/article/1369998>
- Byggforskserien 470.101. (2014). *Livsløpsvurdering (LCA) av byggevarer og bygninger. Innføring og begreper*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 470.102. (2015). *Metodiske valg og problemstillinger ved livsløpsvurderinger (LCA)*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 470.103. (2014). *Miljødeklarasjoner (EPD) av byggevarer*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.

- Byggforskserien 525.002. (2018, Februar). *Takformer, taktyper og oppbygning*. Trondheim: SINTEF Byggforsk. Hentet fra Byggforskserien.
- Byggforskserien 525.207. (2018). *Kompakte tak*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 525.306. (2009). *Terrasser med beplantning på bærende betongdekker*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 573.121. (2003). *Materialer til luft- og damptetting*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 573.344. (2004). *Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 573.430. (2003). *Materialdata for vanndamptransport*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Byggforskserien 701.401. (2005). *Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimate*. Trondheim: SINTEF byggforsk. Hentet fra Byggforskserien.
- Canada Wood. (2015). *Moisture and Wood-Frame Buildings*. I *Building Performance Series No. 1*. Ottawa: Canadian Wood Council.
- Chenani, S. B., Lehvavirta, S., & Hakkinen, T. (2014). Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner production*, 153-162.
- Deutsches Institut Bauen und Umwelt e.V. (2007). *Environmental Product Declaration FOAMGLAS®-slabs and elements*. Pittsburgh Corning Europe NV.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2016, September 14). Klimaendringer stiller byggsektoren overfor store utfordringer. Hentet fra <https://dibk.no/verktoy-og-veivisere/andre-fagomrader/klimatilpasning-og-sikkerhet-mot-naturpakjeninger/klimaendringer-stiller-byggsektoren-overfor-store-utfordringer/>
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Hentet fra <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17>
- Edvardsen, K. I., & Ramstad, T. (2014). *Håndbok 5 Trehus*. Trondheim: SINTEF akademisk forlag.
- Elvebakk, K., Time, B., Skjeldrum, P. M., & Kvande, T. (2018). *Ombygging til blågrønne og blågrå tak*. Trondheim: Klima 2050, SINTEF Building and Infrastructure.
- EPD-Norge. (u.d.). *Bruksanvisninger i hvordan tolke EPD'er - Isolasjon*. Hentet 19. mai 2020 fra EPD-Norge.no: <https://www.epd-norge.no/getfile.php/136576-1470750836/Dokumenter/Bruksanvisninger%20tolke%20EPDer/Bruksanvisning%20for%20EPD%20-%20isolasjon.pdf>
- EPD-Norge. (u.d.). *Bruksanvisninger i hvordan tolke EPD'er - Taktekking*. Hentet 19. mai 2020 fra EPD-Norge.no: <https://www.epd-norge.no/getfile.php/136579-1470750886/Dokumenter/Bruksanvisninger%20tolke%20EPDer/Bruksanvisning%20for%20EPD%20-%20taktekking.pdf>
- Erasmus University Library. (2019). *Search methods & techniques: Search methods*. Hentet november 12, 2019 fra <https://libguides.eur.nl/informationsskillssearchmethods/methods>
- Espinoza, O., Rodriguez, T., Mallo, M. F., & Buehlmann, U. (2016, Februar). Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe. *BioResources 11 issue 1*, ss. 281-295.
- Evans, F. G. (2009). *Fokus på tre nr. 51. Soppskader på tre*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.

- Foamglas. (2020). *Our Product*. Hentet juni 7., 2020 fra Foamglas.com: <https://www.foamglas.com/en-gb/about-owens-corning-foamglas/our-product>
- FOAMGLAS Nordic AB. (2010). *Insulation systems for flat roof*. FOAMGLAS Nordic AB.
- FOAMGLAS Nordic AB. (2013). *Celleglassisolering i bygninger*. Owens Corning.
- FOAMGLAS Nordic AB. (2016). *Kompakttak på bærelag av tre*. FOAMGLAS Nordic AB.
- FOAMGLAS Nordic AB. (2020, 04. mai). *FOAMGLAS® T4+*. Hentet fra <https://no.foamglas.com/nb-no/produkter/produktoversikt/foamglas-blokk/foamglas-t4>
- Fraunhofer IBP. (2009, juli 8). *Moisture Transport in Building Materials*. Hentet mai 05, 2020 fra wufi-wiki: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>
- Fraunhofer IBP. (u.d.). *Information on the inclusion of data in the WUFI database*. Hentet mai 25, 2020 fra WUFI: <https://wufi.de/en/service/service/wufi-database/#:~:text=The%20WUFI%C2%AE%20material%20database,measurements%20from%20independent%20test%20laboratories.&text=The%20material%20data%20required%20for,on%20the%20type%20of%20material>.
- Fraunhofer IBP. (u.d.). *Moisture Storage Function*. Hentet fra WUFI Pro 6.4 online help: Interaktiv hjelpesfunksjon i WUFI
- Fufa, S. M. (2019). *EPD - Glava glassull*. EPD-Norge.
- Fufa, S., Schlanbusch, R., Sørnes, K., Inman, M., & Andresen, I. (2016). *A Norwegian ZEB Definition Guideline*. Trondheim: ZEB .
- Gagnon, S., Bilek, E., Podesto, L., & Crespell, P. (2013). *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*. Pointe-Claire: FPIInnovations.
- Geving, S., & Holme, J. (2010). The Drying Potential and Risk for Mold Growth in Compact Wood Frame Roofs with Built-in Moisture. *Journal of Building Physics - J BUILD PHYS*. 33, 249-269. doi:10.1177/1744259109351441
- Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger - Håndbok 50*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Geving, S., Holme, J., & Uvsløkk, S. (2010). *Prosjektrapport 65. Alternative dampsperrer med uttøringsmulighet mot innelufta*. Trondheim: Sintef Byggforsk.
- Glasopor. (u.d.). *Glasopor skumglass 10-60, veiledning til bruk av glasopor skumglass*. Glasopor.
- Glass, S. V., Wang, J., Easley, S., & Finch, G. (2013). *Chapter 10: Enclosure - Building enclosure design for cross-laminated timber construction*. *CLT Handbook: cross-Laminated timber*. FPIInnovations and Binational Softwood Lumber Council. Hentet 11 29, 2019 fra https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2013/fpl_2013_glass001.pdf
- GLAVA AS. (u.d.). *glava.no*. Hentet 08. juni 2020 fra <https://www.glava.no/kompakte-tak/losninger/oppbygging-og-u-verdier-av-tak/glava-robust-lamell-pa-massivtre/>
- Google. (2020, 05. mai). *Google Maps*. Hentet fra <https://www.google.no/maps/dir/Albertkade+1,+3980+Tessengerlo,+Belgia/Oslo/@55.3567191,4.6540617,6z/data=!3m1!4b1!4m16!4m15!1m5!1m1!1s0x47c130a9485fd1c1:0xba8ff21366baf264!2m2!1d5.1617764!2d51.0720558!1m5!1m1!1s0x46416e61f267f039:0x7e92605fd3231e9a!2m2!1d>

- Gustavsen, A. (2019, november 9). *Fuktmekanikk*. Hentet mars 31, 2020 fra Bygningsfysikk.no: <http://www.bygningsfysikk.no/Fuktmekanikk.php>
- Gustavsen, A., Thue, J. V., Blom, P., Dalehaug, A., Aurlien, T., Grynning, S., & Uvsløkk, S. (2008). *Prosjektrapport 25. Kulderbroer - beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. Trondheim: Sintef Byggforsk.
- Hammarberg, C. (2014). *EPD - Paroc Insulation, product group with density >120 kg/m³*. EPD-Norge.
- Hammarberg, C. (2014). *EPD-Paroc Insulation, product group with density <70 kg/m³*. EPD-Norge.
- Hindklev, J. (2017, september 06). *Nordisk Massivtre åpnet ny fabrikk*. Hentet fra Byggeindustrien: <http://www.bygg.no/article/1322815>
- Holme, J. (2010). *Mould growth in buildings*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Homb, A. (2017, mai 8). *Ny kunnskap om lydisolering i trekonstruksjoner*. Hentet fra Sintef: <https://www.sintef.no/siste-nytt/ny-kunnskap-om-lydisolering-i-trekonstruksjoner/>
- Hurley, J. (2003). *A UK Market Survey For Foamglas*. Banbury: WRAP - The Waste and Resources Action Programme.
- IEA. (2018). *Global Status Report - Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Global Alliance for Buildings and Construction.
- Institut Bauen and Umwelt e.V. (IBU). (2015). *EPD - Foamglas T4+*. Institut Bauen and Umwelt e.V. (IBU).
- Isola. (2019). *Intelligent dampsperre med variabel vanndampmotstand*. Hentet 12 15, 2019 fra <https://www.isola.no/produkter/tak/dampsperre/dampsp-airguard-smart2-1-damp5x50m>
- iTRE. (2020). *Massivtre*. Hentet fra iTRE.no: http://www.itre-as.no/?page_id=10
- Jauk, G., & Höfler, S. (2019, november 05). *Timber-online*. Hentet mars 20, 2020 fra 100,000 m³ cross-laminated timber factories as default?: <https://www.timber-online.net/holzprodukte/2019/11/100000-m3-cross-laminated-timber-factories-as-default.html>
- Kelly, M. (2014). *Insulation – Materials, Science and Application - Unit 6: Cellular Glass or Foamed Glass*. SOLAS.
- Kilde, V. (2011). *Fokus på tre nr. 28. Gran*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Klima- og miljødepartementet. (2019). *Klimaendringer og norsk klimapolitikk*. Hentet 5. mars 2020 fra <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/>
- Kolbeinsen, L. (2019). *snl.no*. Hentet fra <https://snl.no/sintring>
- Kommunal- og regionaldepartementet. (2009). *Bygg for framtida*. Kommunal- og regionaldepartementet.
- Kristensen, T. (1999). 45: Bygningselementer av massivtre. *Norsk Treteknisk Institutt*.
- Krokstad, M. A., & Mortensen, E. A. (2020). *EPD - Armeringsprodukter fra Kamstål AS*. EPD-Norge.
- Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik.

- Landbruks- og matdepartementet. (2018). *Bruk av tre*. Hentet 5. mars 2020 fra <https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/skog-og-utmarksressurser/innsikt/bruk-av-tre/id2009518/>
- Life Cycle Engineering, & European Waterproofing Association AISBL. (2014). *EPD - Single layer fully torched modified bitumen roof waterproofing system*. EPD-Norge.
- Lukacs, I., Björnfot, A., & Tomasi, R. (2019). Strength and stiffness of cross-laminated timber (CLT) shear walls: State-of-the-art of analytical approaches. I *Engineering Structures*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.126>
- Melvær, M. S., & Brekke, A. (2016). *Sundolitt XPS*. EPD-Norge.
- Menoufi, K. A. (2011). *Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art*. Lleida: Universitat de Lleida.
- Miljødirektoratet. (2013). *Miljøstatus i Norge - Miljøutfordringer før og nå*. miljøstatus.no.
- Miljødirektoratet. (2019). *Miljøstatus*. Hentet fra <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/klimaendringer-i-norge/>
- Nordby, A. S., Solli, C., & Dahlstrøm, O. (2015). *Helhetlig miljøvurdering av byggematerialer*. Husbanken.
- Nordisk Massivtre. (2019). *Nordisk Massivtre*. Hentet fra Våre produkter: <http://nordiskmassivtre.no/vare-produkter/>
- Norén, A. e. (1999, Mars). The Effect of Thermal Inertia on Energy Requirement in a Swedish Building - Results Obtained with Three Calculation Models. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol. 1*. Hentet fra researchgate.net/profile/Jan_Akander/publication/284697267_The_effect_of_thermal_inertia_on_energy_requirement_in_a_Swedish_building_-_Results_obtained_with_three_calculation_models/links/5cd08ed8299bf14d957cc712/The-effect-of-thermal-inertia-on-energy-re
- Noreng, K. (2017). *TPF NR. 11 Terrasser for persontrafikk over oppvarmet rom*. Trondheim: Takprodusentenes Forskningsgruppe.
- Noreng, K., & Gaarder, J. E. (2019). *TPF NR. 10 Grønne tak. Bygningsmessige aspekter ved prosjektering og bygging av grønne tak*. Trondheim: Takprodusentenes Forskningsgruppe.
- Noreng, K., & Kvalvik, M. (2013). Unngå byggskader ved bygging av sedumtak. *Byggfakta*.
- Noreng, K., Brevik, B. G., & Jelle, B. (2008). *En temaveileder. Flate tak; Om utførelse av flate, aktive tak : En sammenfatning av preaksepterte løsninger med eksempler på utførelse*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Noreng, K., Kvalvik, M., Busklien, J., Ødegård, I., Clewing, C., & French, H. (2012). *Prosjektrapport 104 Grønne tak - Resultater fra et kunnskapsinnhentingsprosjekt*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Norsk Standard. (2010). *Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarete og praktiske termiske verdier (ISO 10456:2007)*. Standard Norge.
- Nøstdal, P. L., & Heen, P.-I. (2017, november 21). *Massivtre eller betong*. Hentet fra <http://veidekke.no/incoming/article26272.ece/binary/Betong%20eller%20massivtre.pdf>

- Nygaard, M., Sunter, C., & Flindall, O. K. (2016, desember 18). *Et gjennombrudd for massivtre*. Hentet fra Arkitektur N: <https://arkitektur-n.no/artikler/et-gjennombrudd-for-massivtre>
- O'Brien, A., & Mc Guckin, C. (2016). The systematic literature review method: Trials and tribulations of electronic database searching at doctoral level. SAGE Research Methods cases. doi:<https://dx.doi.org/10.4135/978144627305015595381>
- One Click LCA. (2015). *Bitumen emulsion (40% bitumen, 60% water); 40% bitumen, 60% water*. Helsinki: Binova Ltd.
- One Click LCA. (2015). *Geotextile from polypropylene, 300 g/m²*. One Click LCA.
- Oslo Kommune. (2013). *Strategi for overvannshåndtering i Oslo*. Oslo.
- Papadopoulos, A. (2004). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. I *Energy and Buildings* 37 (ss. 77-86). Thessaloniki: Department of Mechanical Engineering, Aristotle University.
- PAROC. (u.d.). *paroc.se*. Hentet 08. juni 2020 fra <https://www.paroc.se/losningar/byggisolering/laglutandetak/grona-tak>
- Plackner, H. (2015, februar 11). *Holzkurier*. Hentet mars 20, 2020 fra Brettsperrholz wächst global: https://www.holzkurier.com/schnittholz/2015/02/brettsperrholz_waechstglobal.html
- Produktfakta. (2015, Oktober 27). *Celleglassisolasjonen foamglas er det eneste isolasjonsmaterialet som innfrir*. Hentet fra Produktfatka.no: <https://www.produktfakta.no/celleglassisolasjonen-foamglas-er-det-eneste-isolasjonsmaterialet-som-innfrir-92496/nyhet.html>
- Reitan, N. K., Friquin, K. L., & Mikalsen, R. F. (2019). *Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger - en litteraturstudie*. Trondheim: RISE Research Institutes of Sweden.
- Rockwool. (u.d.). HardRock ENERGY - En ny generasjon systemtak. Hentet 8. juni 2020 fra <https://cdn01.rockwool.no/siteassets/o2-rockwool/dokumentasjon-og-sertifikater/brosjyrer/utvendigtak/hardrock-energy-systemtak.pdf?f=20190201024206>
- Rønning, A., Prestrud, K., Saxegård, S., Haave, S., & Lysberg, M. (2019). *Klimagassregnskap av tre- og betongkonstruksjoner. Østfoldforskning*.
- Saeed, Y. (2017). *Studie av skumglass-isolasjon. Egenskaper, bruksområder og erfaringer ved prosjektering, montasje og bruk*. Tromsø: UiT Norges arktiske universitet.
- Scarinci, G., Brusatin, G., & Bernardo, E. (2004). Glass foams. I M. Scheffer, & P. Colombo, *Cellular Ceramics - Structure, Manufacturing, Properties and Applications* (ss. 158-176). Pennsylvania: Wiley-VCH.
- Schafaczek, B., & Zirkelbach, D. (2013). *Guideline for the calculation of extensive green roofs*. Holzkirchen: Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP).
- Sedal, H. (2015). *EPD - Gram Dampsperre*. EPD-Norge.
- Sintef Certification. (2011, 11 02). *Teknisk godkjenning nr. 20100. Martinsons KL-trä*. Hentet fra <https://www.sintefcertification.no/Product/Index/2305>
- Sintef Certification. (2019, oktober 07.). *Teknisk godkjenning nr. 20712. Splitkon krysslimt tre*. Hentet fra <https://www.sintefcertification.no/Product/Index/10184>
- Skjeggerud, M. G., & Amundsen, M. L. (2019). *EPD - B30 M60 D22, Vibrerbar betong*. EPD-Norge.

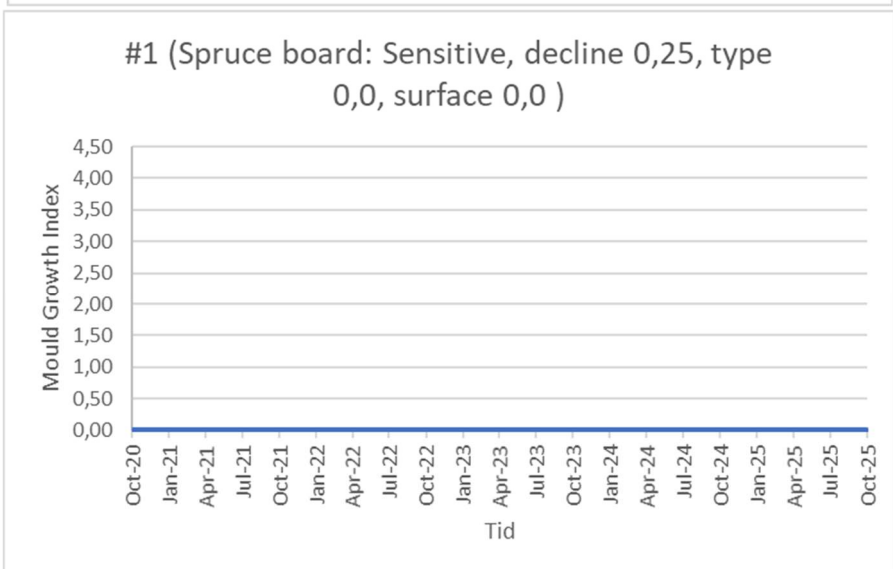
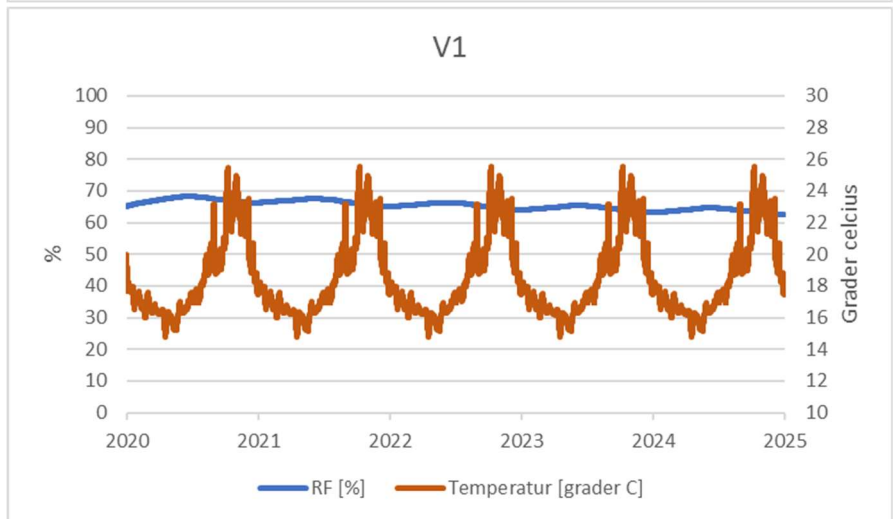
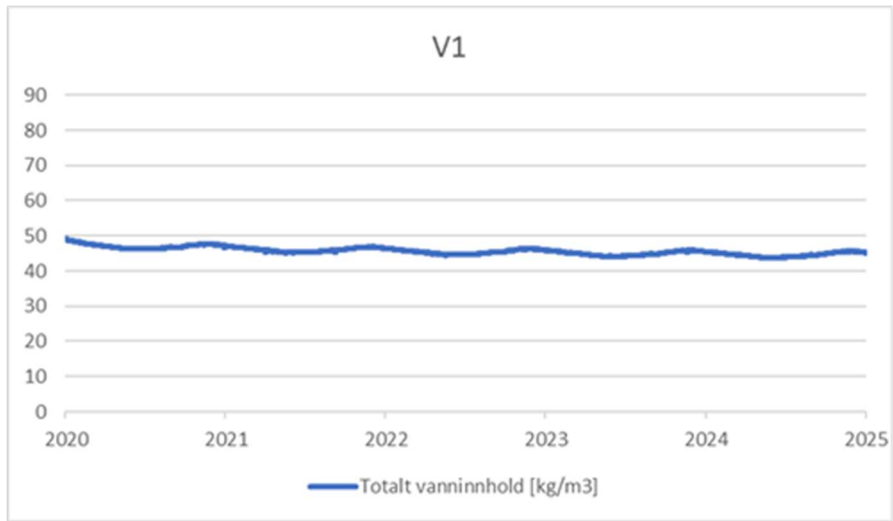
- Skjeldrum, P. M. (2016). *Ombygging til Blågrønne Tak*. Trondheim: Norges Teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Skogstad, H. B., Gullbrekken, L., & Uvsløkk, S. (2011). *Prosjektrapport 81. Massivtre - Luftgjennomgang og behov for sperresjikt*. Trondheim: Sintef Byggforsk.
- Solli, K. H., & Glasø, G. (2011). *Fokus på tre nr. 27. Trebaserte konstruksjonselementer*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Splitkon. (2020). *KL-Tre - Krysslimt tre*. Hentet fra Splitkon.no: <https://splitkon.no/produkter/kl-tre-massivtre/>
- SSB. (2019, April 3). *Avfallsregnskap for Norge, avfallsmengder etter kilde*. Hentet fra ssb.no: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/avfregno>
- Standard Norge. (u.d.). Hentet fra <https://www.standard.no/>
- Standard Norge. (2006, September). *NS-EN ISO 14040:2006. Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipper og rammeverk (ISO 14040:2006)*. Standard Norge. Hentet fra Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske .
- Standard Norge. (2006). *NS-EN ISO 14044:2006. Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer*. Standard Norge. Hentet fra Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske .
- Standard Norge. (2010, april). *NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010. Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske egenskaper. Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier*. Standard Norge. Hentet fra Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske .
- Standard Norge. (2011). *NS-EN ISO 15942:2011. Bærekraftige byggverk Miljøvaredeklarasjoner Kommunikasjonsformat bedrift til bedrift*. Standard Norge. Hentet fra Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske .
- Statens vegvesen. (2015). *vegvesenet.no*. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/forskning+og+utvikling/Avsluttede+FoU-program/gjenbruksprosjektet/Materialer/lette-fyllmasser>
- Stellander, M. (2012). *Smarte dampsperrer med uttørkingsmulighet mot*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Stora Enso. (2013). *clt.info*. Hentet 05 14, 2020 fra <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2017/09/CLT-by-Stora-Enso-Technical-manual-NO.pdf>
- Sundolitt. (2020). *EPS plateprodukter*. Ålesund: Brødr. Sunde AS. Hentet fra <https://www.sundolitt.com/globalassets/inriver/resources/brosjyre-eps-04.20.pdf>
- Takprodusentenes forskningsgruppe. (2019). *TPF NR. 6 Branntekniske konstruksjoner for tak*. Trondheim: Takprodusentenes Forskningsgruppe.
- Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk - grunnlag*. Trondheim: Fagbokforlaget.
- Time, B., Geving, S., Friquin., K. L., Grynning, S., Noreng, K., & Sandland, K. M. (2008). *Prosjektrapport 30. Tak Basert på massivtreelementer*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Time, B., Geving, S., Friquin., K. L., Grynning, S., Noreng, K., & Sandland, K. M. (2008). *Prosjektrapport 30. Tak Basert på massivtreelementer*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Tjora, A. (2010). *Kvalitative forskningsmetoder i praksis*. Norge: Gyldendal Norsk Forlag AS.

