Masteroppgave

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

Tobias Flø Faukald

Beregninger av fuktforholdene i yttervegger mot terreng

Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk
Veileder: Tore Kvande
Medveileder: Silje Kathrin Asphaug
Juni 2021

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Tobias Flø Faukald

Beregninger av fuktforholdene i yttervegger mot terreng

Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk
Veileder: Tore Kvande
Medveileder: Silje Kathrin Asphaug
Juni 2021

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

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Hovedårsaken til skader i norske bygninger skyldes fukt og følgeskader av fukt. For yttervegger under terreng vil beregning av fuktsikring være krevende, ettersom det ikke finnes en standardisert metode for å ta hensyn til de ulike påkjenningene som varierer med dybden på kjellerveggen. Dessuten er det stor usikkerhet i hvilken grad ulike utvendige forhold påvirker kjellerveggens uttørkingsforløp, og hvilke forhold som bør inkluderes i en slik beregning. Det er et behov for å undersøke hvordan eksisterende beregningsmetoder kan forbedres og hvordan de utvendige grensebetingelsene under bakken bør beregnes.

På bakgrunn av dette har tidligere forskning blitt undersøkt med et formål. Finne et simuleringsverktøy som egner seg til hygrotermiske beregninger av kjellervegger, samt utvikle et beregningsoppsett for undersøkelser av kjellerveggens uttørkingsforløp. Det er foretatt simuleringer i WUFI Pro og WUFI2D og resultatene fra simuleringene har blitt undersøkt. I hver av de ulike simuleringsverktøyene er det forsøkt med ulikt beregningsoppsett for å simulere uttørkingsforløpet til en kjellervegg. En parameterstudie er gjennomført for å bestemme hvilke utvendige forhold som skal inkluderes i en hygrotermisk beregning av en kjellervegg. Funn fra parameterstudien konkluderte med at solstråling og jordens varmeledningsevne kan påvirke uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Påvirkningen disse to utvendige forholdene har på uttørkingsforløpet til en kjellervegg ble undersøkt og vurdert.

Simuleringsverktøyet som benyttes i oppgaven er WUFI2D. Som beregningsoppsett for simuleringene ble det valgt en 2- stegs metode. Metoden baserer seg på å dele opp varmestrøms- og fukttransportberegningen ettersom WUFI2D hadde problemer med å simulere jord med et høyt fuktinnhold. I steg 1 av metoden utføres en varmestrømsberegning. Beregningsoppsettet i steg 1 inkluderer grunnen og kjellerveggkonstruksjonen. Temperaturene som oppstår i ulike sjikt langs kjellerkonstruksjonen som er i kontakt med grunnen, benyttes sammen med en konstant RF på 99 % til å lage klimafiler. Klimafilene viser hvordan utvendige påkjenninger endres med dybden langs konstruksjonen. I steg 2 av metoden gjennomføres en fuktsimulering hvor kun kjellerkonstruksjonen er inkludert. Grunnen har blitt erstattet av klimafilene fra varmestrømsberegningen. Gjennom å måle RF i ulike monitorpunkter plassert i veggen vil uttørkingsforløpet til veggen kunne undersøkes.

2- stegs metoden er brukt i oppgaven for å undersøke hvordan to utvendige forhold, solstråling og varmeledningsevne i jorda, påvirker uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Resultatet fra beregningene viser at solstråling påvirket uttørkingsforløpet i størst grad og ga lavest RF i veggen både over og under terrenget. Over terrenget ble damptrykkgradienten i visse perioder vendt innover på grunn av solstrålingen. Jordens varmeledningsevne påvirket uttørkingsforløpet til en kjellervegg, men i mindre grad enn solstråling. I øvre del av veggen ga lav varmeledningsevne lavest RF i veggen. I nedre delen av veggen ga derimot høyest varmeledningsevne lavest RF i veggen.

For å gjennomføre en beregning av uttørkingsforløpet til en kjellervegg bør beregninger i WUFI2D gjøres med en 2- stegs metode. For fremtidige beregninger bør solstråling inkluderes i hygrotermiske simuleringer, ettersom solstråling har en stor påvirkning på kjellerveggens uttørkingsforløp. Forskjellene i uttørkingsforløpet for en kjellervegg med høy eller lav varmeledningsevne i jorden er små.

Abstract

The main cause of damage in Norwegian buildings is due to moisture and consequential damage from moisture. For external walls below grade, calculation of moisture protection will be demanding, as there is no standardized method for taking into account the various stresses that vary with the depth of the basement wall. In addition, there is great uncertainty as to the extent to which various external conditions affect the drying process of the basement wall, and which factors should be included in such a calculation. There is a need to investigate how existing calculation methods can be improved and how the external boundary conditions below grade should be calculated.