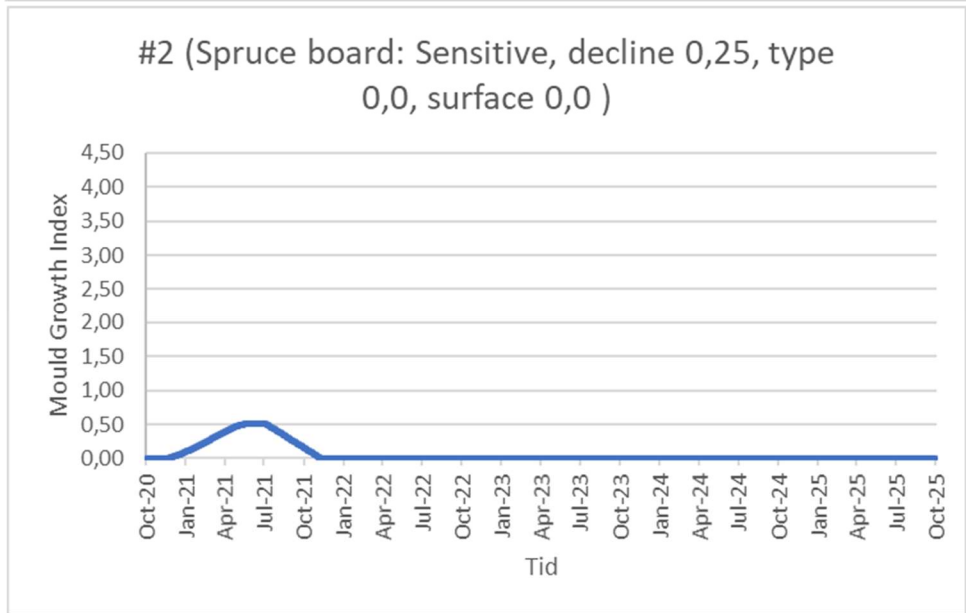
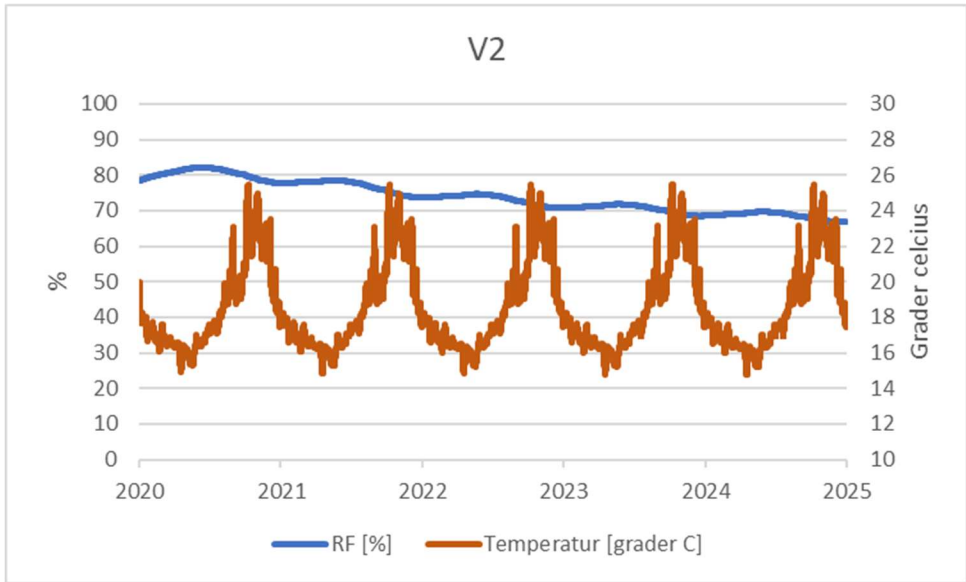
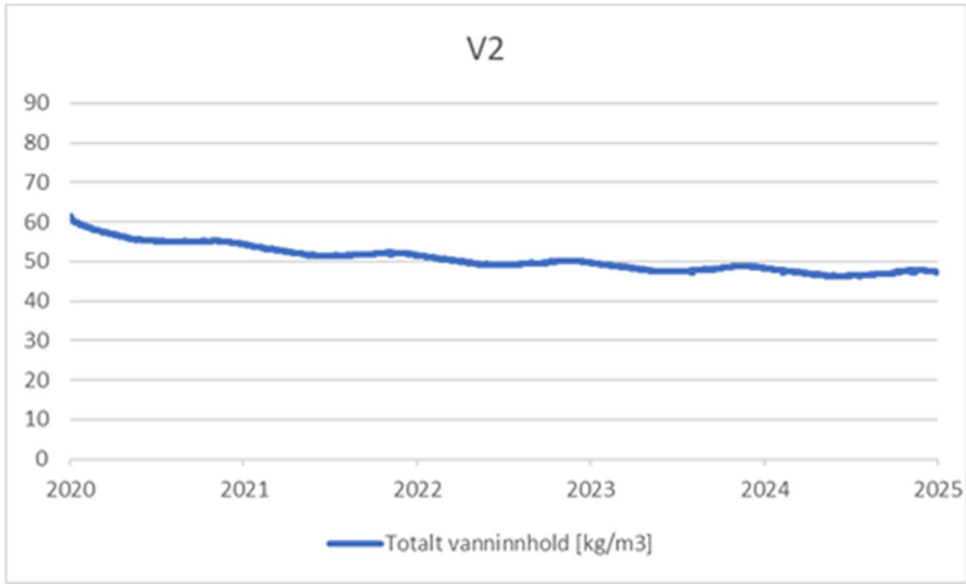
- Tronstad, S. (2006). *Fokus på tre nr. 38. Trefuktighet – tørking*. Oslo: Norsk Treteknisk institutt.
- Uvsløkk, S. (2008). *Prosjektrapport 19. Selvtørringsmekanismer for kompakte tak*. Trondheim: Sintef Byggforsk.
- Vereecken, E., Saelens, D., & Roels, S. (2011). A COMPARISON OF DIFFERENT MOULD PREDICTION MODELS . *12th Conference of International Building Performance Simulation Association* (ss. 1934-1941). Sydney: International Building Performance Simulation Association.
- Viitanen, H., & Ojanen, T. (2007). Improved model to predict mould growth in building materials. *10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference*. Atlanta: ASHRAE.
- Viitanen, H., Ojanen, T., Krus, M., Eitner, V., Bögl, S., & Zirkelbach, D. (2019, oktober). *WUFI Mould Index VTT Help*. Hentet fra Wufi Mould Index VTT 2.1.4 .
- Wahlstrøm, S. (2019). *Anvisning for massivtrebygging*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Weigl, D. M., Page, K. R., Organisciak, P., & Downie, J. S. (2017). *Information-Seeking in Large-Scale Digital Libraries*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Wohlin, C. (2014). *Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering*. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology .
- Yin, R. K. (2009). I *Case Study research: design and methods 5th edition* (ss. 98-125). United States of America: Sage Publications, Inc.
- Zirkelbach, D. (2017). *GREEN ROOFS – HYGROTHERMAL SIMULATION OF MOISTURE AND ENERGY PERFORMANCE*. Holzkirchen: Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP).

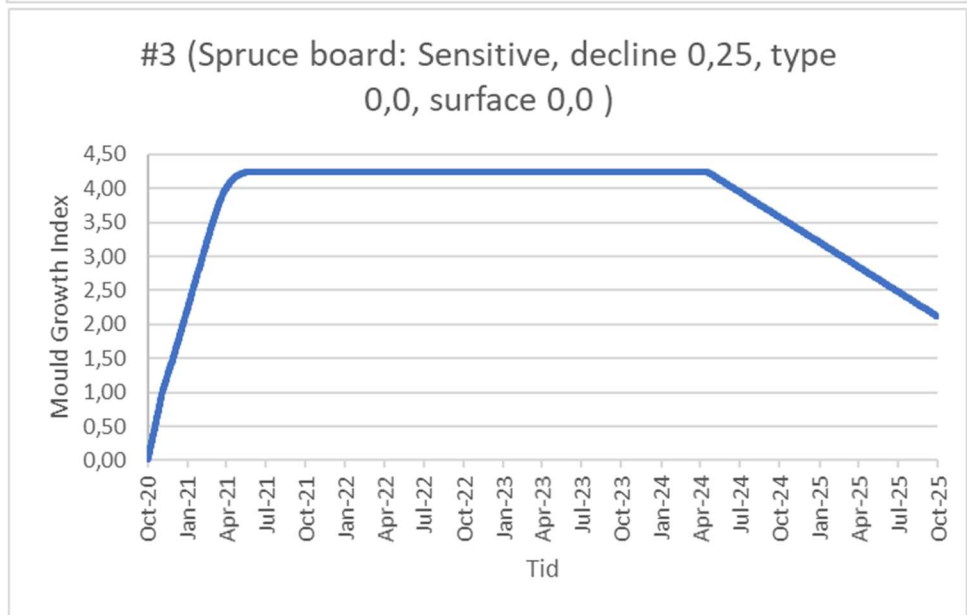
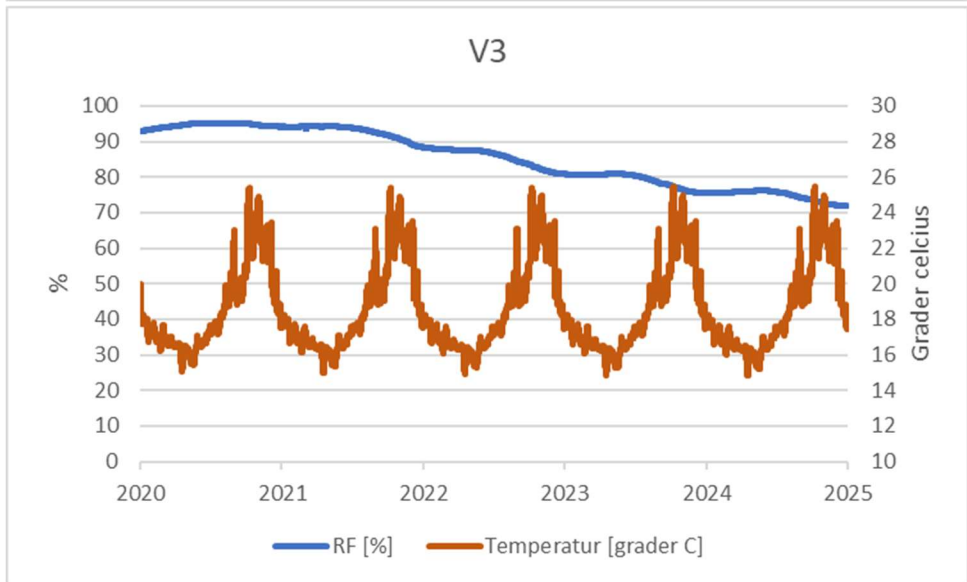
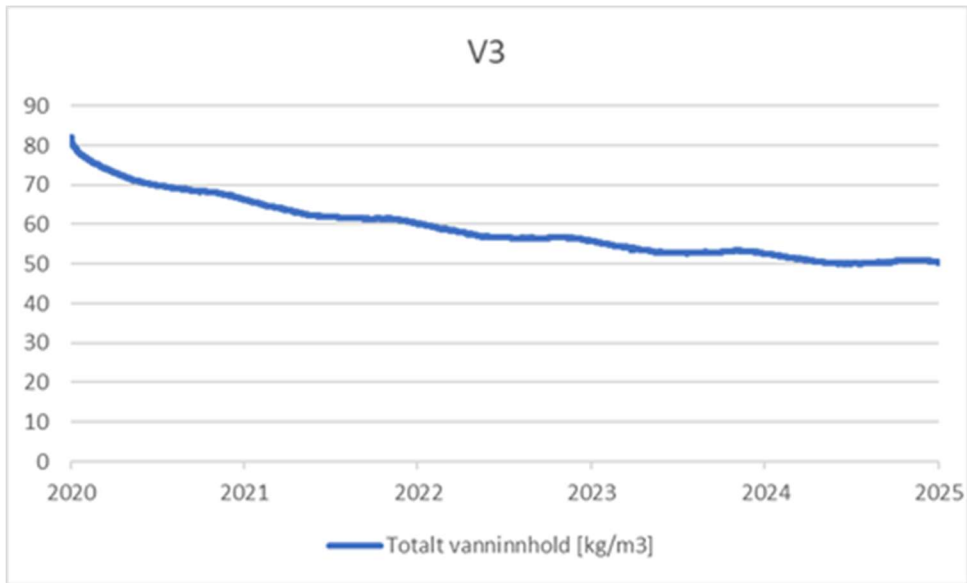
Vedlegg

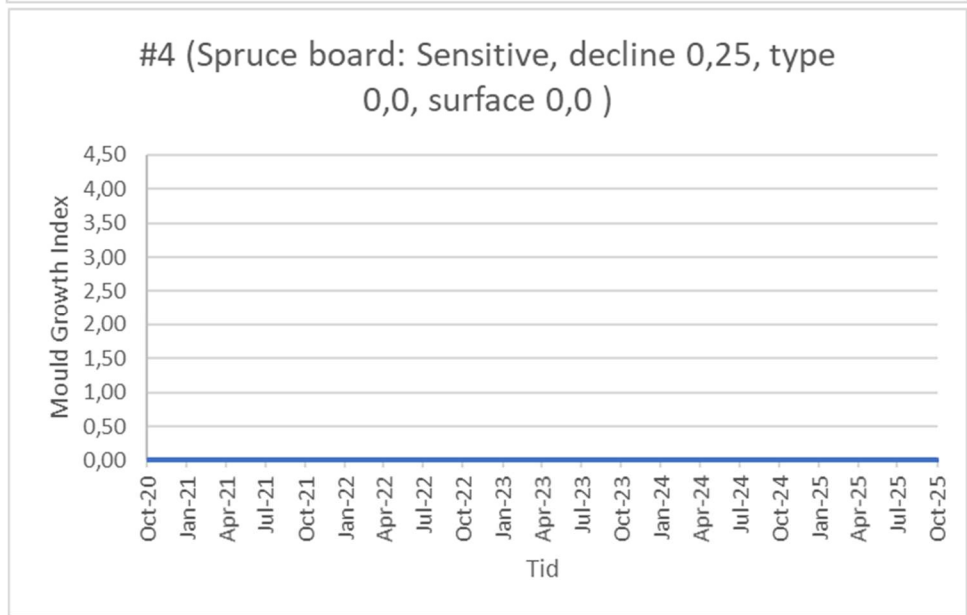
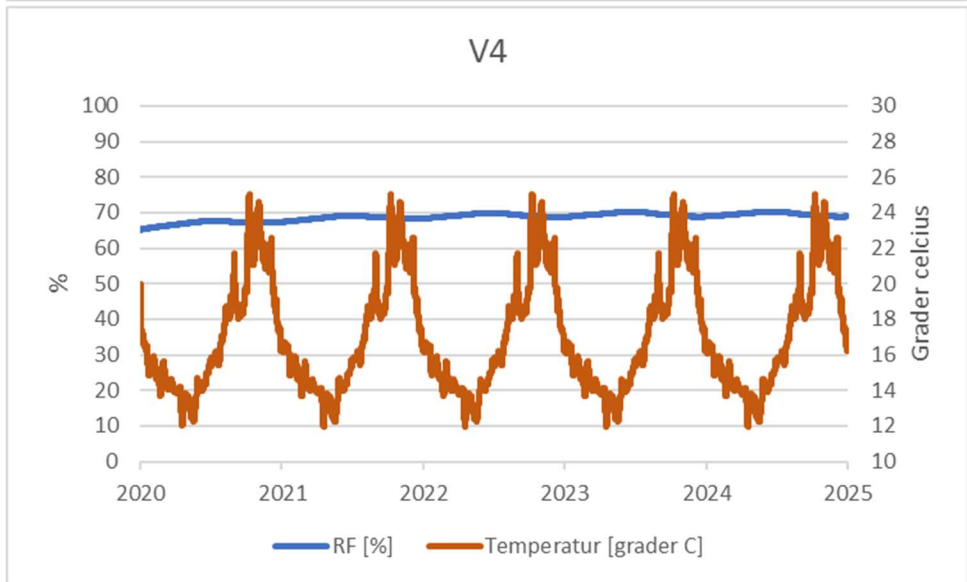
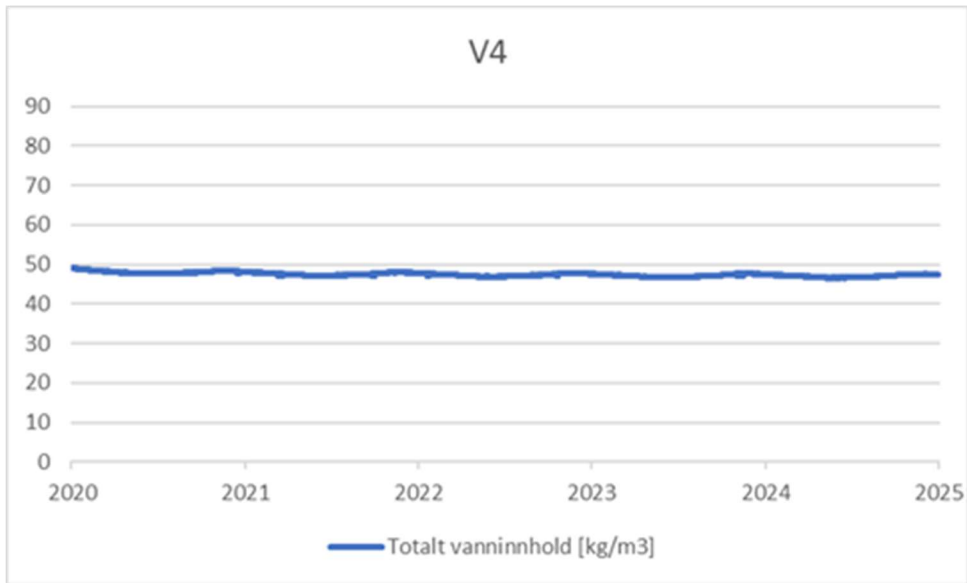
1. WUFI – resultater V1-V25
2. WUFI – materialdata og randvilkår
3. U-verdiberegning
4. GWP per oppbygning
5. GWP per materiale
6. Mengder og omgjøringsfaktorer miljøanalyse

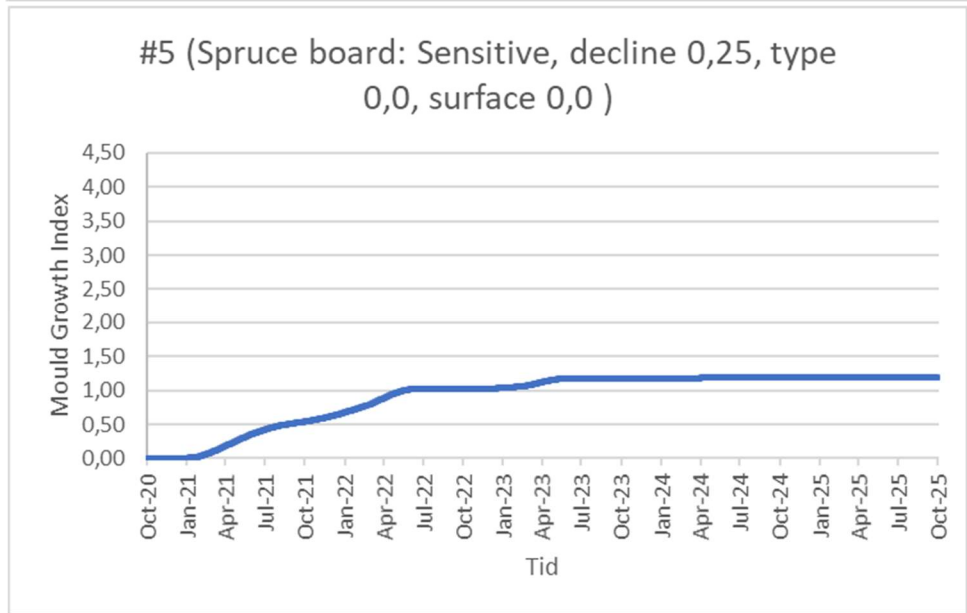
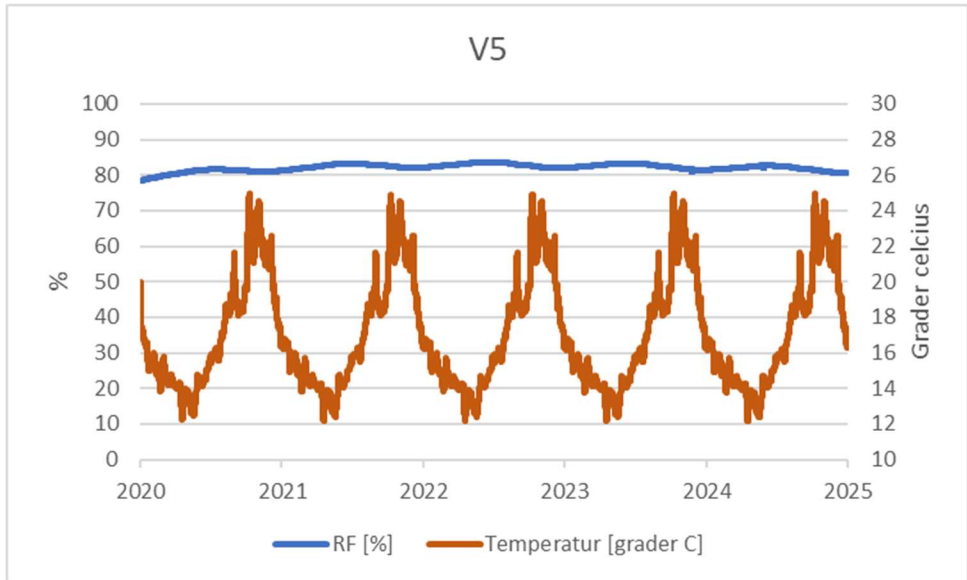
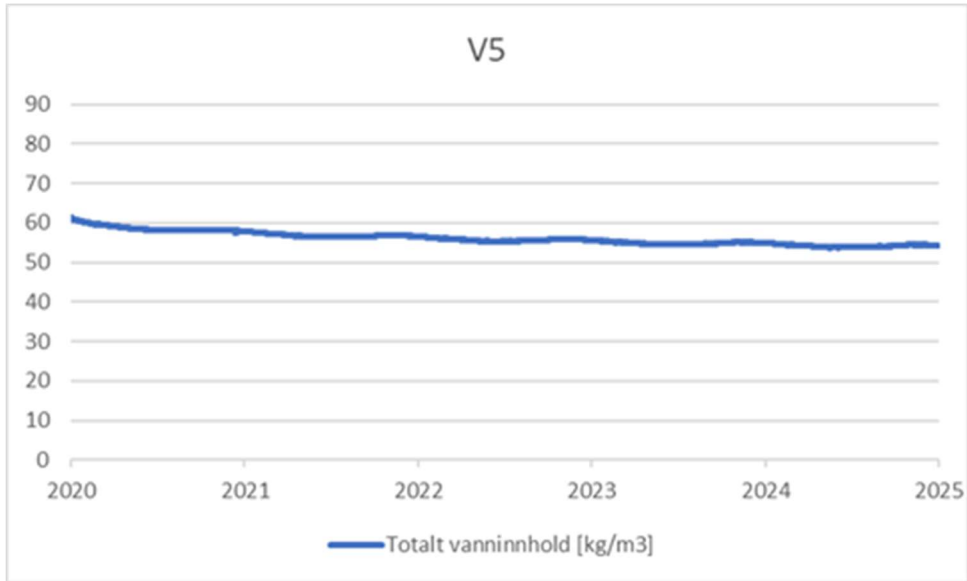
Vedlegg 1 – WUFI – resultater V1-V25

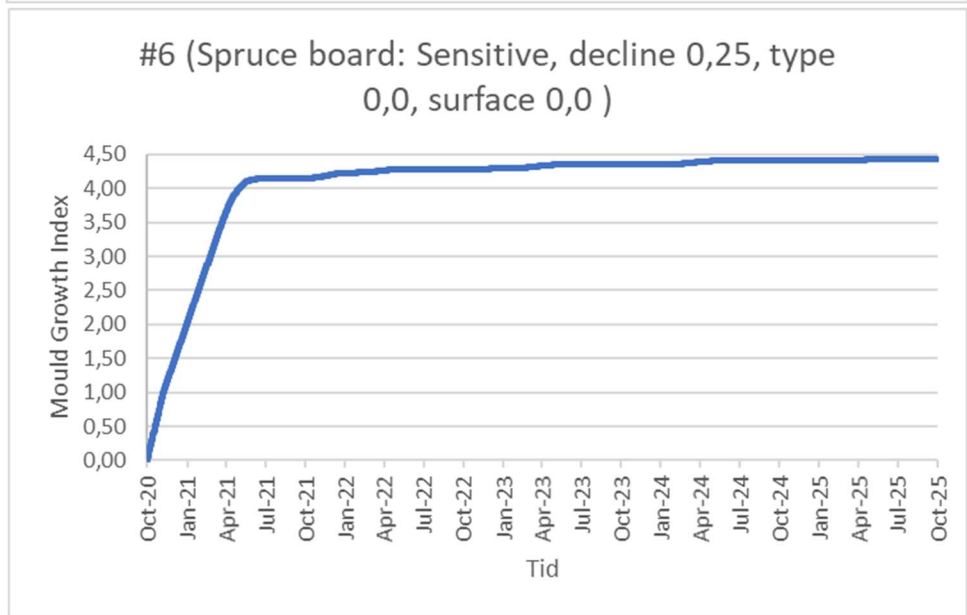
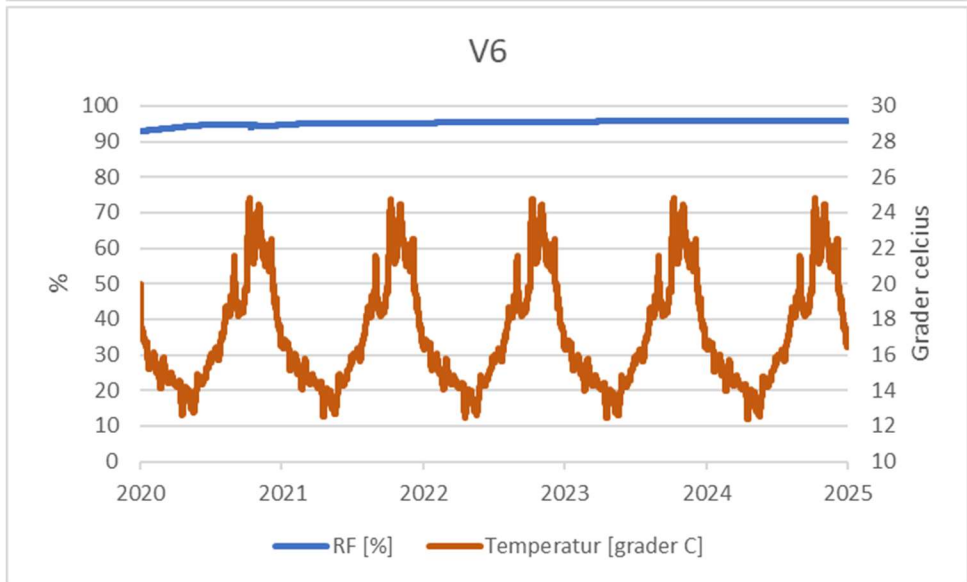
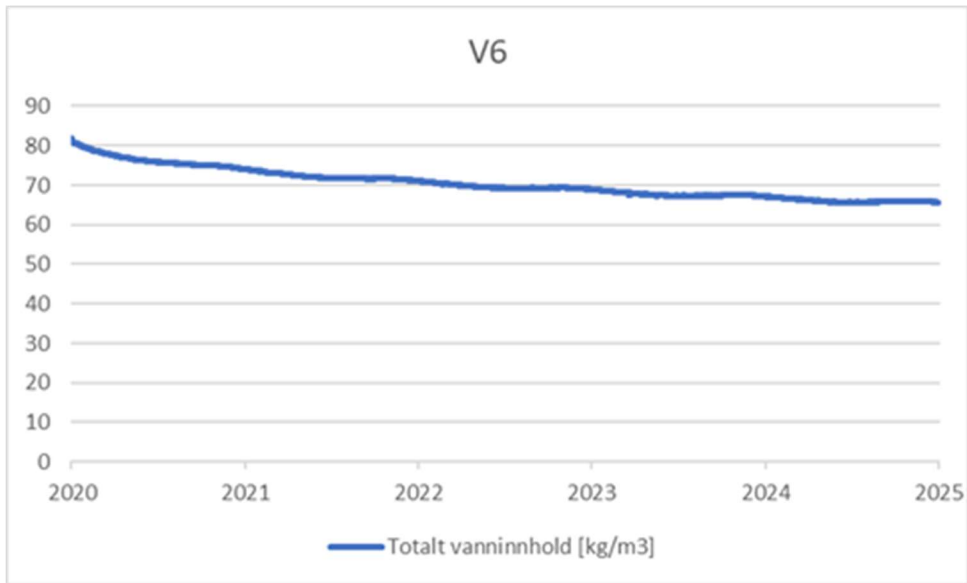


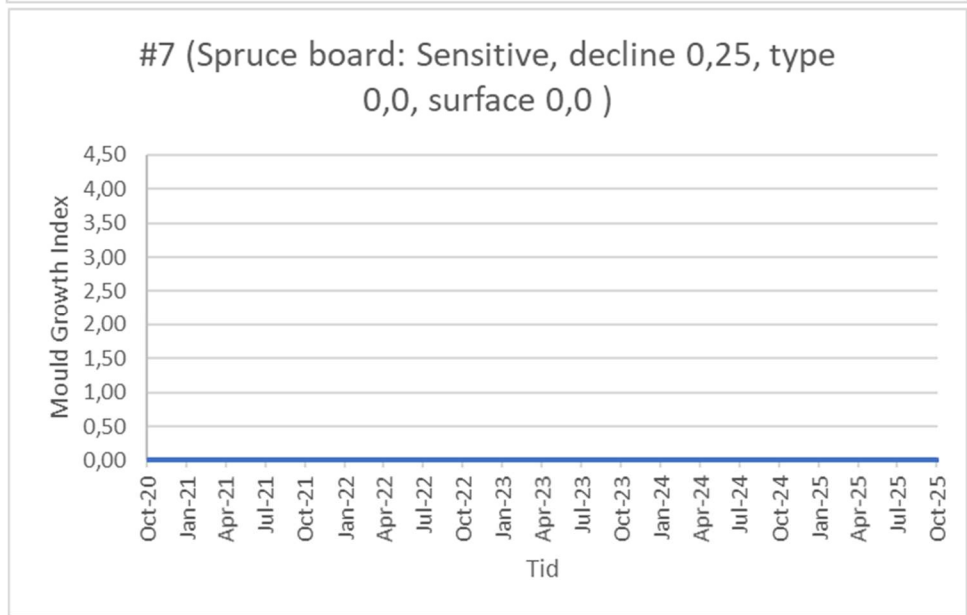
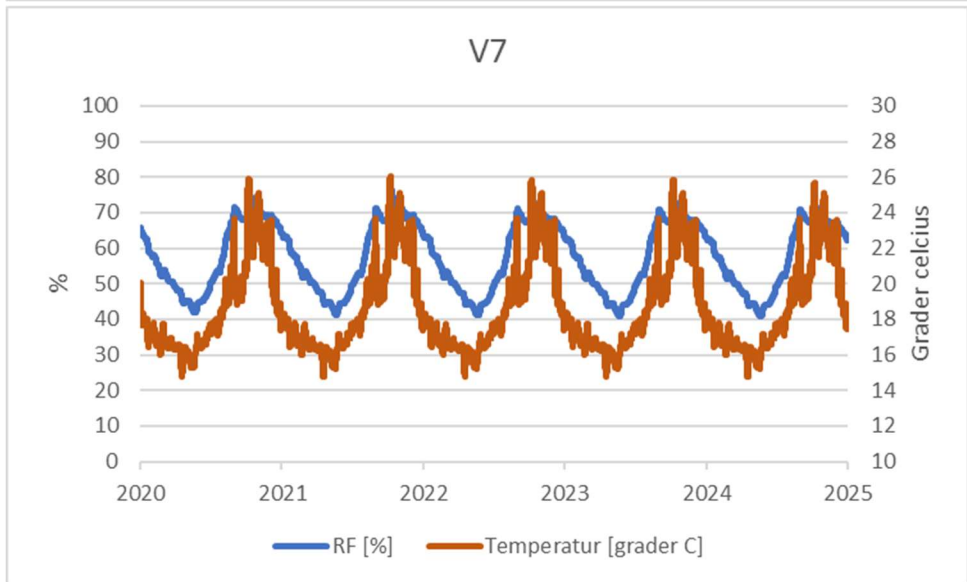
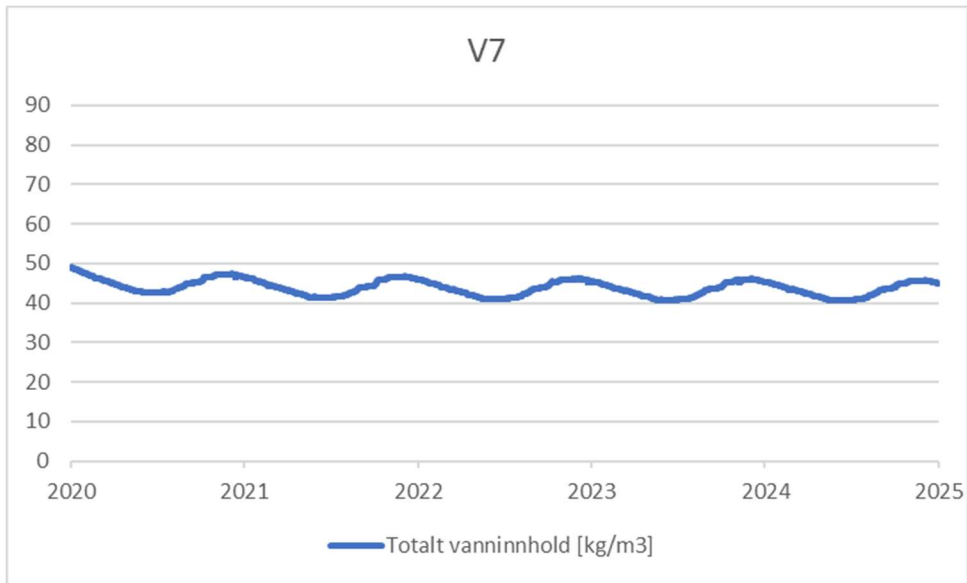


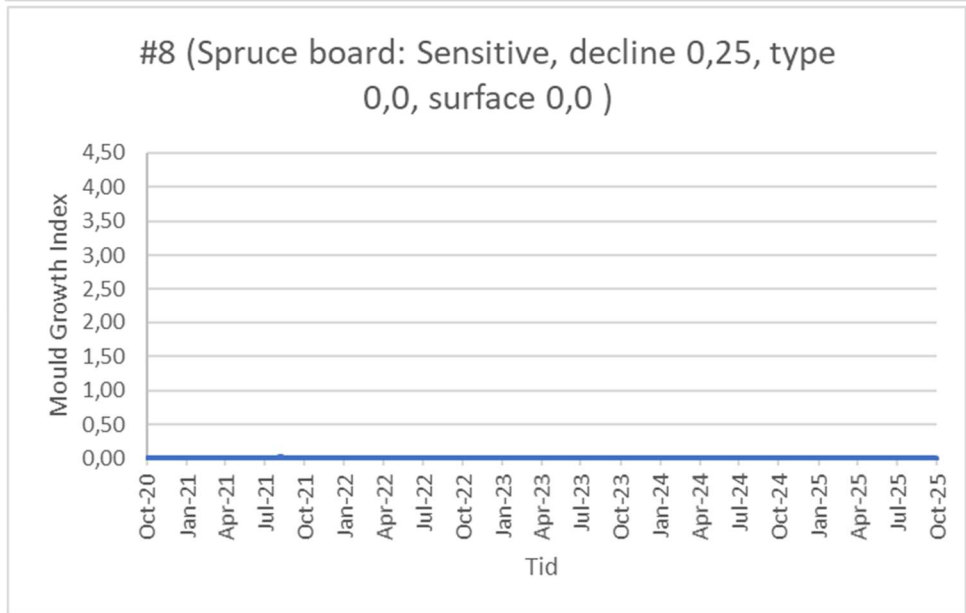
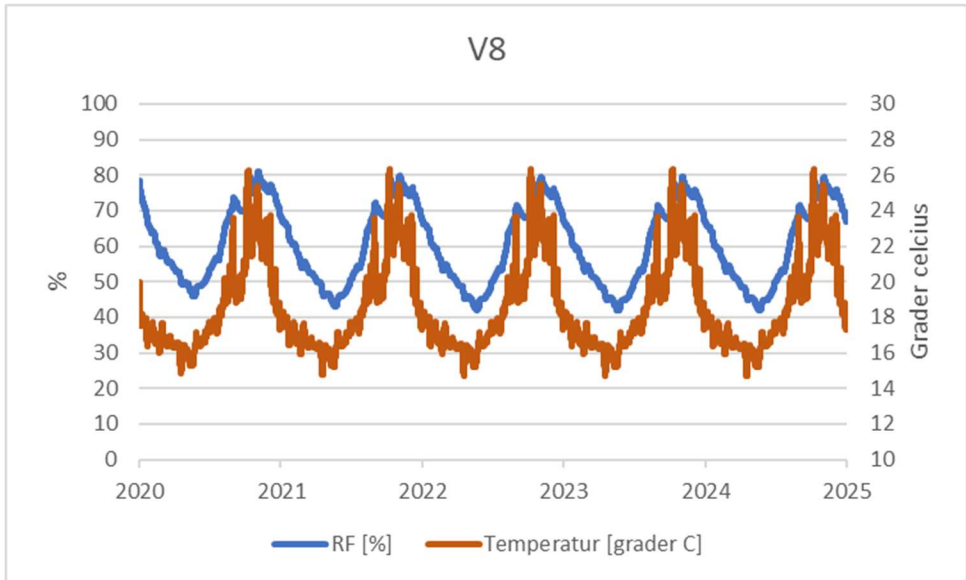
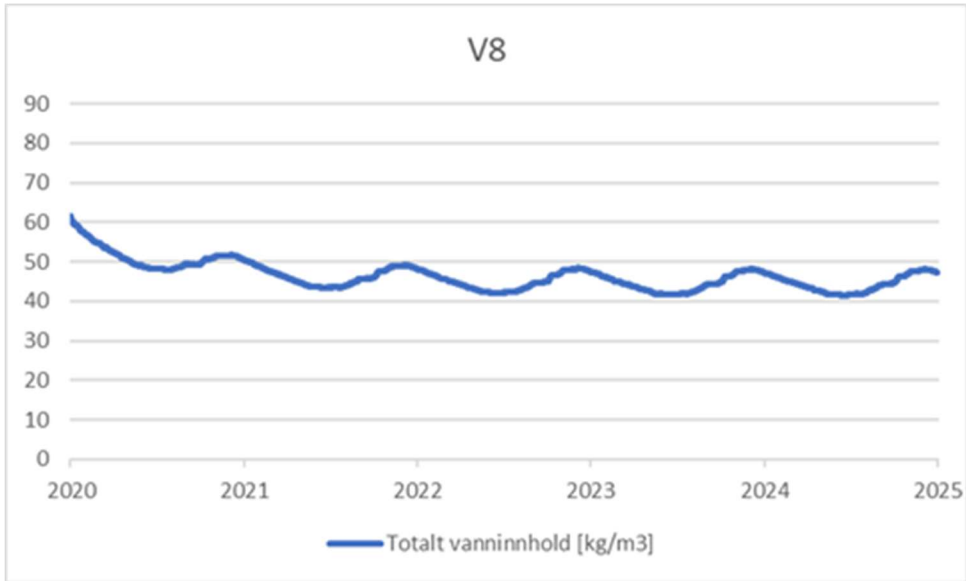


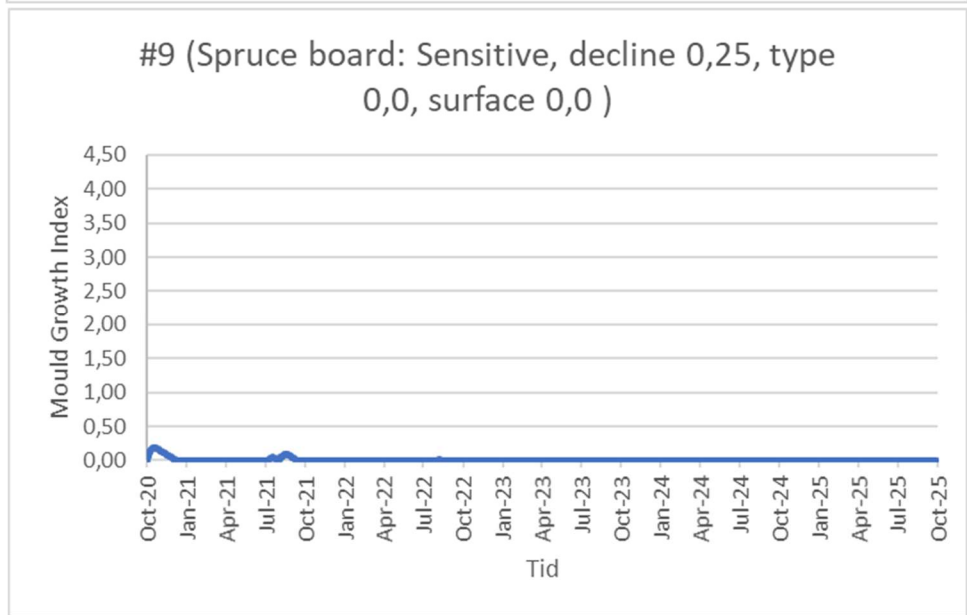
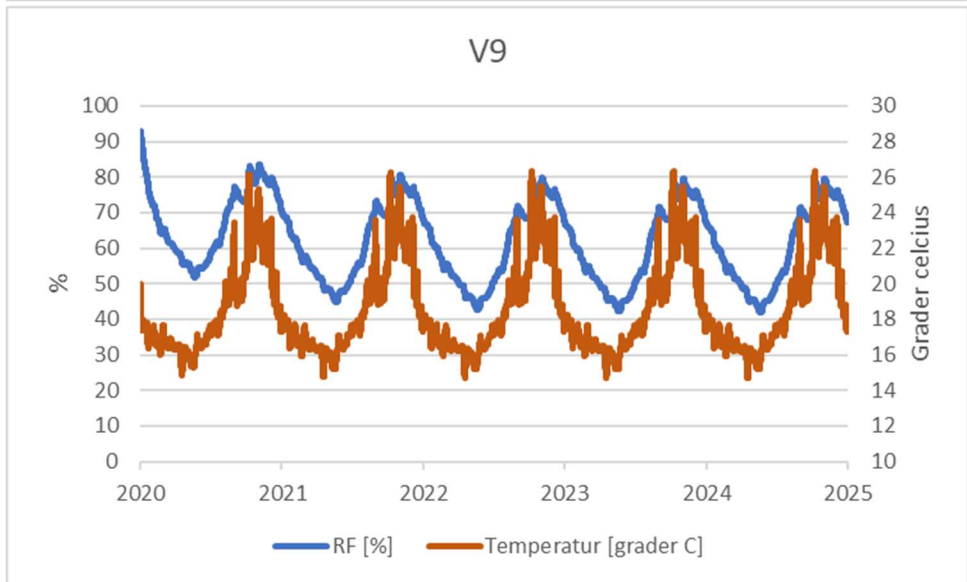
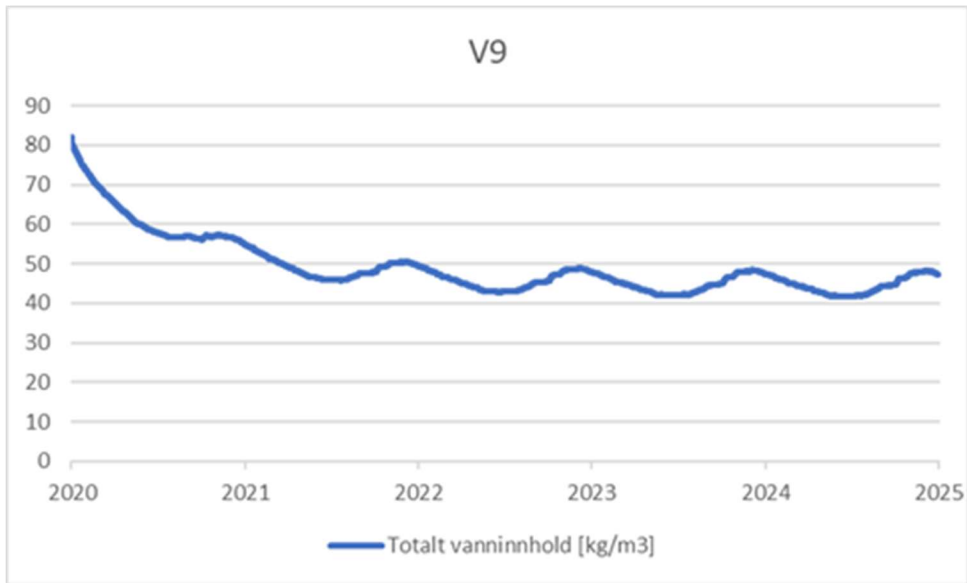