Based on this, previous research has been investigated with a purpose. Find a simulation tool that is suitable for hygrothermal calculations of basement walls, as well as develop a calculation setup for investigations of the drying process of the basement wall. Simulations have been performed in WUFI Pro and WUFI2D and the results from the simulations have been examined. In each of the different simulation tools, different calculation layouts have been tested to simulate the drying process of a basement wall. A parameter study has been carried out to determine which external conditions are to be included in a hygrothermal calculation of a basement wall. Findings from the parameter study concluded that solar radiation and the ground's thermal conductivity can affect the drying process of a basement wall. The impact of these two external conditions on the drying process of a basement wall was investigated and assessed.

The simulation tool used in the thesis is WUFI2D. A 2-step approach was chosen as the calculation setup for the simulations. The approach is based on dividing the heat flow and moisture transport calculation as WUFI2D had problems simulating soil with a high moisture content. In step 1 of the approach, a heat flow calculation is performed. The calculation layout in step 1 includes the ground and the basement wall construction. The temperatures that occur in different depths along the basement envelope where the wall is in contact with the ground, are used together with a constant RH of 99 % to create climate files. The climate files show how the external stresses changes with the depth along the basement envelope. In step 2 of the method, a moisture simulation is carried out where only the basement construction is included. The ground has been replaced by the climate files from the heat flow calculation. By measuring RH in different monitor points placed in the wall, the drying process of the wall can be investigated.

The 2-step method is used in the thesis to investigate how two external conditions, solar radiation and thermal conductivity in the soil, affect the drying process of a basement wall. The results from the calculations show that solar radiation affected the drying process to the greatest extent and gave the lowest RH in the wall both above and below grade. Above grade, the moisture flow in certain periods was turned inwards due to the solar radiation. The earth's thermal conductivity affected the drying process of a basement wall, but to a lesser extent than solar radiation. Above grade, low thermal conductivity gave the lowest RH in the wall. Below grade, the highest thermal conductivity gave the lowest RH in the wall

To perform a calculation of the drying process of a basement wall, calculations in WUFI2D should be made using a 2-step method. For future calculations, solar radiation should be included in hygrothermal simulations, as solar radiation has a large impact on the drying process of the basement wall. The differences in the drying process for a basement wall with high or low thermal conductivity in the soil are small.

Forord

Studien er skrevet våren 2021. Prosjektet hadde som mål å utvikle et generelt beregningsoppsett for beregninger uttørkingsforløpet til yttervegger mot terreng, samt å undersøke utvendige forhold som påvirker uttørkingsforløpet til en kjellervegg.

Takk til Tore Kvande for tilrettelegging av masteroppgave

En spesiell takk rettes også til Silje Asphaug for tett oppfølging under hele masteroppgaven og spesielt god veiledning.

Jeg vil også takke samboeren min, for støtte under lange perioder med mye arbeid i oppgaven. En takk rettes også til BA studentene på Lerka for gode pause når det trengtes som mest.

Innhold

Figurer xi
Tabeller xii
1 Innledning 15
1.1 Bakgrunn 15
1.2 Formål 16
1.3 Rapportens oppbygning 16
2 Teori 17
2.1 Utvendige forhold som påvirker uttørkingsforløpet til en yttervegg mot terreng 17
2.2 Fukttransport 19
2.3 Oppbygning av yttervegger mot terreng 21
2.4 Typiske fuktskader i materialer og kjellervegger 22
2.5 Isolasjons- og forskalingssystemer for kjellervegger 25
2.6 Simuleringsverktøy 27
3 Metode 29
3.1 Utviklingen av en metode for beregninger av fuktforholdene til yttervegger mot terreng 29
3.2 Beregning av fuktforhold i yttervegg mot terreng 32
3.2.1 Simuleringer i WUFI 32
3.2.2 Beregning av utvendige grensebetingelser under terreng 37
3.2.3 Fuktsimuleringer av kjellerkonstruksjonen 40
3.3 Undersøkelser av hvilke utvendige forhold som påvirker fuktforholdene i kjellervegger 43
3.4 Styrker og svakheter ved simuleringer i WUFI2D 44
4 Resultater 47
4.1 Simulering av uttørkingsforløpet til kjellervegger 47
4.2 Påvirkningen solstråling og jordens varmeledningsevne har på uttørkingsforløpet til en kjellervegg 47
4.2.1 Utvendig side av utvendig isolasjon 51
4.2.2 Innvendig side av utvendig isolasjon 52
4.2.3 Utvendig side av betongen 54
4.2.4 Midten av betong 56
4.2.5 Innvendig side av betong 58
4.2.6 Utvendig side av innvendig isolasjon 60
4.2.7 Innvendig side av innvendig isolasjon 62
4.2.8 Utvendig side av trevirke 64
4.2.9 Innvendig side av trevirke 66