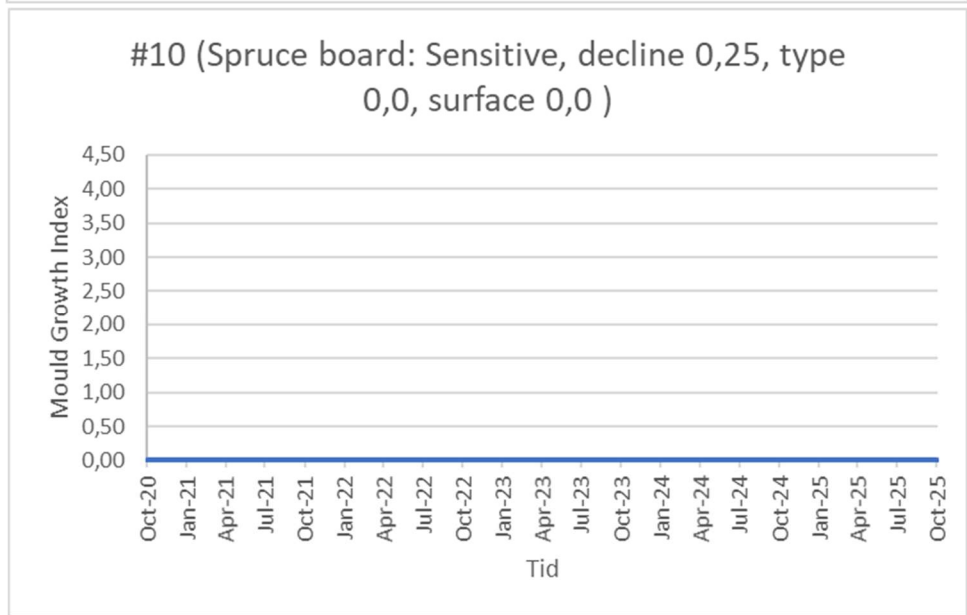
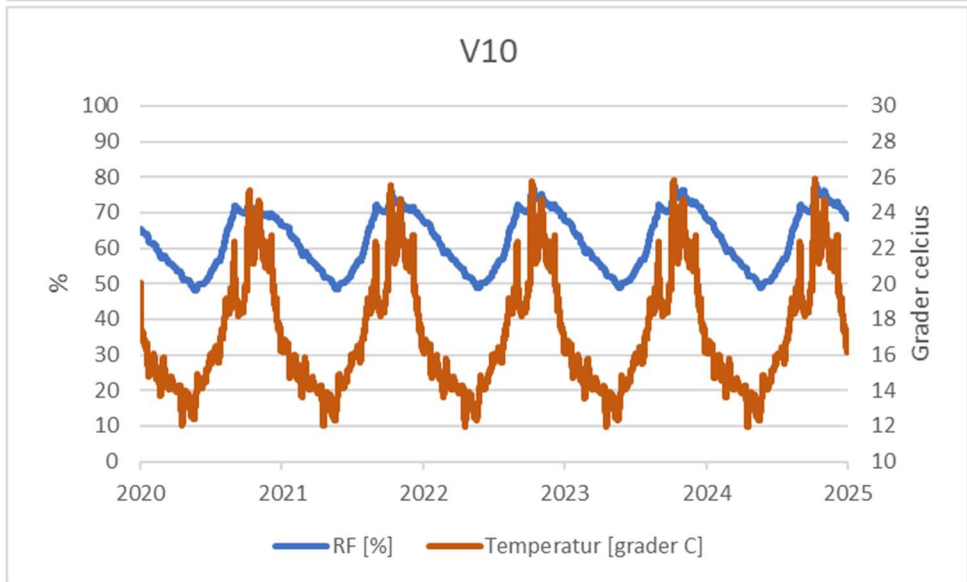
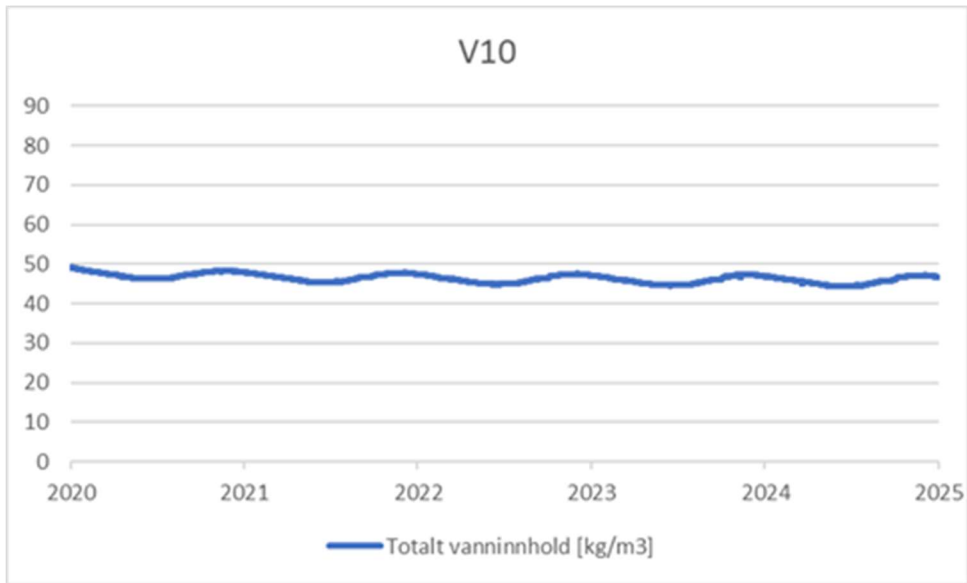


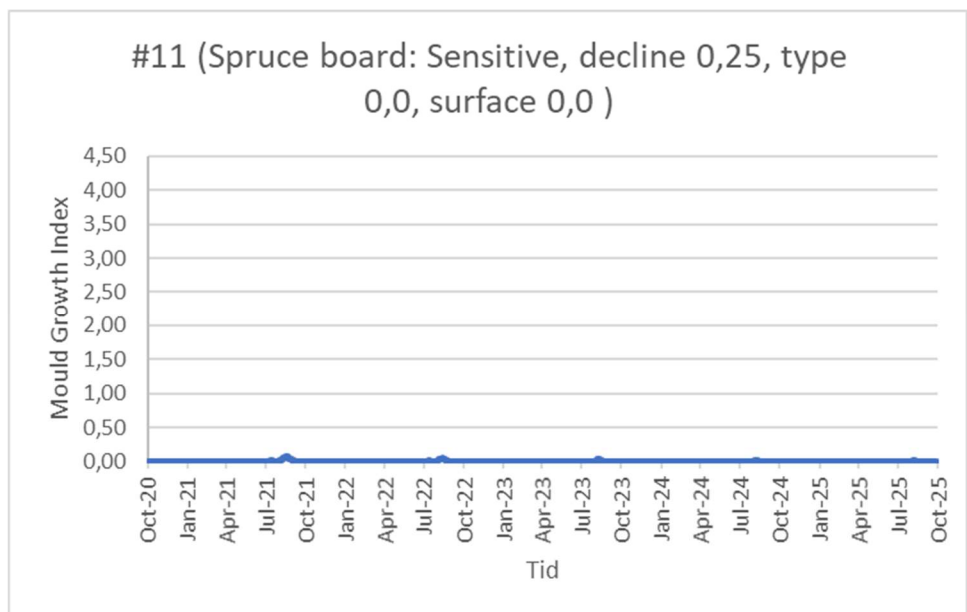
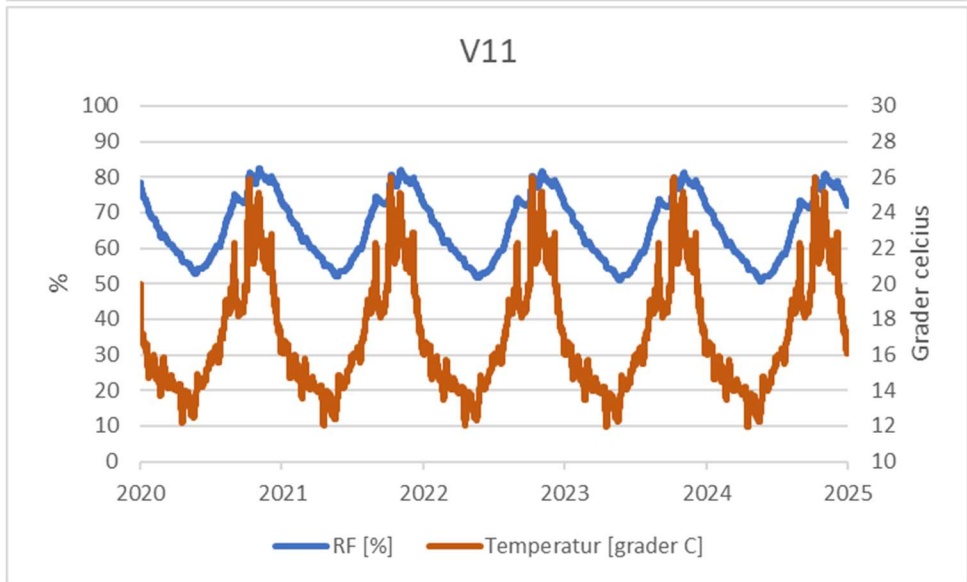
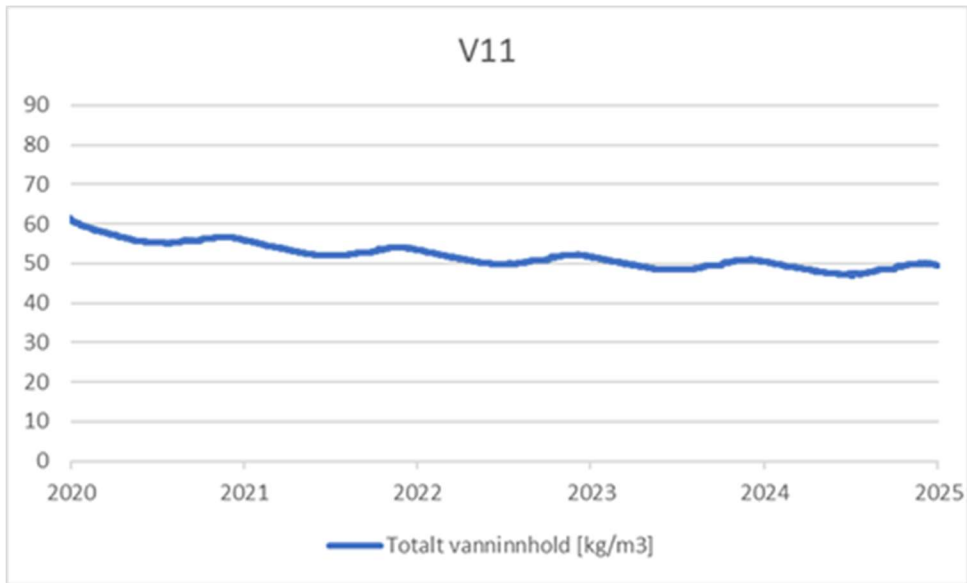


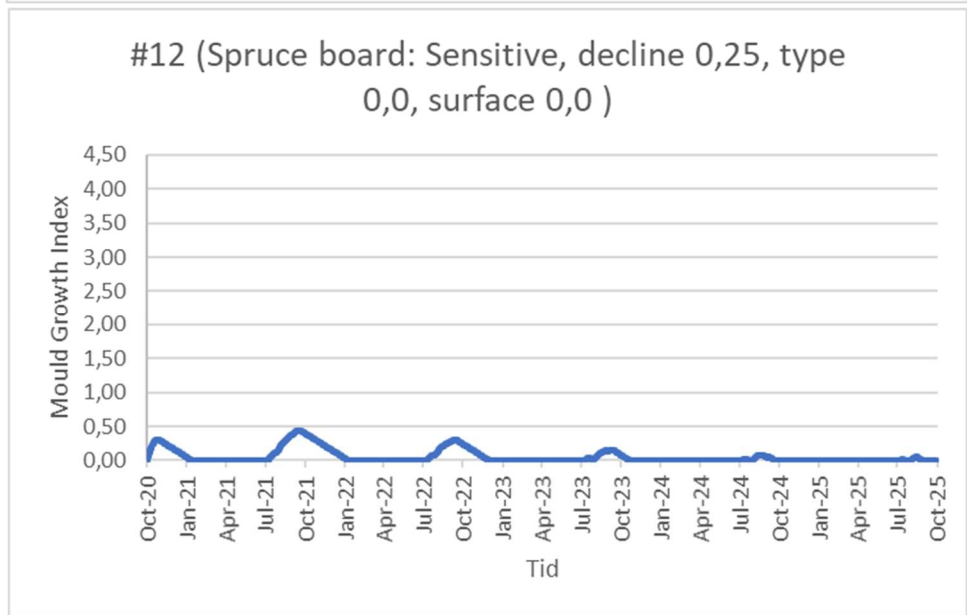
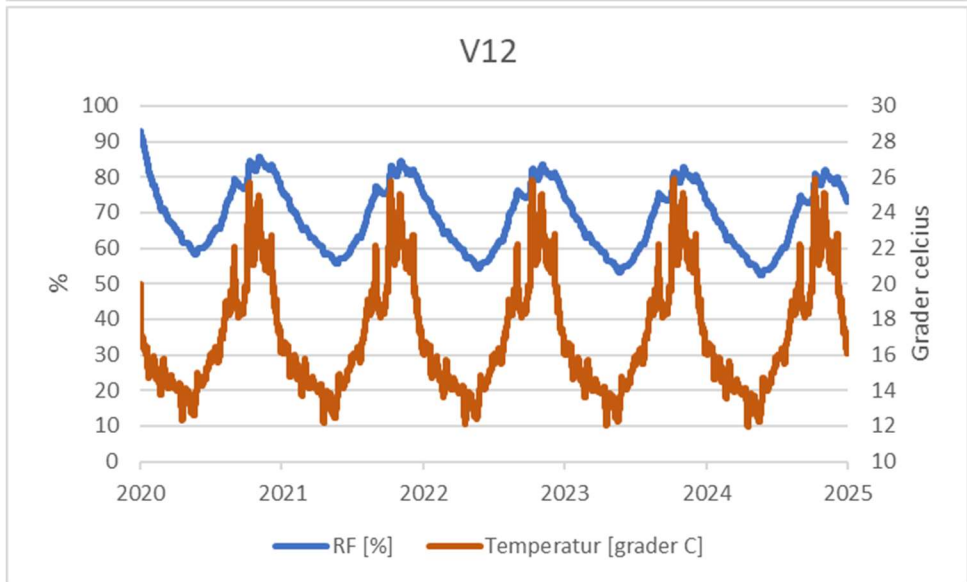
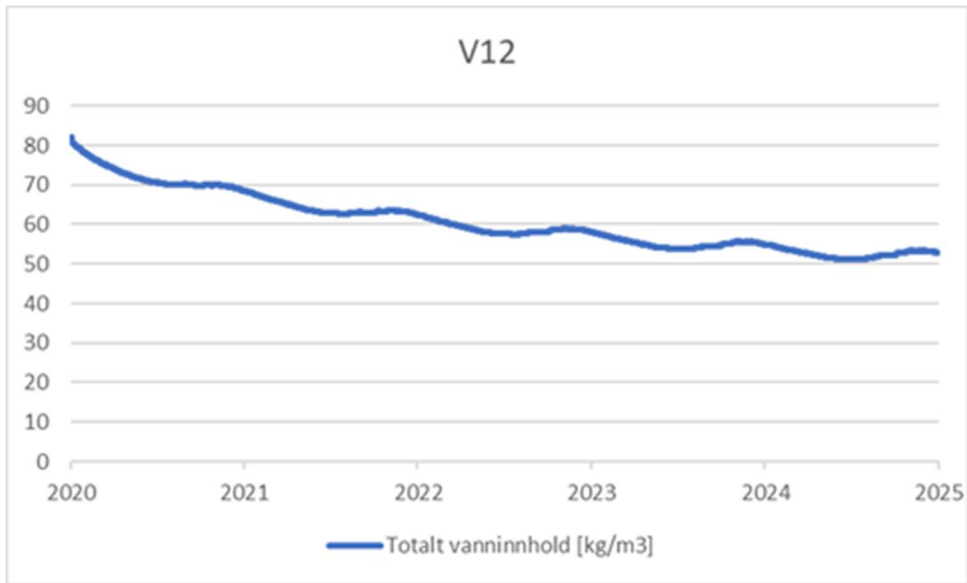


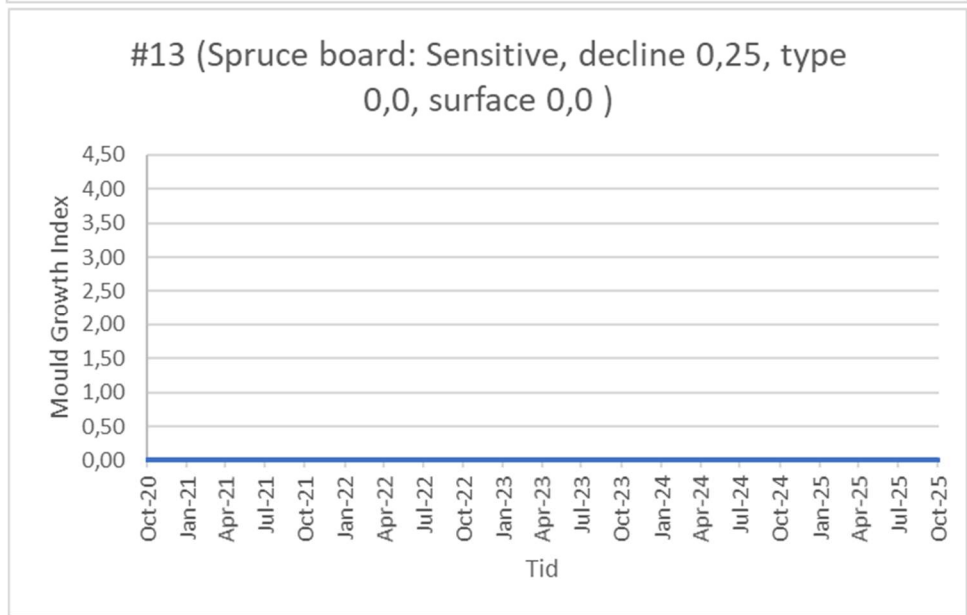
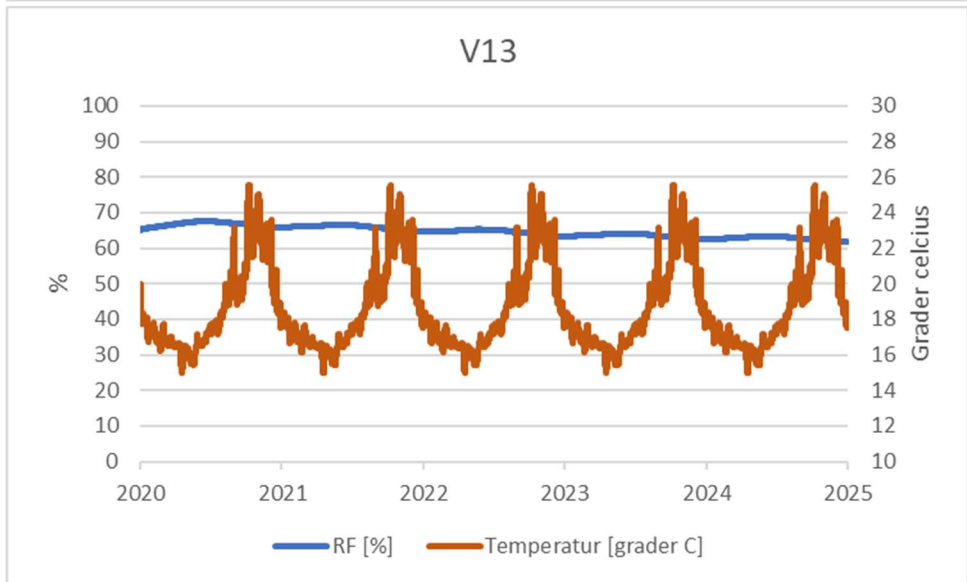
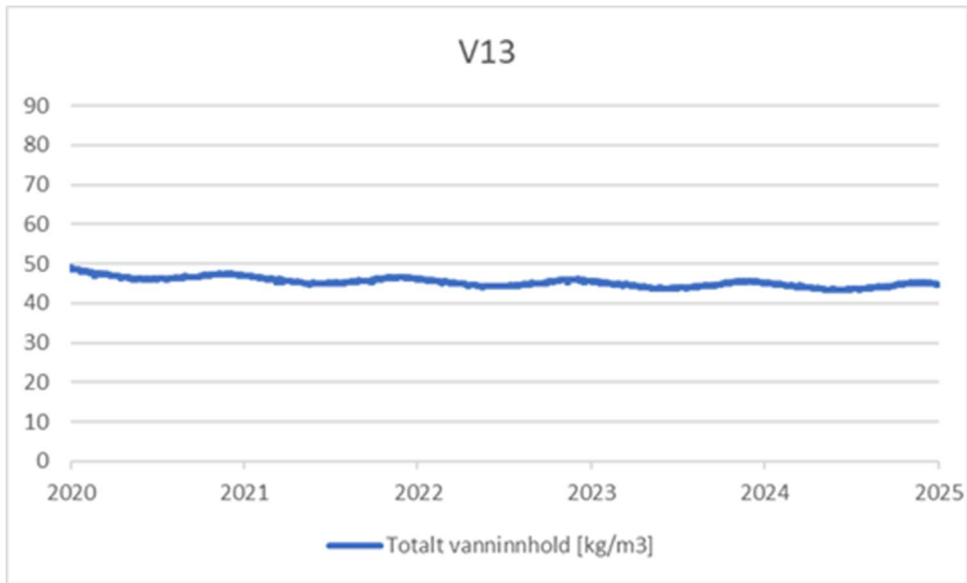


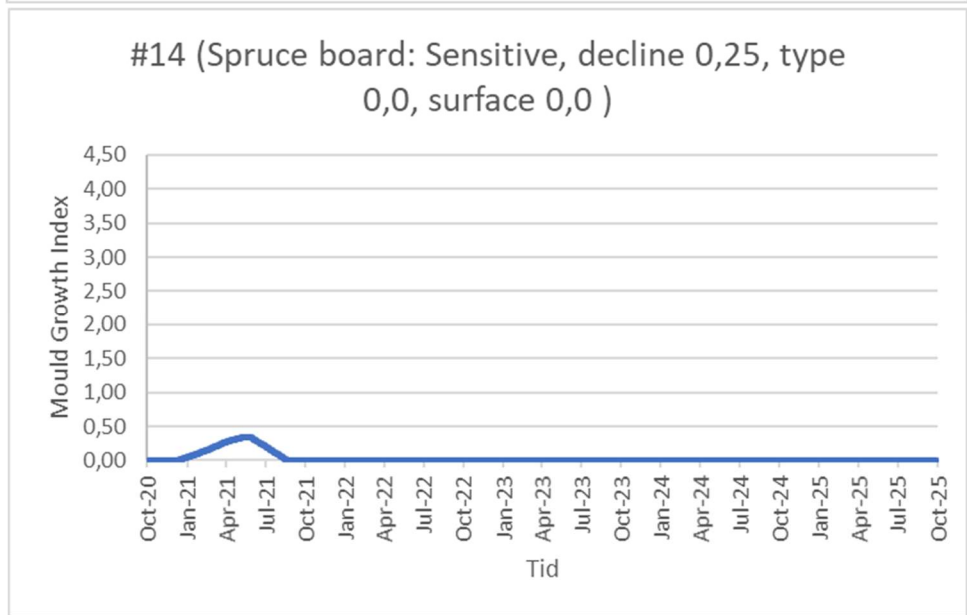
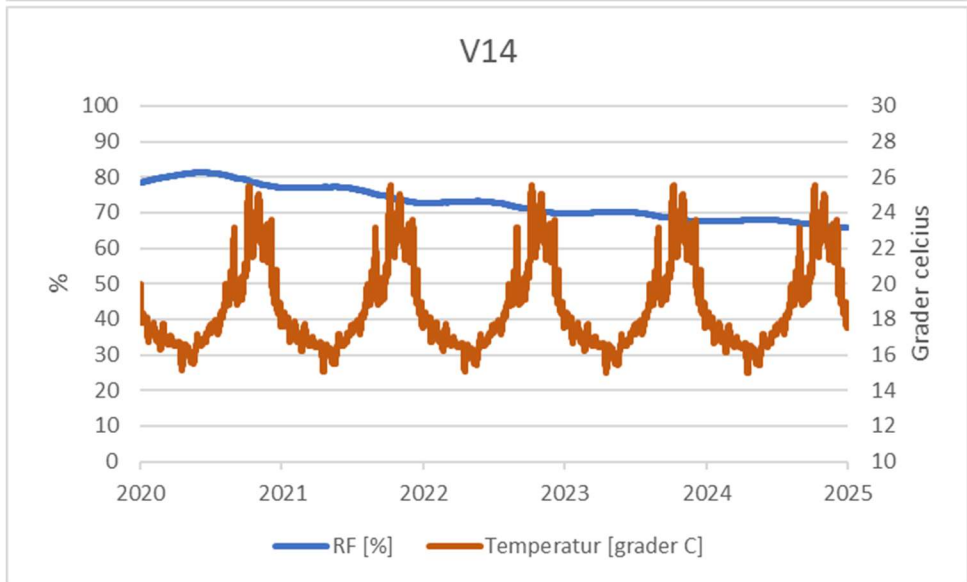
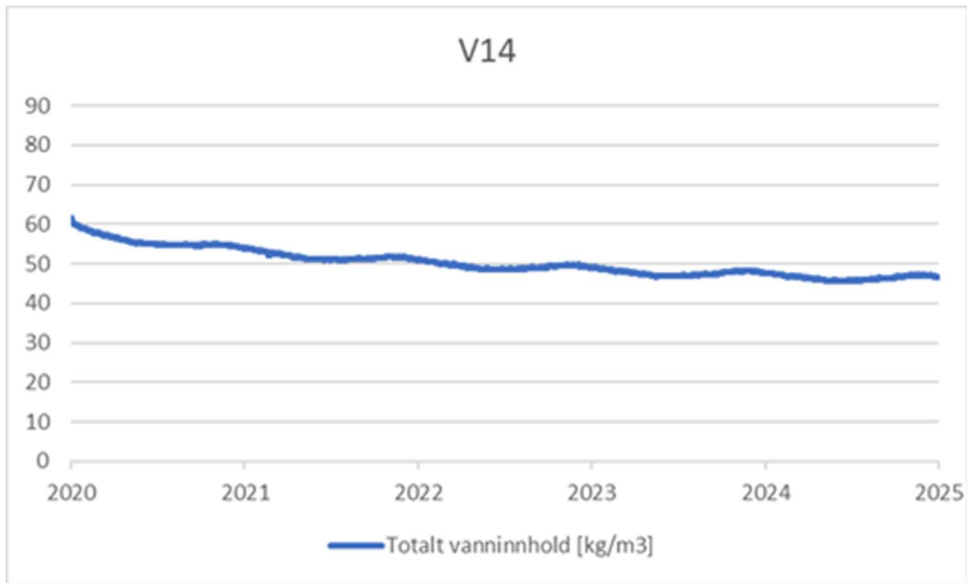


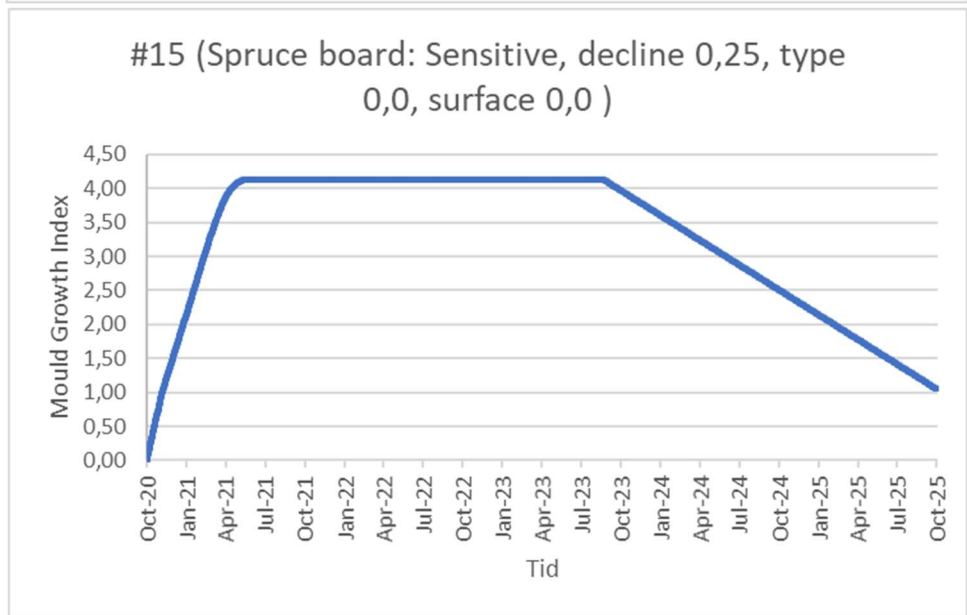
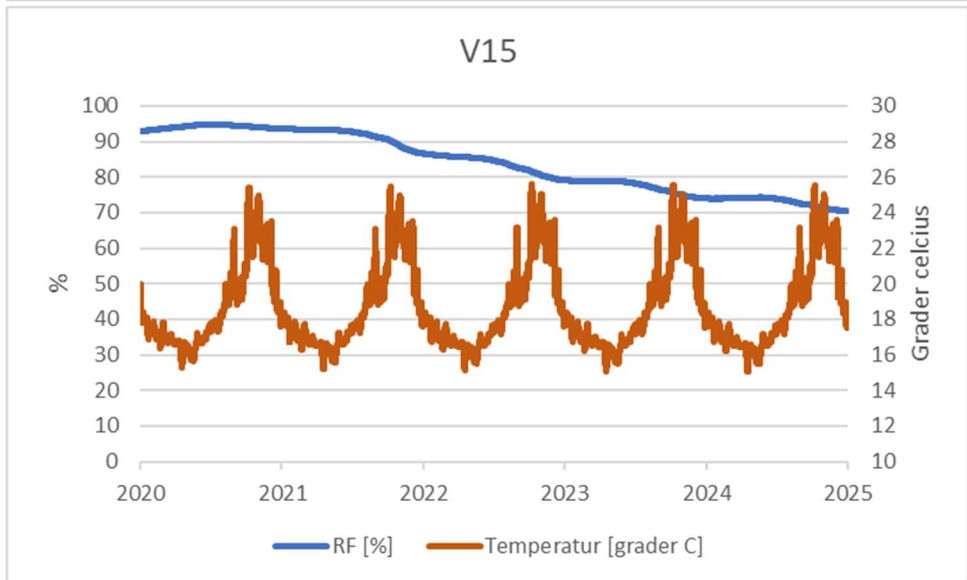
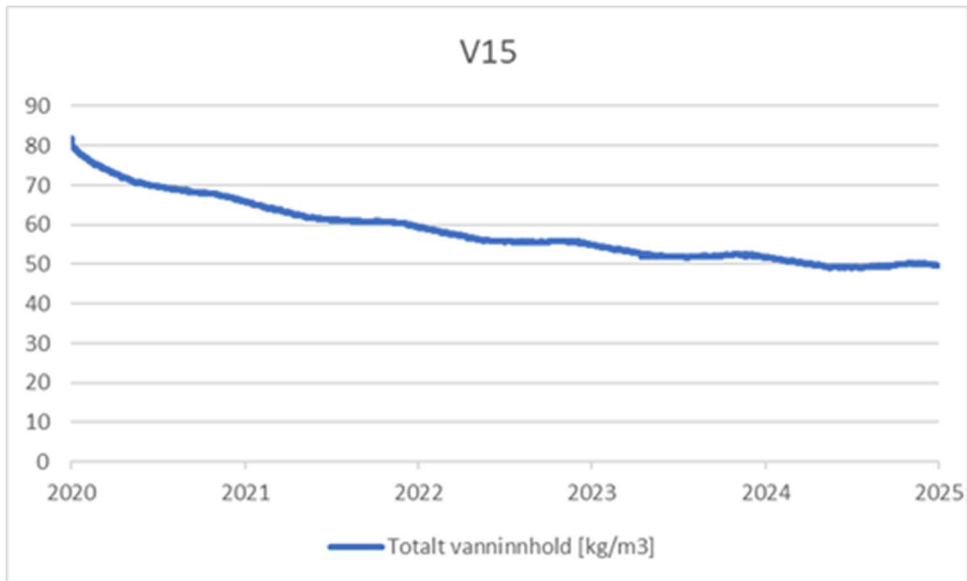


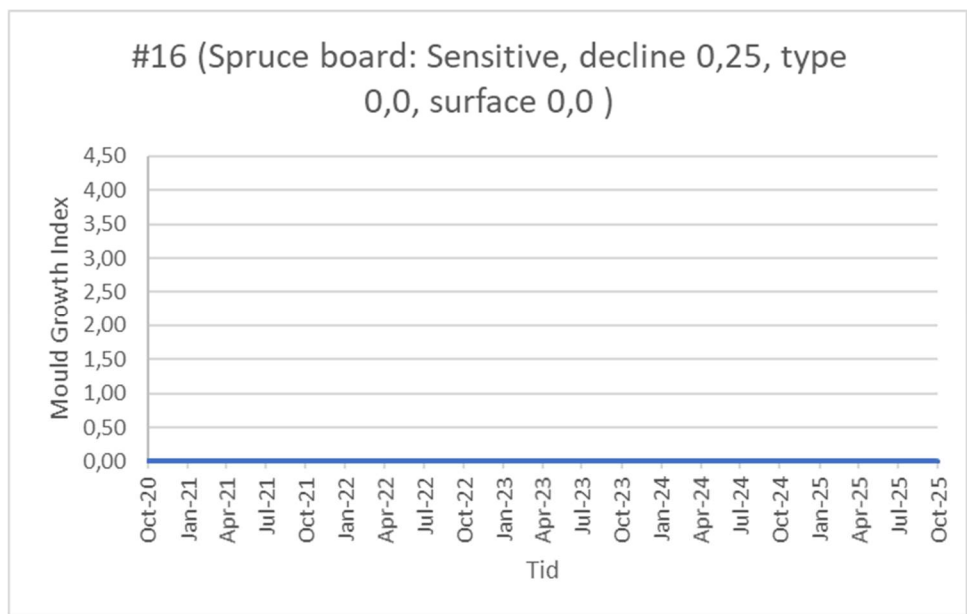
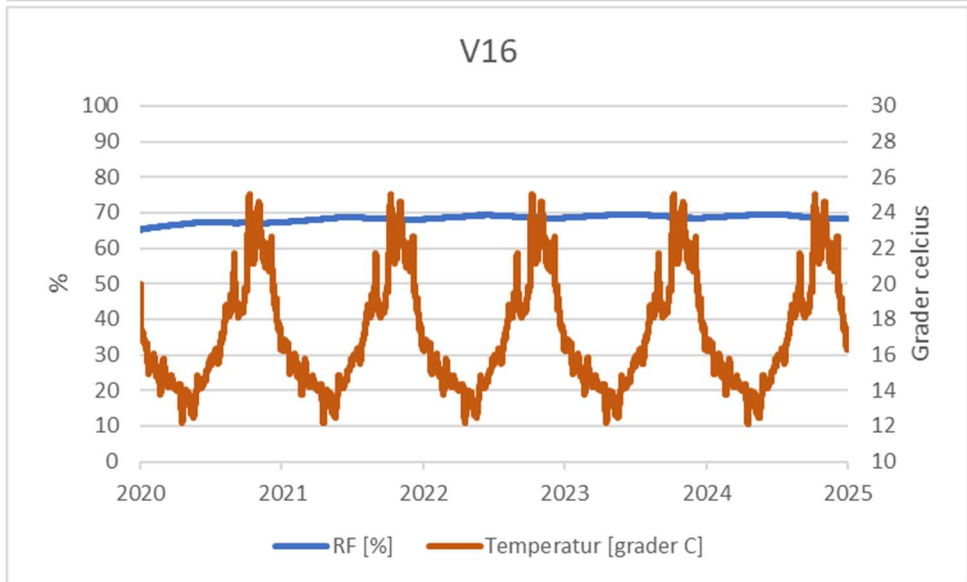
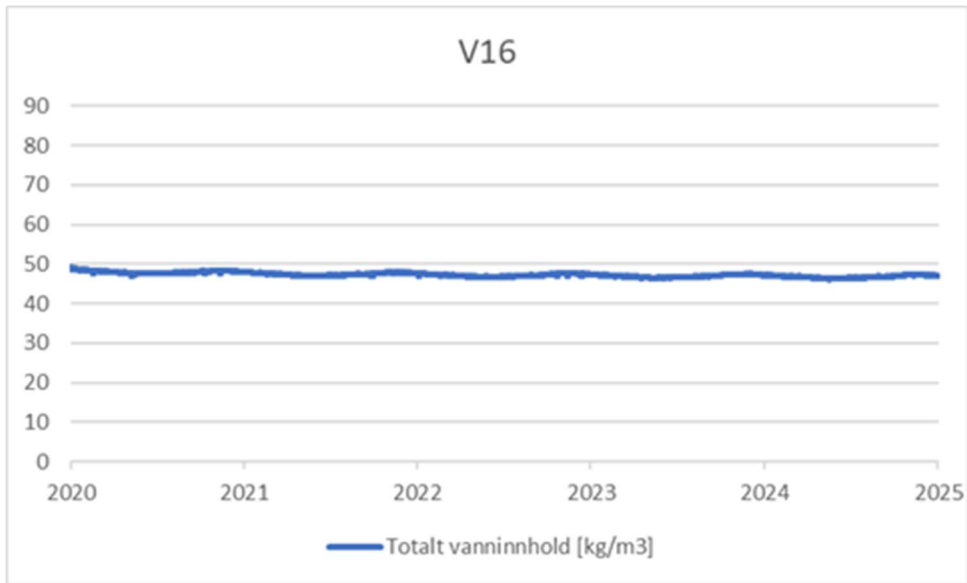


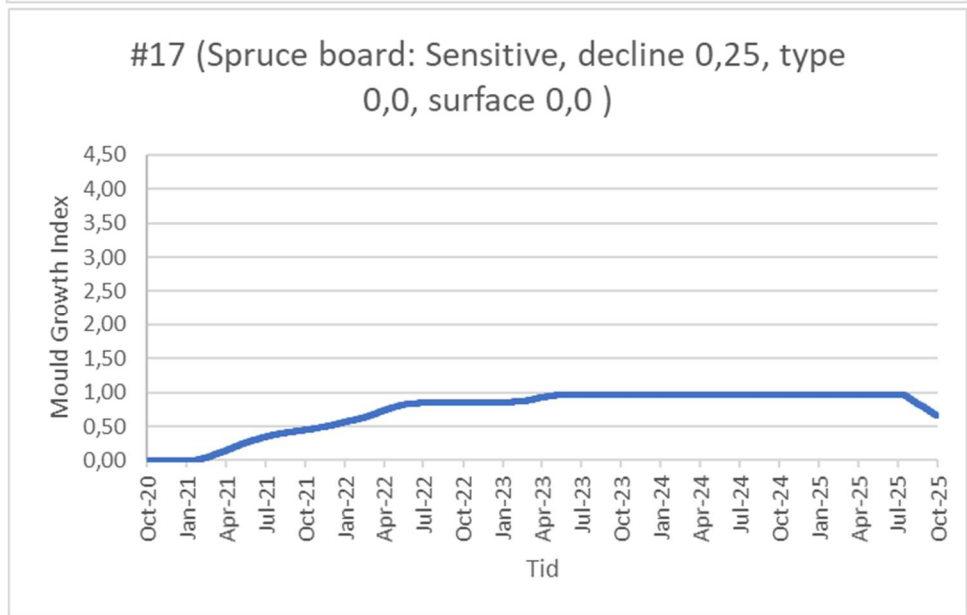
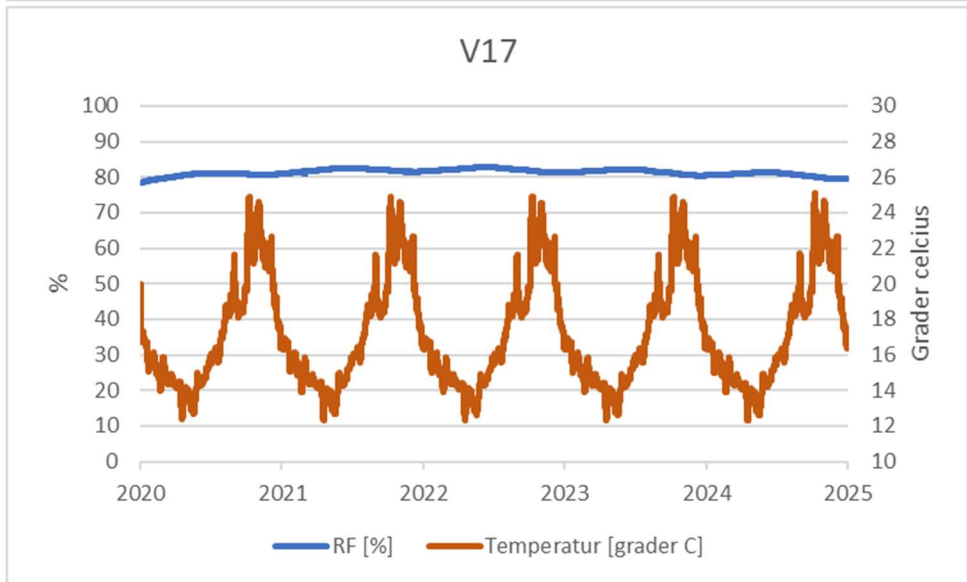
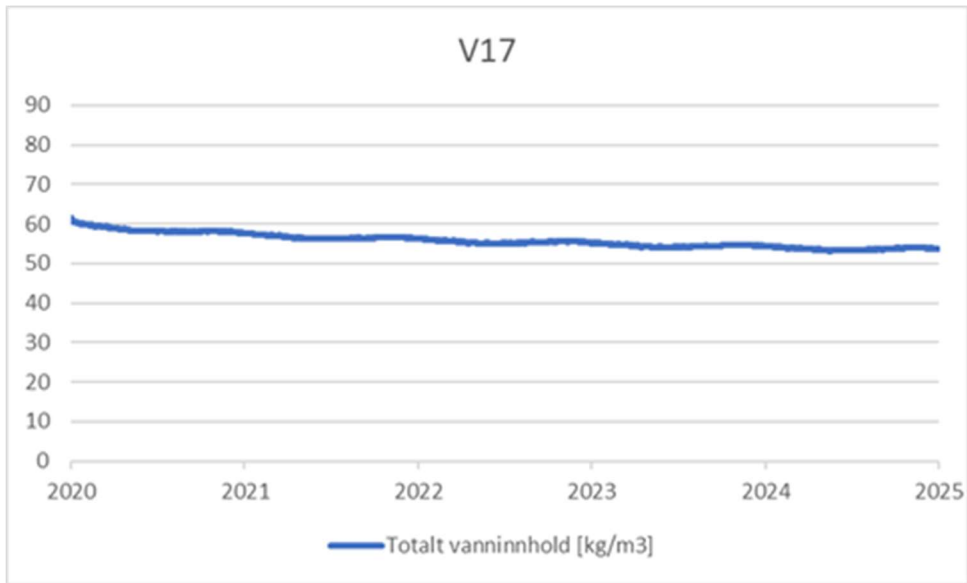


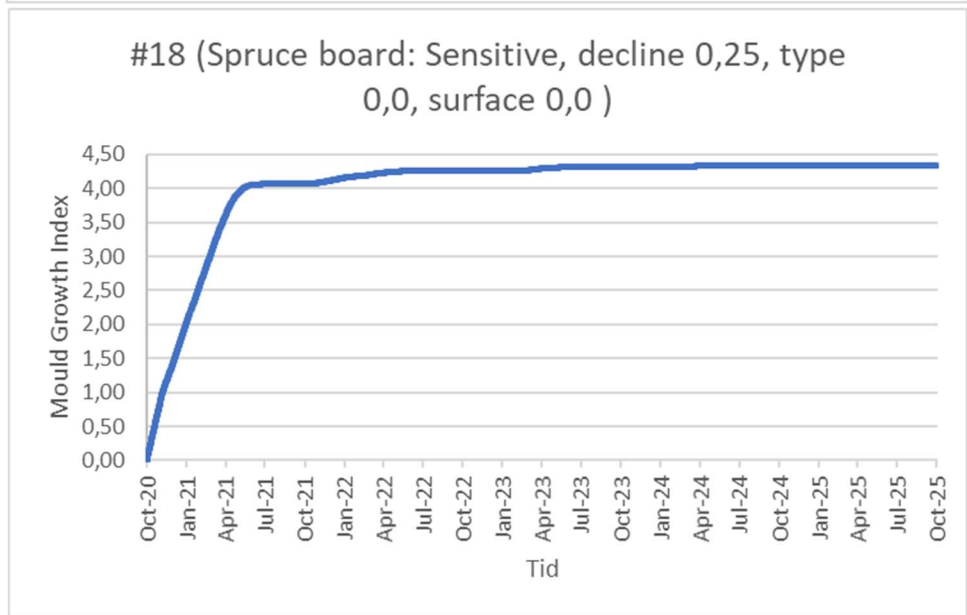
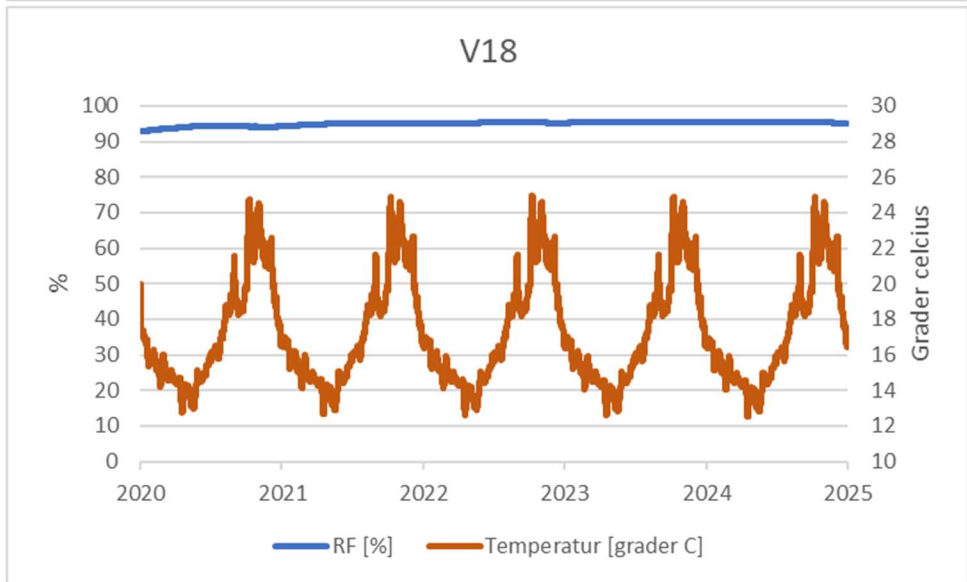
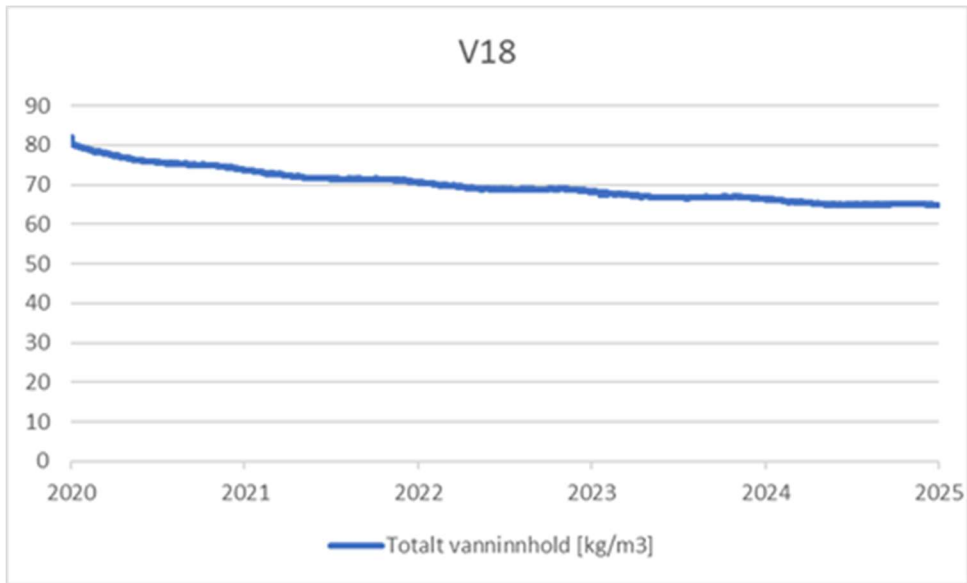


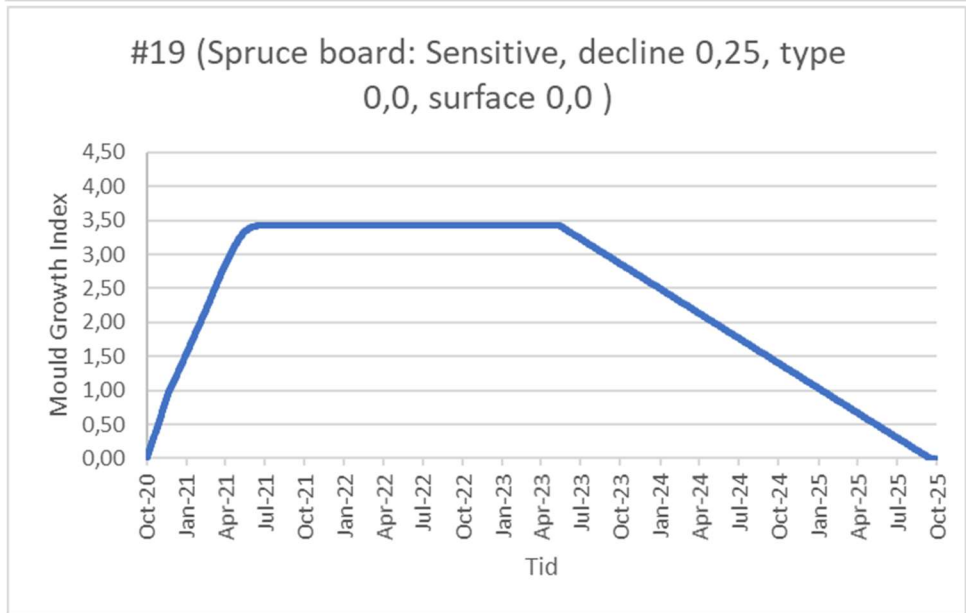
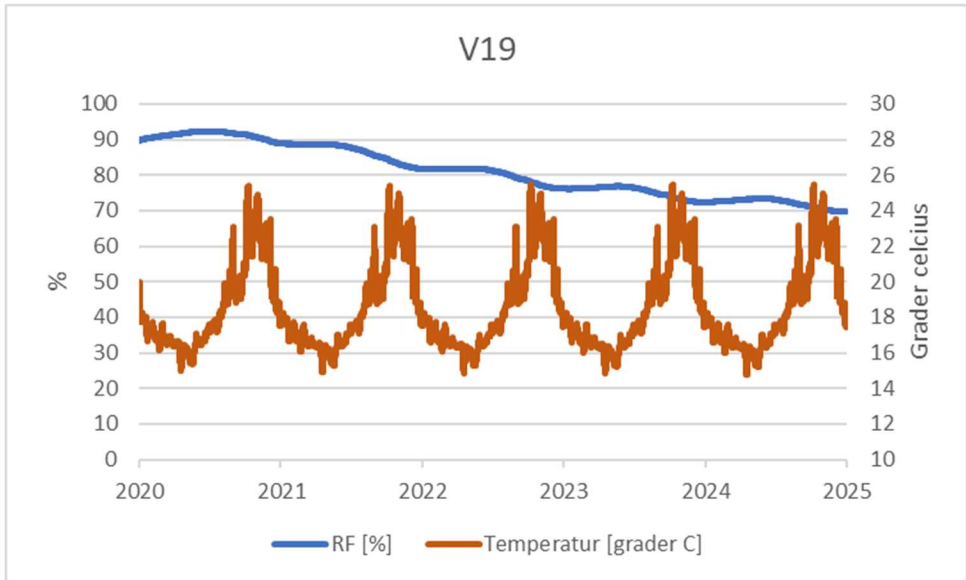
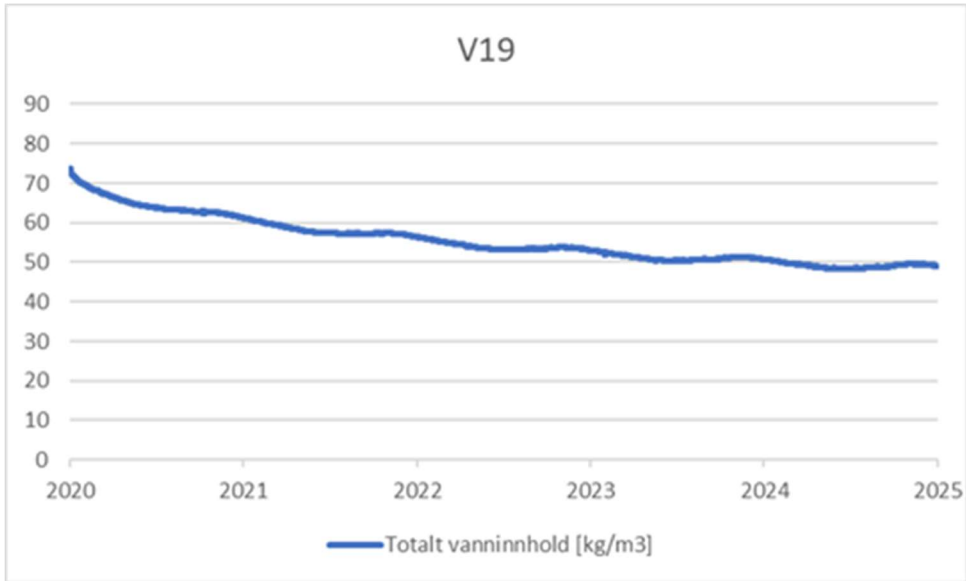


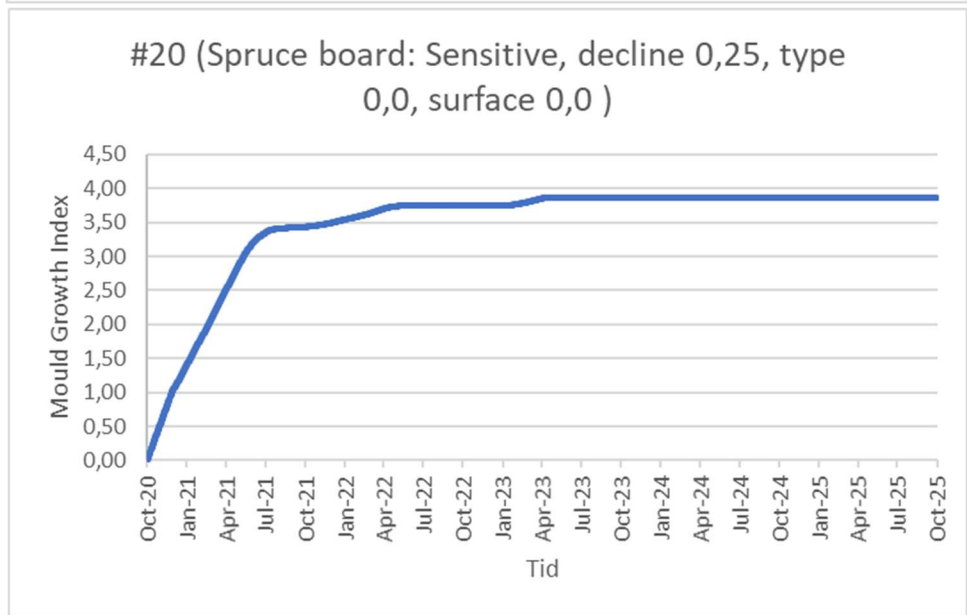
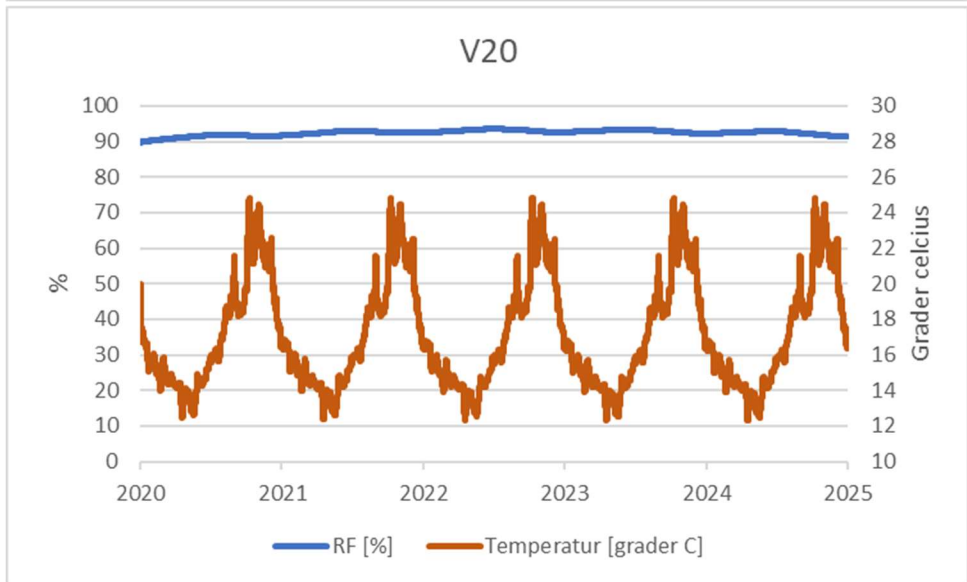
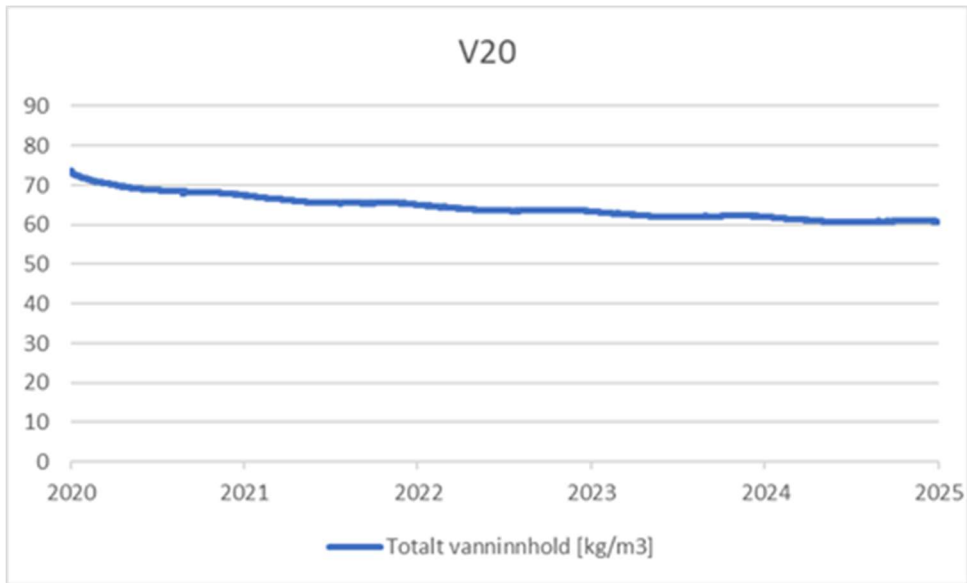


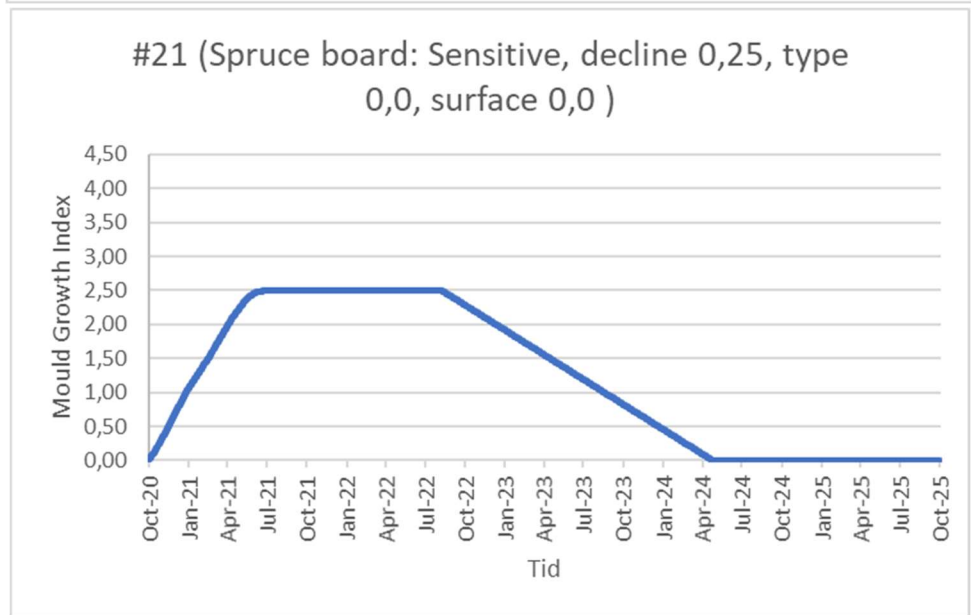
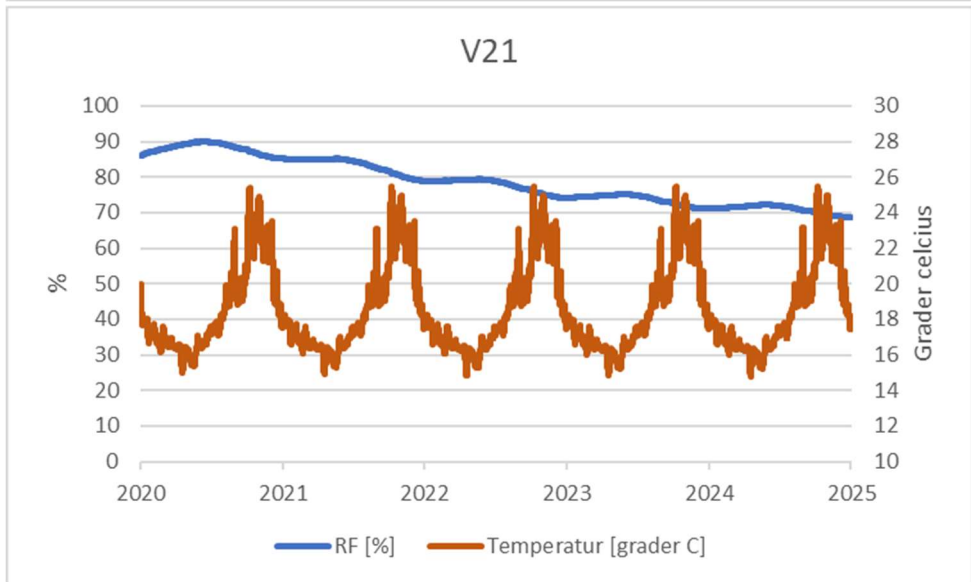
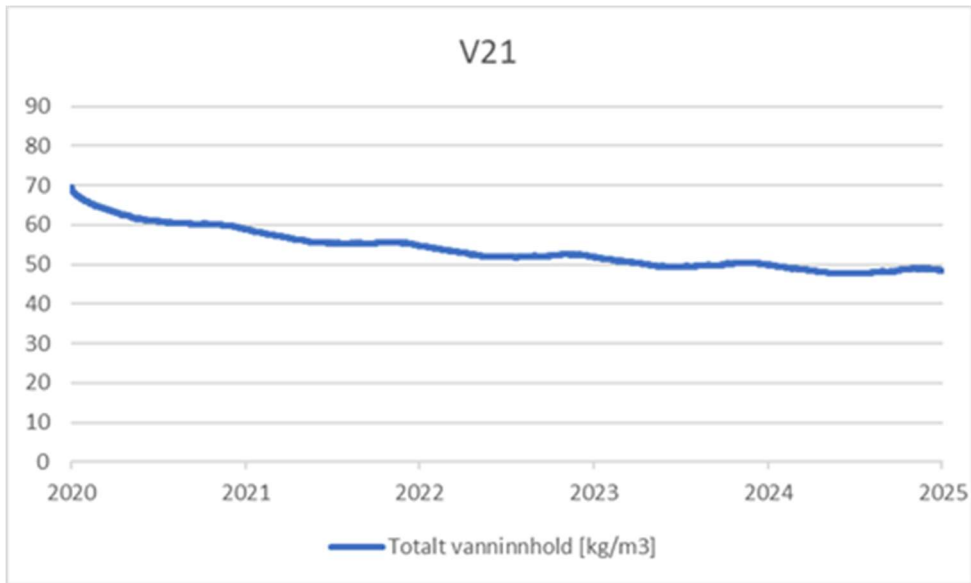


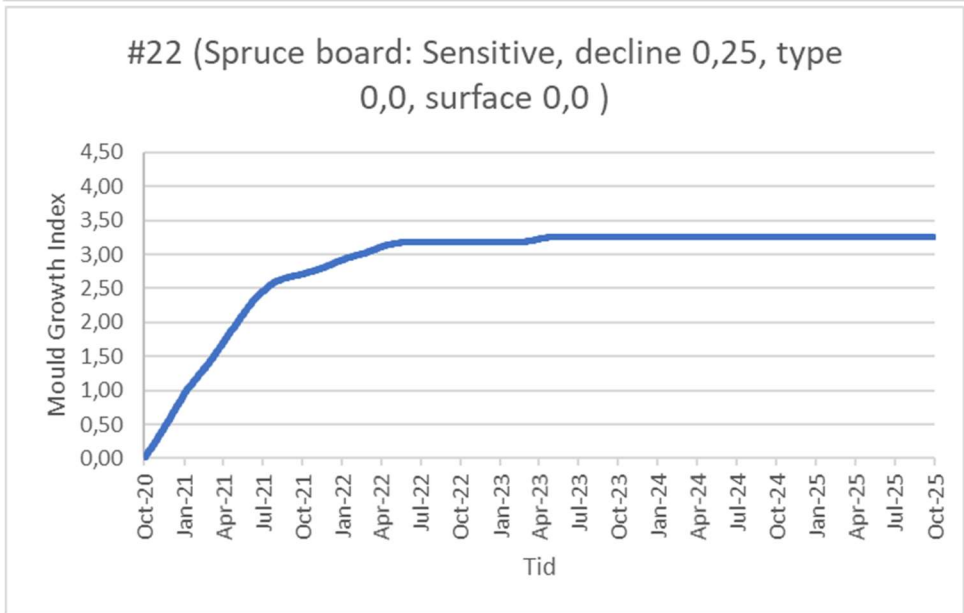
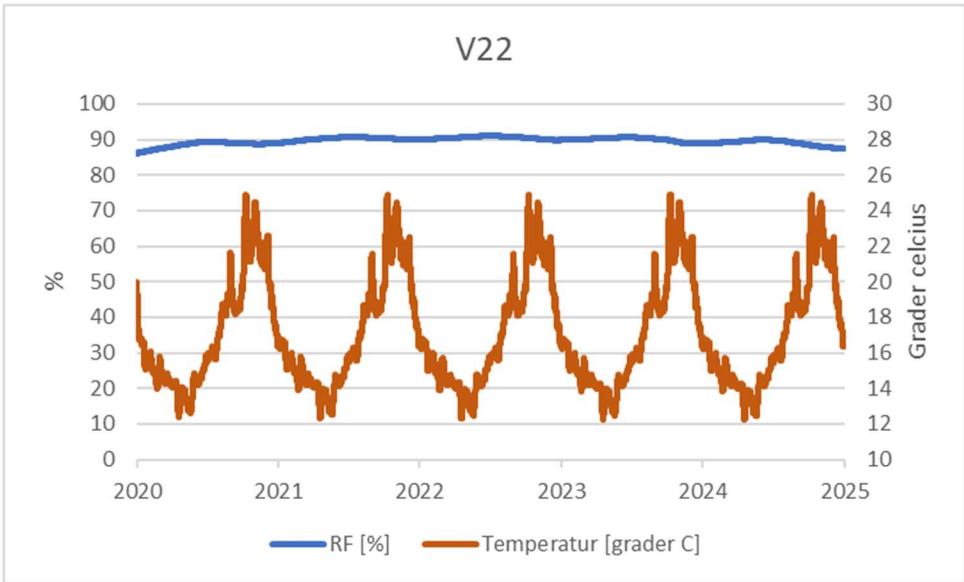
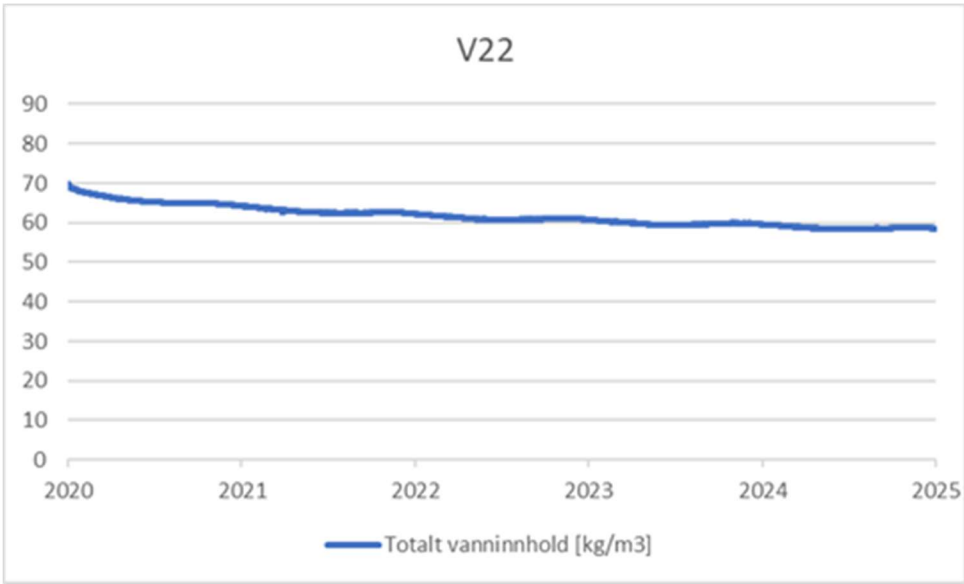


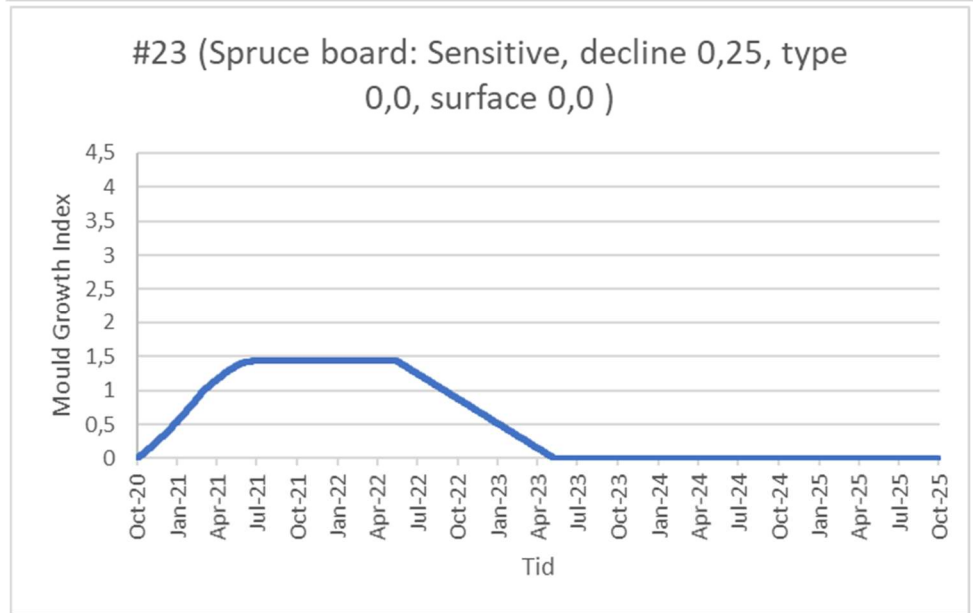
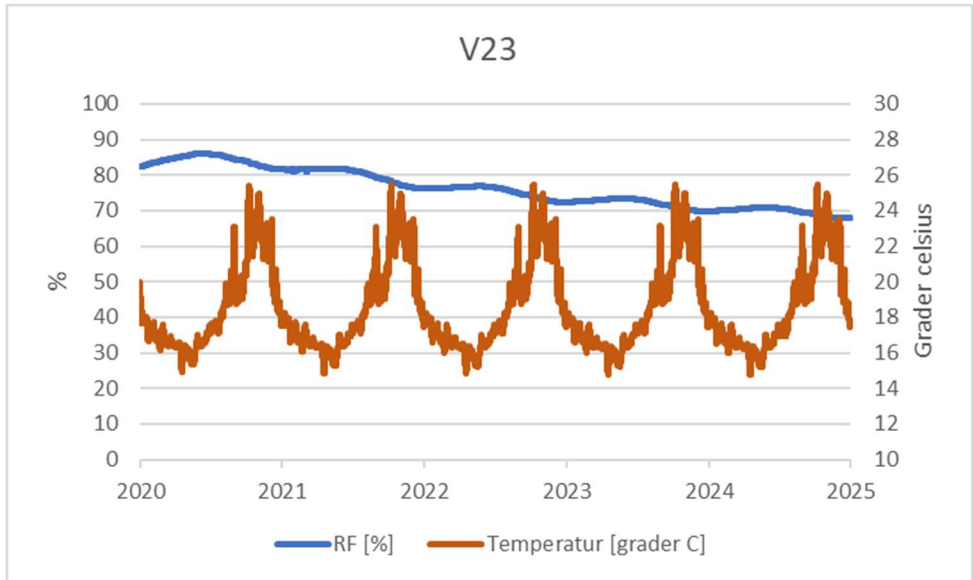
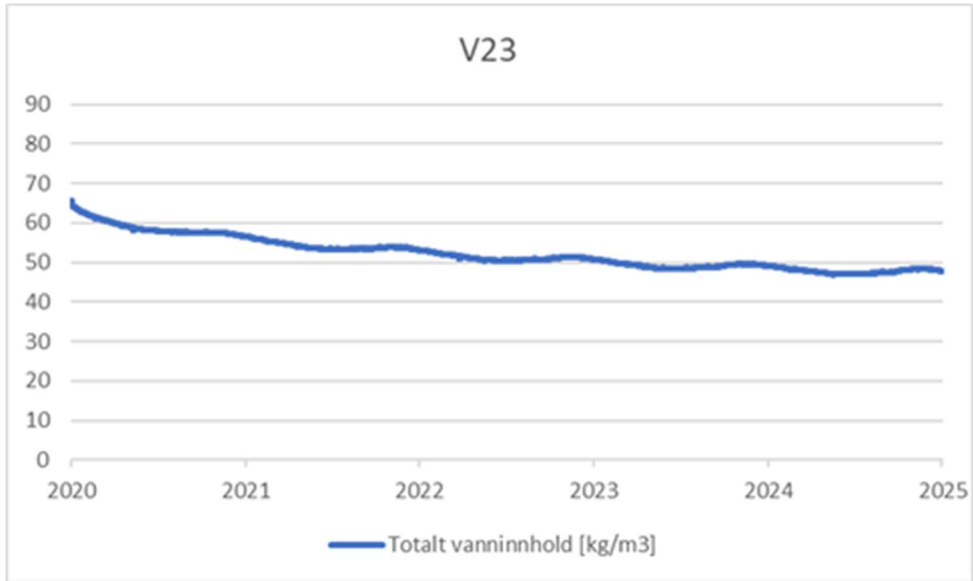


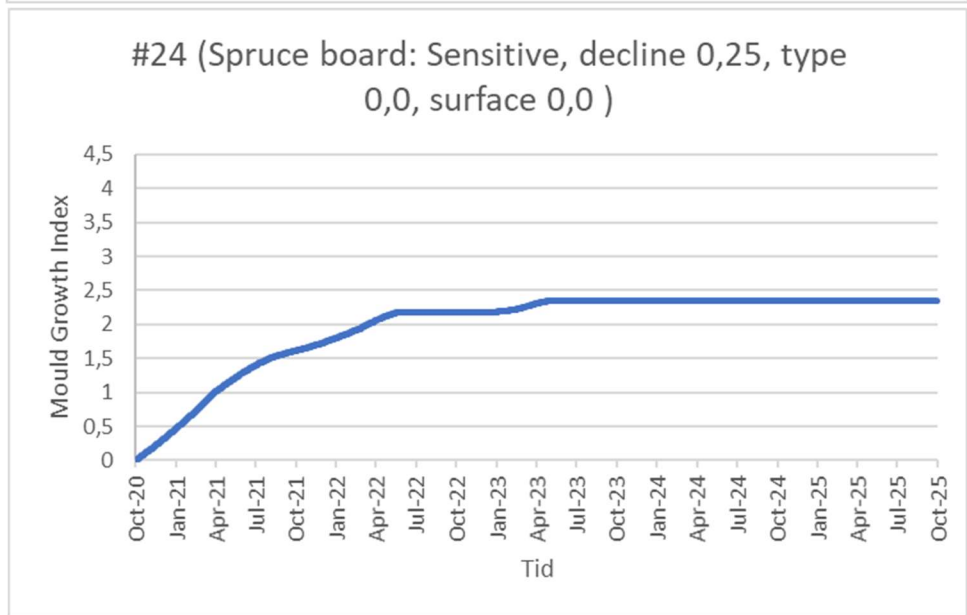
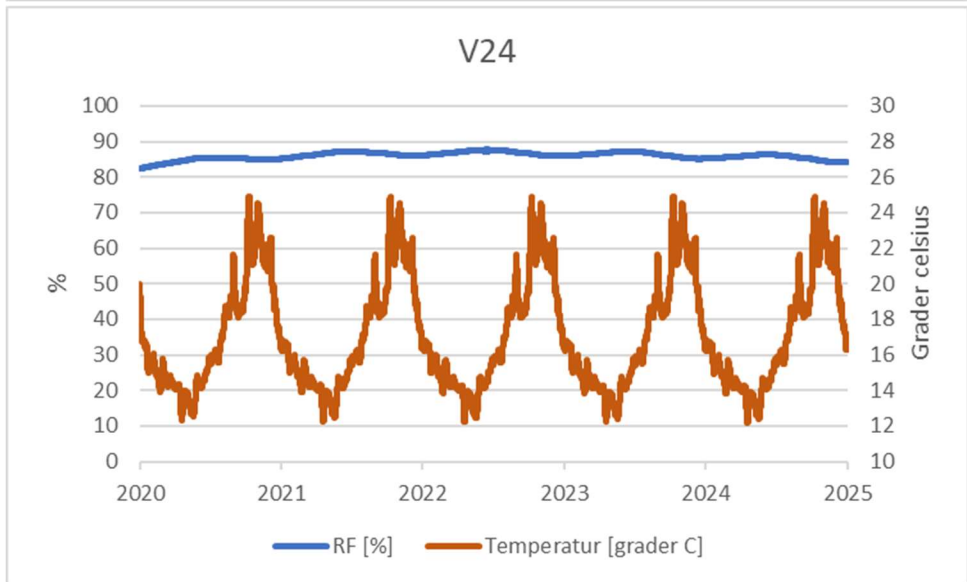
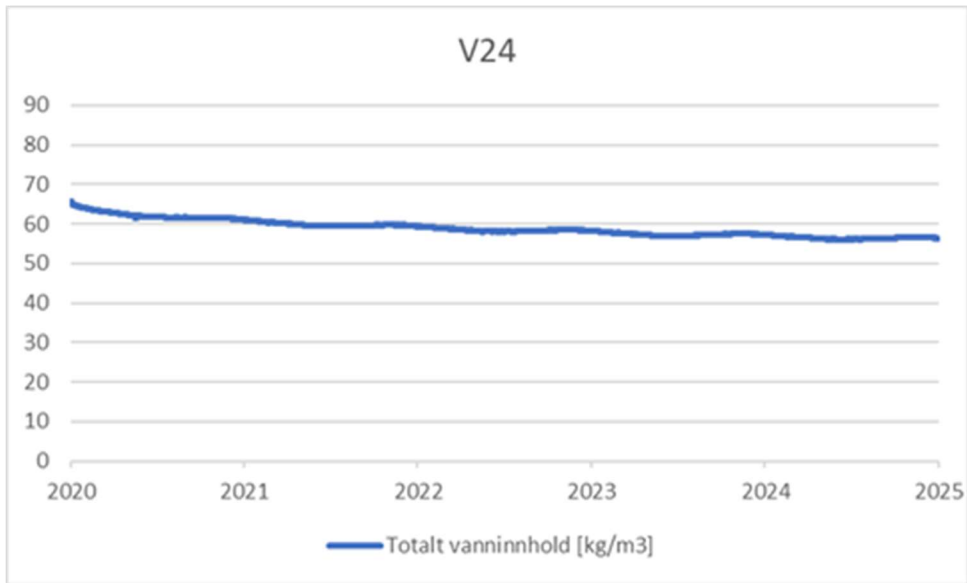


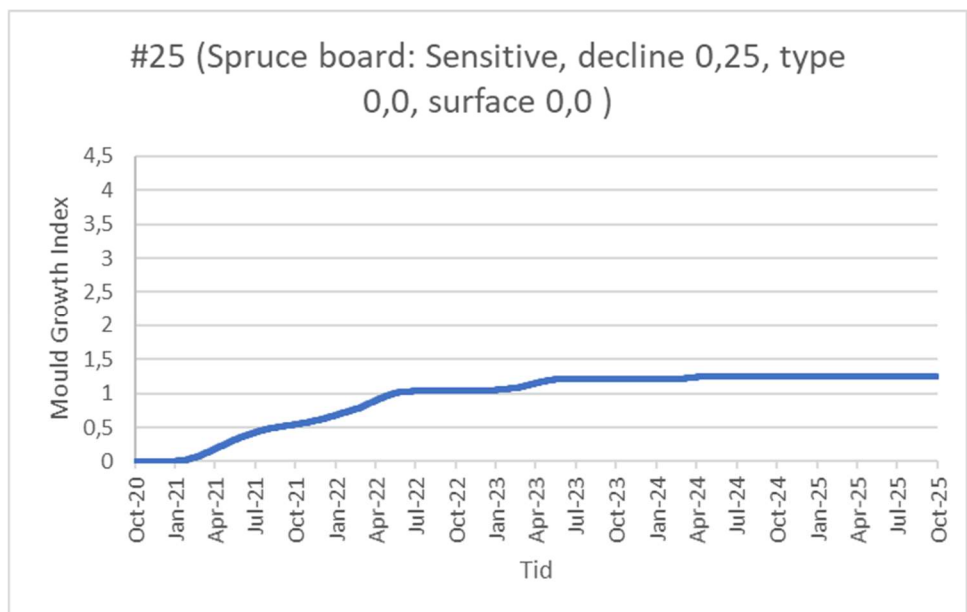
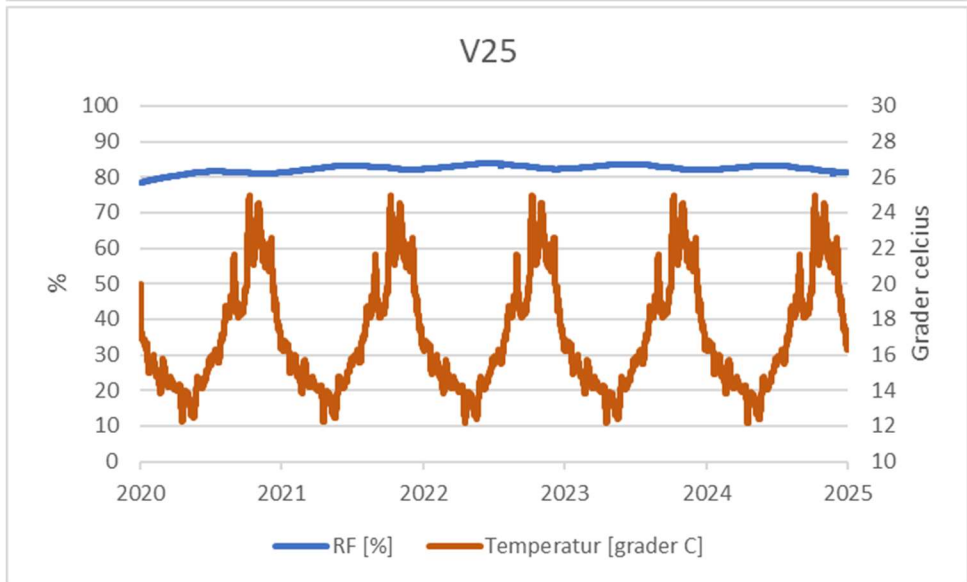
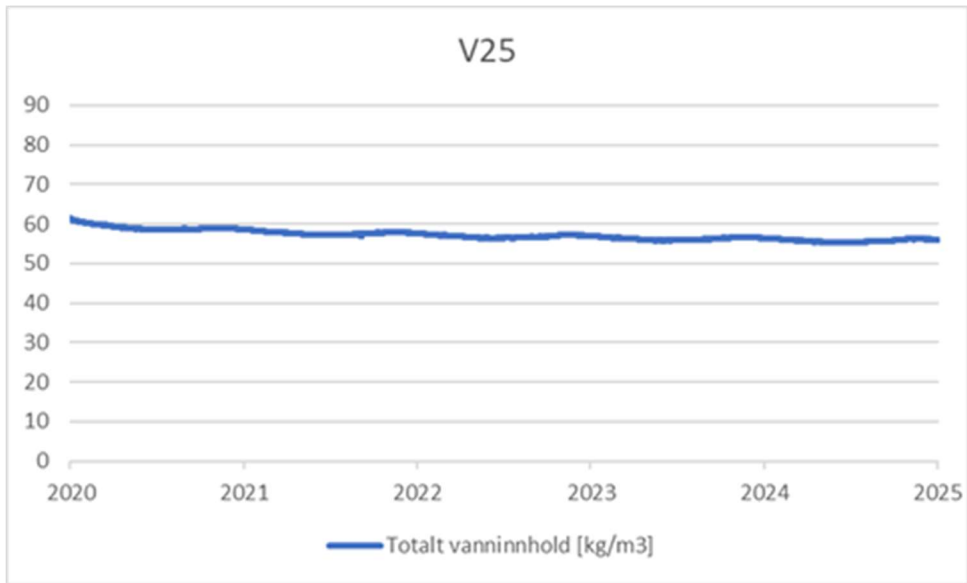










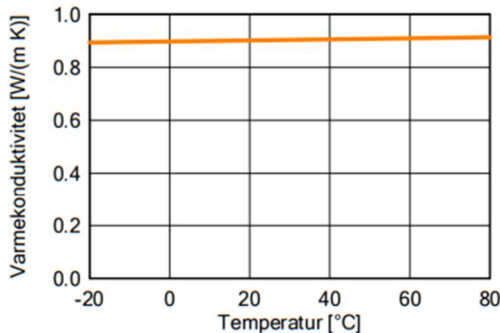
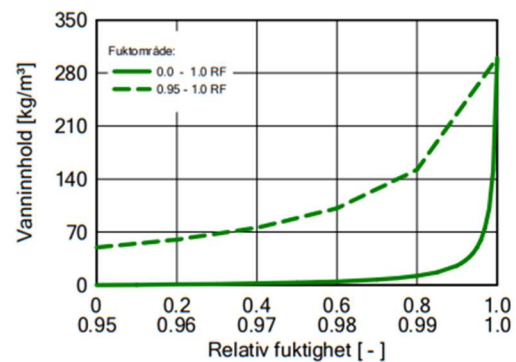
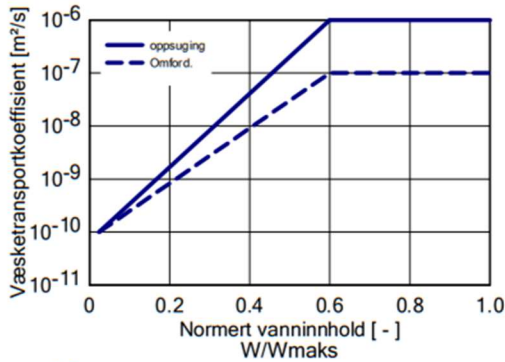
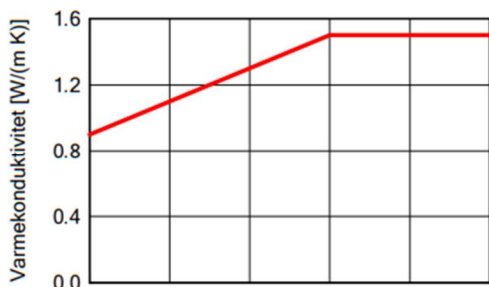


Vedlegg 2 – WUFI - materialdata og randvilkår

WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: generic substrate

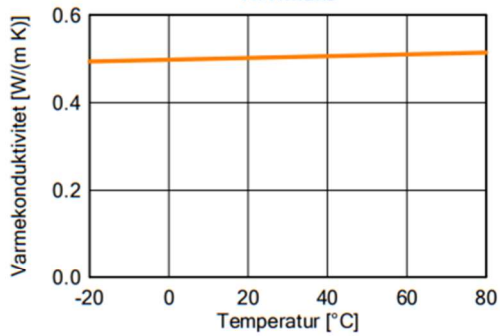
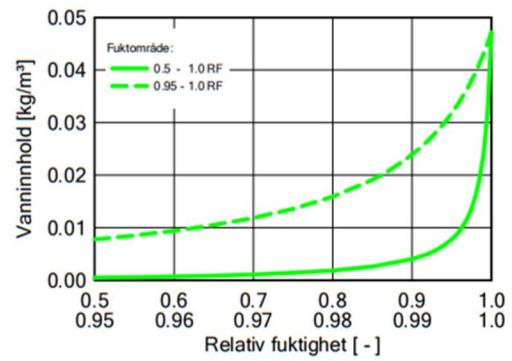
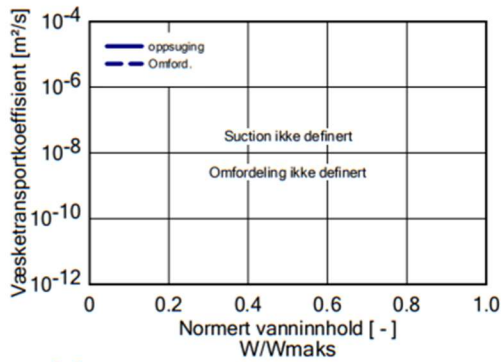
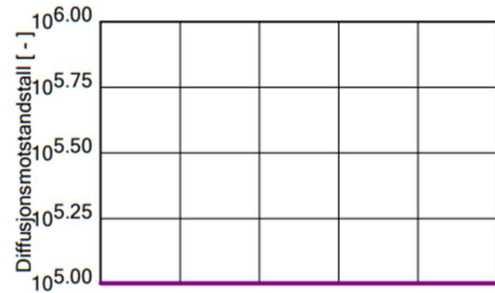
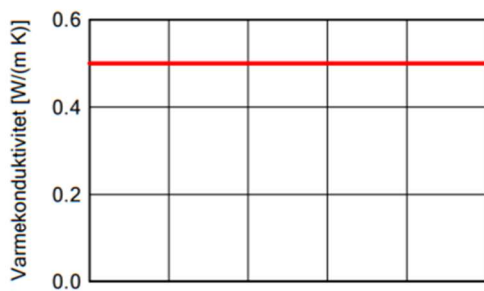
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	1500
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0,5
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0,9
Vandampdiffusjonsmotstand	[-]	5
Referansefuktinnhold	[kg/m ³]	12
Fri vannmetning	[kg/m ³]	300
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	0,0002



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: Takmembran V13

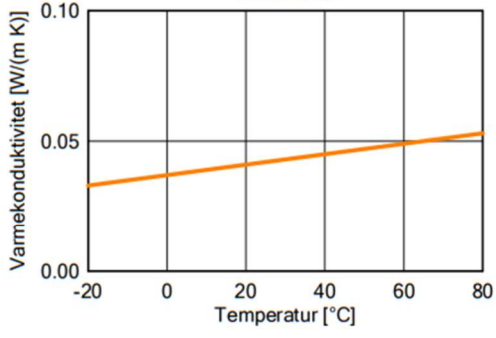
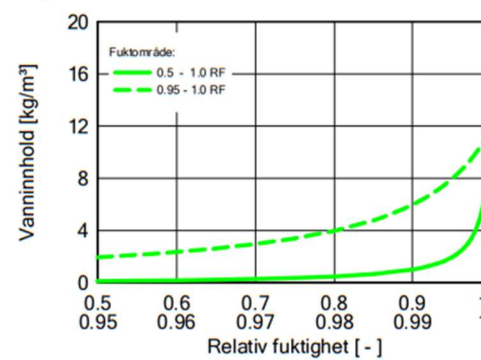
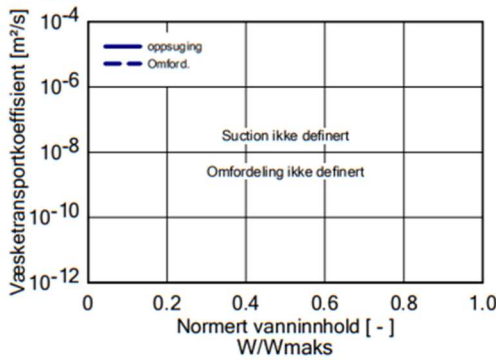
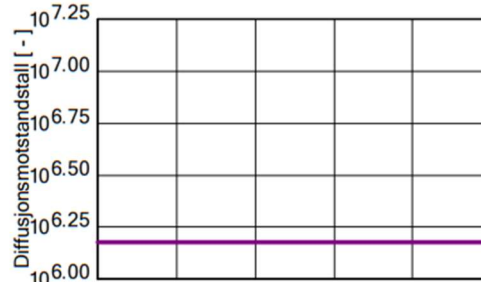
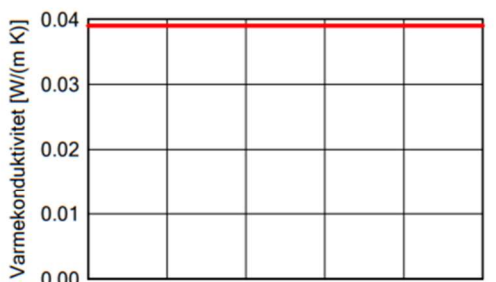
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	2400
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1000
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.5
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	100000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: FOAMGLAS T3

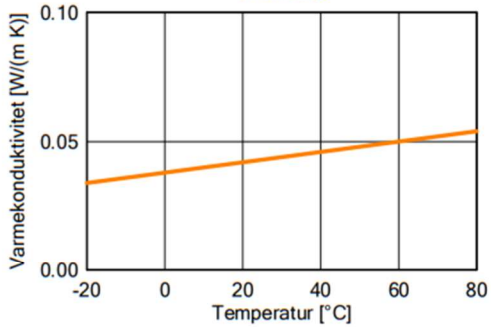
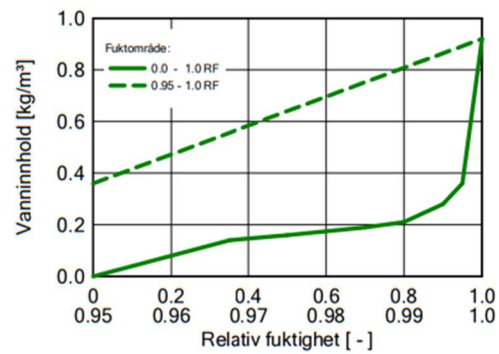
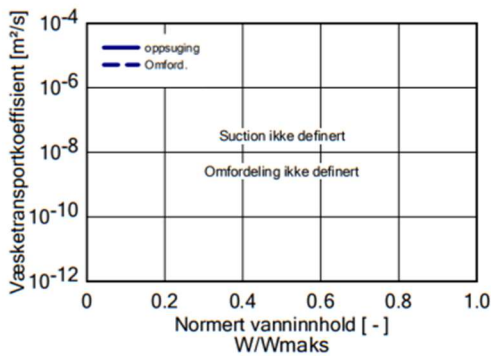
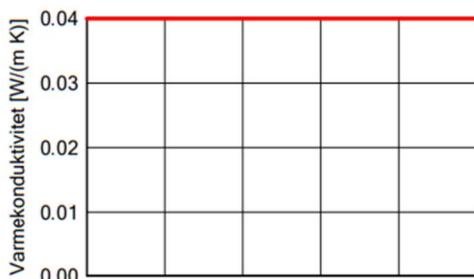
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	114
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.25
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1000
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.039
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	1500000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	2,00000E-4
Varmekonduktivitet, designverdi	[W/(m K)]	0.04



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: Cellplast ekstruderad

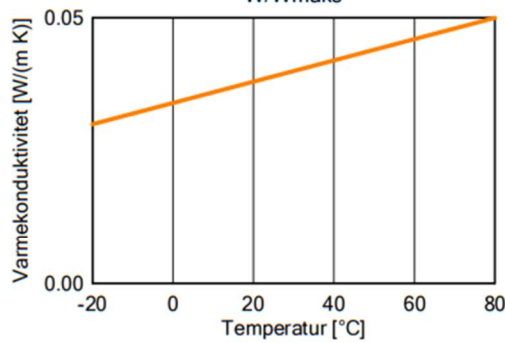
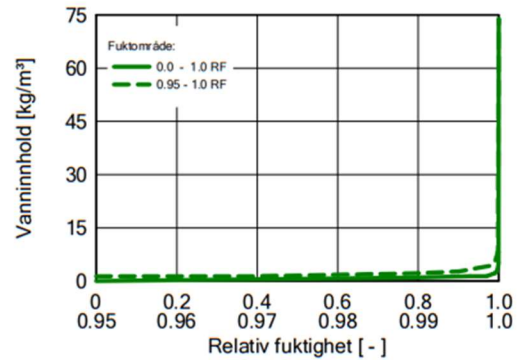
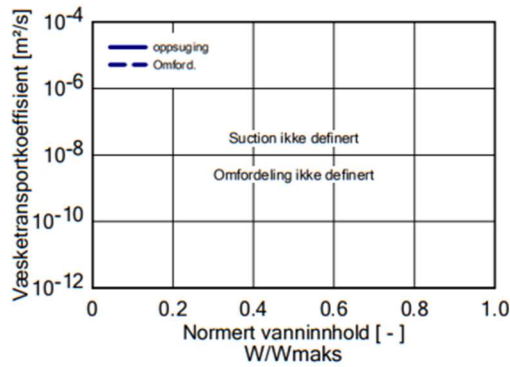
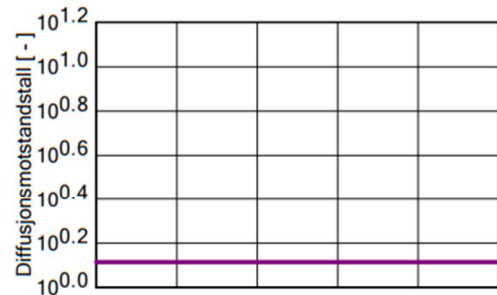
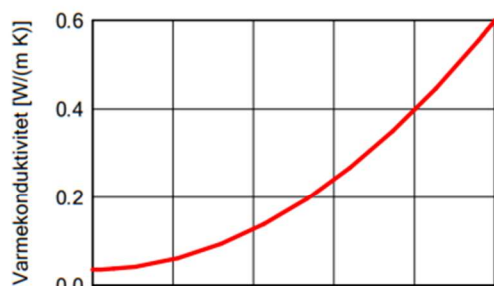
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	20
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.98
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vandampdiffusjonsmotstand	[-]	125
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL Masterrock NB (without lamination)

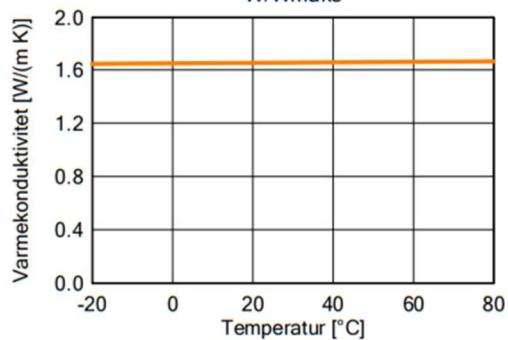
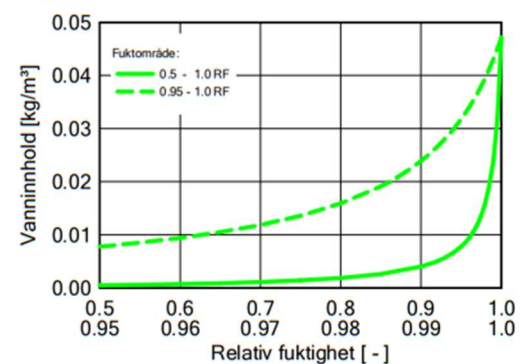
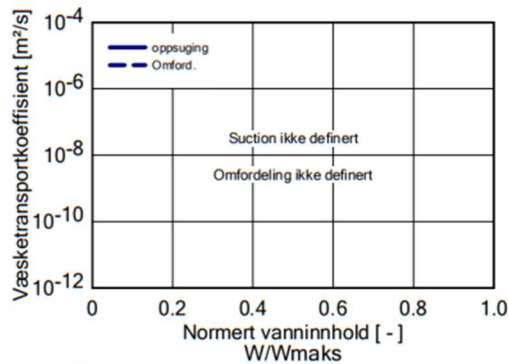
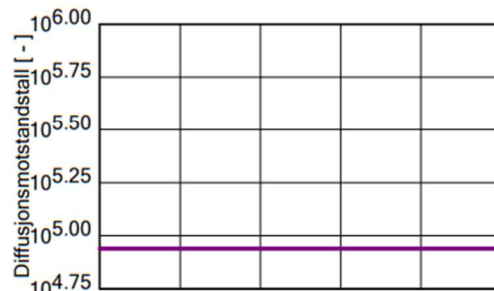
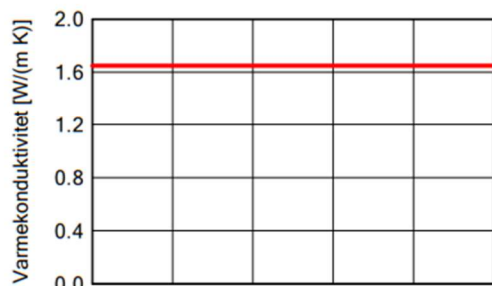
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	166
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.938
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vandampdiffusjonsmotstand	[-]	1.3
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	2,00000E-4
Varmekonduktivitet, designverdi	[W/(m K)]	0.036



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)

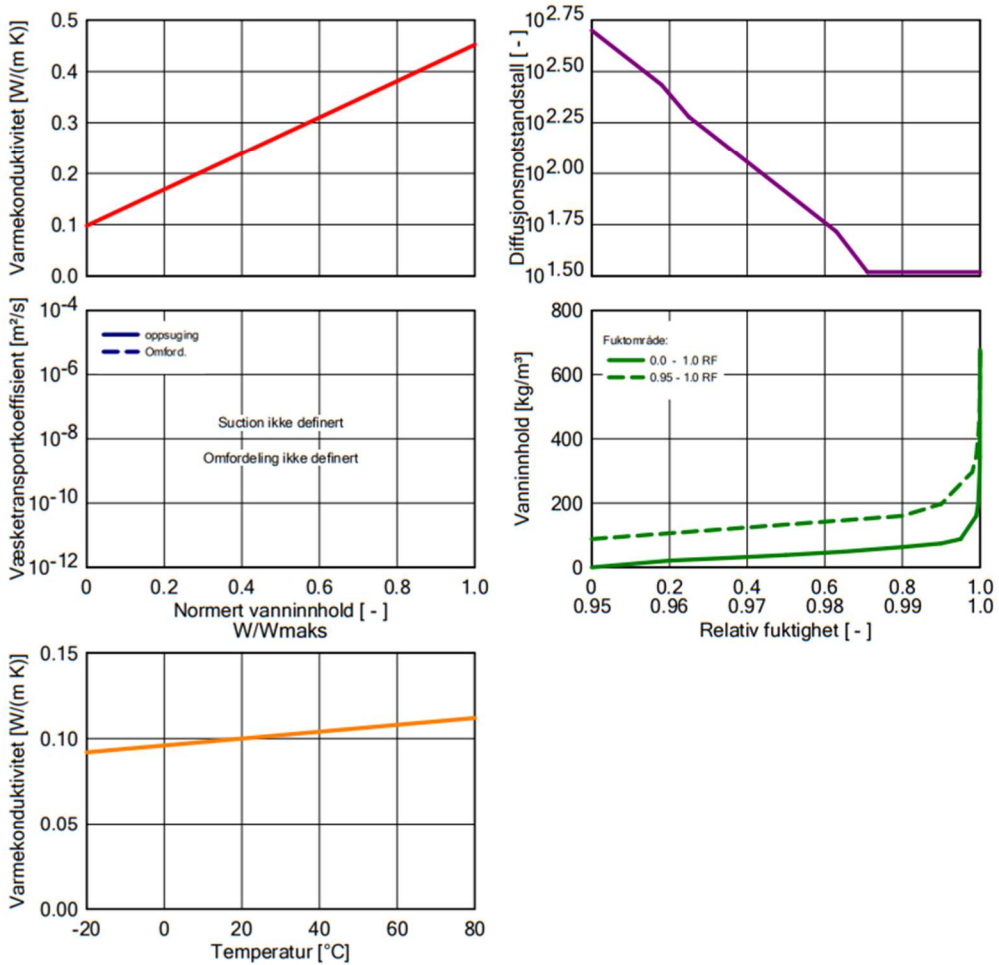
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	130
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Materiale: Stora Enso CLT

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m ³]	410
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.74
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1300
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.098
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	500
Varmekonduktivitetpåslag	[%/M.--%]	2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K ²)]	2,00000E-4
Varmekonduktivitet, designverdi	[W/(m K)]	0.13



WUFI Pro 6.4 NonCommercial

Randvilkår

Ute (venstre side)

Sted for klima: Oslo; NBI / NTNU
Temperaturforskyvning: 0.0 °C
Orientering / Helning: Nord / 0 °

Inne (høyre side)

Inneklima: EN 15026
Normal fuktbelastning +5% (Dimensjonerende) (DIN/WTA)

Overflaters overgangskoeffisient

Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m ² K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Grønt tak, generisk modell	[-]	0.3
Langbølget strålingsemissivitet	Grønt tak, generisk modell	[-]	----
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1.0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

Inne (høyre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand	Tak	[(m ² K)/W]	0.125
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----

Kilder, sluk

generic substrate

Navn	Type		
Moisture source in the sub	<i>Fuktkilde; Andel av slagregn</i>		
	Startdybde i sjiktet	[m]	0.13
	Endedybde i sjiktet	[m]	0.15
	Begrensning til fri vannmetning	[kg/m ³]	300
	Brukerdefinert	[%]	40

Vedlegg 3 – U-verdiberegning

U-verdien i denne masteroppgaven er beregnet på følgende måte, etter NS-EN ISO 6946.

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

- R_{tot} er total varmemotstand (m^2K/W) og er for en homogen bygningsdel lik summen av varmemotstand for hvert sjikt, R , og varmeovergangsmotstanden på utvendig (R_{se}) og innvendig (R_{si}) side av bygningsdelen

- ΔU korreksjonstillegg som tar hensyn til eventuelle luftspalter, mekaniske festemidler som går gjennom isolasjonen og nedbør på omvendte tak. $\Delta U = 0$ i dette tilfellet.

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

U-verdien skulle ligge på $0,13 W/m^2K$, som gir $R = \frac{1}{U} = \frac{1}{0,13} = 7,69 \frac{m^2K}{W}$.

$$R_{n\ddot{o}dv, Foamglas} = 7,69 - 0,17 - 1,63 - 0,18 = 5,71 m^2K/W$$

$$d_{n\ddot{o}dv, Foamglas} = 5,71 * 0,039 = 0,223 m$$

$$R_{n\ddot{o}dv, Rockwool} = 7,69 - 1,25 - 0,17 - 1,63 - 0,18 = 4,46 m^2K/W$$

$$d_{n\ddot{o}dv, Rockwool} = 4,46 * 0,036 = 0,161 m$$

Med varmemotstandene i tabellen under, vil nødvendig tykkelse på Foamglasisolasjonen og Rockwoolisolasjonen bli henholdsvis 223 mm og 161 mm.

Varmemotstand for ulike sjikt

	Foamglas			Rockwool		XPS	Grønt tak	CLT		Rse+Rsi
λ [W / mK]	0,039			0,036		0,040	0,900	0,098		
d [mm]	300	250	200	250	200	50	150	160	320	
R [m2K/W]	7,69	6,41	5,13	6,94	5,56	1,25	0,17	1,63	3,27	0,18

Vedlegg 4 - GWP per oppbygning

	Materiale	GWP, [kg CO2 ekv/m2]	Prosentandel av GWP
Oppbygning 1: Celleglass	Geotekstil	1,65	3 %
	Asfaltmembran	12,58	19 %
	Varmt asfaltlim	4,55	7 %
	Celleglassisolasjon	34,30	52 %
	Asfaltmembran	12,58	19 %
SUM		65,66	-
Oppbygning 2: Glassull + XPS	Geotekstil	1,65	4 %
	XPS	8,28	20 %
	PE-folie	0,73	2 %
	Asfaltmembran	12,58	30 %
	Steinullisolasjon	7,71	18 %
	Underlagsisolasjon	10,49	25 %
	PE-folie	0,73	2 %
SUM		42,16	-36 %
Oppbygning 3: Glassull + XPS + betong	Betongpåstøp	11,41	21 %
	Armeringsnett	2,20	4 %
	PE-folie	0,73	1 %
	XPS	8,28	15 %
	PE-folie	0,73	1 %
	Asfaltmembran	12,58	23 %
	Steinullisolasjon	7,71	14 %
	Glassull	10,49	19 %
	PE-folie	0,73	1 %
SUM		54,85	-16 %
Oppbygning 4: Steinull + XPS	Geotekstil	1,65	3 %
	XPS	8,28	15 %
	PE-folie	0,73	1 %
	Asfaltmembran	12,58	23 %
	Steinullisolasjon	30,89	56 %
	PE-folie	0,73	1 %
SUM		54,86	-16 %
Oppbygning 5: Steinull + XPS + betong	Betongpåstøp	11,41	17 %
	Armeringsnett	2,20	3 %
	PE-folie	0,73	1 %
	XPS	8,28	12 %
	PE-folie	0,73	1 %
	Asfaltmembran	12,58	19 %
	Steinullisolasjon	30,89	46 %
	PE-folie	0,73	1 %
SUM		67,54	3 %
	Geotekstil	1,65	3 %

Oppbygning 6: EPS + XPS	XPS	8,28	15 %
	PE-folie	0,73	1 %
	Asfaltmembran	12,58	23 %
	EPS	22,62	42 %
	Steinullisolasjon	7,71	14 %
	PE-folie	0,73	1 %
SUM		54,29	-17 %
Oppbygning 7: EPS + XPS + betong	Betongpåstøp	11,41	21 %
	Armeringsnett	2,20	4 %
	PE-folie	0,73	1 %
	XPS	8,28	15 %
	PE-folie	0,73	1 %
	Asfaltmembran	12,58	23 %
	EPS	22,62	42 %
	Steinullisolasjon	7,71	14 %
	PE-folie	0,73	1 %
SUM		66,98	2 %

Vedlegg 5 – GWP per materiale

GWP-data hentet fra miljødeklarasjoner

Materialsjikt	Produkt	Produsent	Levetid, [år]	Deklarert enhet	A1-A3	A4	A5	B1-B5 ¹	C2	C3	C4	D	Link produkt	Link EPD	Kilde
Asfaltmembran	Generisk ettlags	Glava	60	1 m2	3,68E+00	2,81E-01	9,81E-01	4,82E+00	7,48E-02	9,41E-02	7,30E+00	-2,98E+00		https://www.epd	(Life cycle engineering, 2014)
Varmt bitumenlim	Generisk	Generisk	60	1 kg	3,56E-01				3,78E-03		0,09479			https://www.oek	(One Click LCA, 2015)
Celleglass	Foamglas T4+	Owens Corning	60	1 kg	1,26E+00	1,69E-02	2,20E-02				1,35E-02	-9,71E-03	https://no.foamglas	https://www.foar	(Institut Bauen and Umwelt e.V. (IBU), 2015)
Geotekstil	Geotextil PP generisk	Generisk	50	1 m2	1,24E+00	1,35E-01			1,78E-09					https://www.360	(One Click LCA, 2015)
XPS	Sundolitt XPS, 300 kPa	Sundolitt	60	1 kg	3,70E+00	1,10E-02	9,30E-02		1,40E-02	1,70E+00	3,70E-03	-1,30E+00	https://www.sundol	https://www.epd	(Melvær og Brekke, 2016)
PE-folie	Gram Dampspærre	Tommen Gram Folie A	60	1 m2 R=1 Km2/W	3,14E-01	9,05E-03	1,57E-02		3,52E-03	3,85E-01	1,58E-06		https://tommen.no	https://www.epd	(Sedal, 2015)
Topplag steinull	Paroc ROB80	PAROC	50	1 m2 R=1 Km2/W	6,80E+00	3,10E-01			2,00E-02		1,01E+00		https://www.paroc	https://www.epd	(Hammarberg, 2014)
Underlag steinull	Paroc ROL60	PAROC	50	1 m2 R=1 Km2/W	4,20E+00	1,90E-01			1,00E-02		6,20E-01		https://www.paroc	https://www.epd	(Hammarberg, 2014)
Glassull	Glava robust lamell, 40 kPa	Glava	60	1 m2 R=1 Km2/W	4,30E-01	1,71E-02	3,83E-02		1,34E-03		3,23E-03		https://www.glava.r	https://media.gla	(Fufa S. M., 2019)
EPS	Generisk, 150 kPa	Generisk	60	1 m2 R=1 Km2/W	2,20E+00	5,70E-03	2,30E-02		6,90E-03	9,30E-01	1,90E-03	-8,00E-01		https://www.epd	(Brekke, 2015)
Armeringsnett	Celsa Standardnett	Celsa	60	1 kg	7,23E-01	4,03E-03							https://celsa-steelse	https://www.epd	(Krokstad og Mortensen, 2020)
Betong 50 mm	Betong B30M60	NorBetong AS	60	1 m3	2,26E+02	2,03E+00								https://www.epd	(Skjeggerud og Amundsen, 2019)

^{1,2,3} Renovasjon og rehabilitering ekskludert i beregningene av total GWP

Total GWP per materiale

Jusert for omgjøringsfaktor, levetidsfaktor og transportdistansefaktor

Materialsjikt	Produkt	Omgjøringsfaktor til per 1m2 tak ¹	Levetidsfaktor ²	Transport-distansefaktor, A4 ³	A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4	D	GWP/m2, [kg CO2/m2]
Asfaltmembran	Generisk, ettlags	1,00	1,00	1,60	3,68E+00	4,50E-01	9,81E-01	7,48E-02	9,41E-02	7,30E+00	-2,98E+00	12,58
Varmt bitumenlim	Generisk	10,00	1,00	1,00	3,56E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,78E-02	0,00E+00	9,48E-01	0,00E+00	4,55
Celleglass	Foamglas T4+	25,00	1,00	4,53	3,15E+01	1,91E+00	5,50E-01	0,00E+00	0,00E+00	3,38E-01	-2,43E-01	34,30
Geotekstil	Geotextil PP generisk	1,00	1,20	1,00	1,49E+00	1,62E-01	0,00E+00	2,14E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,65
XPS	Sundolitt XPS	1,50	1,00	1,00	5,55E+00	1,65E-02	1,40E-01	2,10E-02	2,55E+00	5,55E-03	-1,95E+00	8,28
PE-folie	Gram Dampspærre	1,00	1,00	1,00	3,14E-01	9,05E-03	1,57E-02	3,52E-03	3,85E-01	1,58E-06	0,00E+00	0,73
Topplag steinull	Paroc ROB80	0,79	1,20	1,00	6,44E+00	2,94E-01	0,00E+00	1,89E-02	0,00E+00	9,57E-01	0,00E+00	7,71
Underlag steinull	Paroc ROL60	5,13	1,20	1,00	2,58E+01	1,17E+00	0,00E+00	6,15E-02	0,00E+00	3,82E+00	0,00E+00	30,89
Glassull	Glava robust lamell, 40 kPa	21,40	1,00	1,00	9,20E+00	3,66E-01	8,20E-01	2,87E-02	0,00E+00	6,91E-02	0,00E+00	10,49
EPS	Generisk, 150 kPa	7,14	1,00	1,00	1,57E+01	4,07E-02	1,64E-01	4,93E-02	6,64E+00	1,36E-02	-5,71E+00	22,62
Armeringsnett	Celsa Standardnett	3,02	1,00	1,00	2,18E+00	1,22E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,20
Betong 50 mm	Betong B30M60	0,05	1,00	1,00	1,13E+01	1,02E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	11,41

^{1,2,3} Omgjøringsfaktor, levetidsfaktor og transportdistansefaktor regnet ut i vedlegg 6

Prosentandel bidrag per levetidsfase

Materialsjikt	Produkt	A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4
Asfaltmembran	Generisk	29,3 %	3,6 %	7,8 %	0,6 %	0,7 %	58,0 %
Varmt bitumenlim	Generisk	78,3 %	0,0 %	0,0 %	0,8 %	0,0 %	20,8 %
Celleglass	Foamglas T4+	91,8 %	5,6 %	1,6 %	0,0 %	0,0 %	1,0 %
Geotekstil	Geotextil PP generisk	90,2 %	9,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
XPS	Sundolitt XPS	67,0 %	0,2 %	1,7 %	0,3 %	30,8 %	0,1 %
PE-folie	Gram Dampspærre	43,2 %	1,2 %	2,2 %	0,5 %	52,9 %	0,0 %
Topplag steinull	Paroc ROB80	83,5 %	3,8 %	0,0 %	0,2 %	0,0 %	12,4 %
Underlag steinull	Paroc ROL60	83,7 %	3,8 %	0,0 %	0,2 %	0,0 %	12,4 %
Glassull	Glava robust lamell, 40 kPa	87,8 %	3,5 %	7,8 %	0,3 %	0,0 %	0,7 %
EPS	Generisk, 150 kPa	69,5 %	0,2 %	0,7 %	0,2 %	29,4 %	0,1 %
Armeringsnett	Celsa Standardnett	99,4 %	0,6 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Betong 50 mm	Betong B30M60	99,1 %	0,9 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Prosentandel bidrag A1-A4 mot A5+C2-C4

Materialsjikt	Produkt	Vugge til portA1-A4		Port til gravA5+C2-C4	
		Andel	GWP	Andel2	GWP3
Asfaltmembran	Generisk	33 %	4,13E+00	67 %	8,45E+00
Varmt bitumenlim	Generisk	78 %	3,56E+00	22 %	9,86E-01
Celleglass	Foamglas T4+	97 %	3,34E+01	3 %	8,88E-01
Geotekstil	Geotextil PP generisk	100 %	1,65E+00	0 %	2,14E-09
XPS	Sundolitt XPS	67 %	1,65E+00	33 %	2,14E-09
PE-folie	Gram Dampspærre	44 %	5,57E+00	56 %	2,72E+00
Topplag steinull	Paroc ROB80	87 %	3,23E-01	13 %	4,04E-01
Underlag steinull	Paroc ROL60	87 %	6,74E+00	13 %	9,76E-01
Glassull	Glava robust lamell, 40 kPa	91 %	2,70E+01	9 %	3,88E+00
EPS	Generisk, 150 kPa	70 %	9,57E+00	30 %	9,17E-01
Armeringsnett	Celsa Standardnett	100 %	9,57E+00	0 %	9,17E-01
Betong 50 mm	Betong B30M60	100 %	1,57E+01	0 %	6,87E+00
Totalt		81 %	1,19E+02	19 %	2,70E+01

Vedlegg 6 – Omgjøringsfaktorer

Omgjøringsfaktorer

Isolasjon		Deklarert enhet	Tykkelse EPD, mm	Tykkelse konstruksjon, mm	Densitet, [kg/m3]	Skaleringsfaktor	Omgjøringsfaktor til per m2	Total omgjøringsfaktor til per m2 tak
Celleglassisolasjon	Foamglas T4+	1 kg		250	100	1	25	25,00
XPS	Sundolitt XPS	1 m2 med R=1 Km2/W	33	50		1,5	1	1,50
EPS	Generisk	1 m2 med R=1 Km2/W	38	170		7,14	1	7,14
Topplag steinull	Paroc ROB80	1 m2 med R=1 Km2/W	38	30		1	0,789473684	0,79
Underlag steinull	Paroc ROL60	1 m2 med R=1 Km2/W	39	200		1	5,128205128	5,13
Underlag glassull	Glava Robust lamell	1 m2 med R=1 Km2/W	39	170		21,4	1	21,40

Andre materialer

Bygningsdel	Produkt	Deklarert enhet	Mengde per lag Enhet	Antall lag	Total omgjøringsfaktor til uslipp per m2
Asfaltmembran	Generisk	1 m2		1	1
Varmt asfaltlim	Generisk	1 kg	4 kg/m2	2	10
PE-folie	Gram Dampsperre	1 m2			1
Geotekstil	Geotextil PP generisk	1 m2	0,3 kg/m2	1	1
Armeringsnett	Celsa standardnett	1 kg	30,2 kg/nett (2x5m)	1	3,02
Armert betong 50 mm	Betong B30M60	1 m3	50 mm		0,05

Transportdistansefaktorer

Bygningsdel	Produkt	Transport inkludert [km]	Antatt reell transportavstand, [km]	Transportavstandsfaktor, [km]
		A4 inkl.	A4 ant.	A4 ant./A4 inkl
Asfaltmembran	Generisk	500	800	1,60
Varmt asfaltlim	Generisk			1,00
Celleglassisolasjon	Foamglas T4+	350	1585	4,53
XPS	Sundolitt XPS	100	100	1,00
PE-folie	Gram Dampsperre	80	80	1,00
Geotekstil				1,00
Topplag steinull	Paroc ROB80	500	500	1,00
Underlag steinull	Paroc ROL60	500	500	1,00
Armert betong 50 mm	Betong B30M60	10	10	1,00
Glassull	Glava robust lamell			1,00