5 Diskusjon 69
5.1 Hvordan utføre beregninger av kjellerveggens uttørkingsforløp 69
5.2 Påvirkningen solforhold og jordens varmeledningsevne har på en kjellervegg støpt i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem 70
5.3 Anbefalinger for hygrotermiske beregninger av yttervegg mot grunn 73
6 Konklusjon 75
6.1 Videre arbeid 76
7 Referanser 77
Vedlegg 81
Vedlegg A: Innledende beregninger 82
Vedlegg B: Temperaturvariasjoner i ulike dybder langs kjellerveggen, benyttet til utvikling klimafiler 87

Figurer

Figur 2-1: Identifisering av jordtyper basert på innhold av leire, silt og sand (Pallin & Kehrer, 2012) 17
Figur 2-2: Betongvegg under terreng, 50 % av isolasjon på utvendig side (SINTEF Byggforsk, 2015)....22
Figur 2-3: Oppfuktingsmekanismer og skadeårsaker for uisolerte kjellervegger (SINTEF Byggforsk, 2006)....24
Figur 2-4: Eksempel på oppbygning av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem (SINTEF Certification, 2019a)....25
Figur 3-1: Varmeledningsevne som funksjon av vanninnhold for 12 jordtyper definert i WUFI 30
Figur 3-2: Tverrsnitt av konstruksjonen som benyttes som case i masteroppgaven....31
Figur 3-3: 2 stegs metode for simuleringene i WUFI2D. Steg 1: varmestrømsberegning, steg 2: fuktsimulering 32
Figur 3-4: Geometri og oppbygging av kjellerveggen som det skal utføres en varmestrømsberegning og en fuktsimulering på i WUFI2D 33
Figur 3-5: Sorpsjonskurve for furu, trefuktighet (vektprosent) som funksjon av relativ fuktighet (SINTEF Byggforsk, 2018a) 35
Figur 3-6: Dimensjonene til grunnen som må inkluderes i varmestrømsberegningen av konstruksjonen. Avgrensningene er adiabatiske grenser. Konstruksjonen er i topp av høyre hjørnet. 37
Figur 3-7: Sjikt hvor det leses av temperaturer langs kjellerveggen og dekke. Brukes for utvikling av klimafiler. 38
Figur 3-8: Temperaturvariasjon i ulike dybder langs kjellerveggen, for varianten m/sol og λ=1,5 W/mK....39
Figur 3-9: Høydene til monitorpunktene i konstruksjonen. Tverrsnittet som monitorpunktene er plassert i er skravert og markert topp og bunn 41
Figur 3-10: Plassering av monitorpunkter i veggen med avstander fra utvendig side og bredde til hvert av materialene i konstruksjonen 42
Figur 4-1: Uttørkingsforløpet gjennom hele veggen for varianten u/sol, λ=2,0 W/mK, i øvre del av konstruksjonen 50
Figur 4-2:Uttørkingsforløpet gjennom hele veggen for varianten u/sol, λ=2,0 W/mK, i nedre del av konstruksjonen 50
Figur 4-3: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 0 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 51
Figur 4-4: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 0 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 51
Figur 4-5: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 53
Figur 4-6: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 53
Figur 4-7: Uttørkingsforløp for betongen, 80 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 55
Figur 4-8: Uttørkingsforløp for betongen, 80 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 55
Figur 4-9: Uttørkingsforløp for betongen, 150 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 57

Figur 4-10: Uttørkingsforløp for betongen, 150 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 57
Figur 4-11: Uttørkingsforløp for betongen, 220 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 59
Figur 4-12: Uttørkingsforløp for betongen, 220 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 59
Figur 4-13: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 61
Figur 4-14: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 61
Figur 4-15: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 63
Figur 4-16: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 63
Figur 4-17: Uttørkingsforløp for trevirke, 300 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 65
Figur 4-18: Uttørkingsforløp for trevirke, 300 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 65
Figur 4-19: Uttørkingsforløp for trevirke, 348 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år 67
Figur 4-20: Uttørkingsforløp for trevirke, 348 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år 67

Tabeller

Tabell 2-1: Materialegenskaper for 12 ulike jordtyper definert i WUFI av Pallin og Kehrer (2012). Vanninnhold = 0 kg/m^3 18
Tabell 2-2: Kritisk RF for trevirke.....23
Tabell 2-3: Typiske feil under dimensjonering/utførelse og tilhørende fuktskader på kjellervegger.....24
Tabell 2-4: Dimensjoner og egenskaper til kombinerte isolasjons- og forskalingssystemer av EPS som har Teknisk Godkjenning fra Sintef.....26
Tabell 2-5: Transportmekanismer som er inkludert og ikke-inkludert i WUFI2D (WUFI2D, 2008) 27
Tabell 3-1: Materialegenskaper i for materialene som er brukt i konstruksjonen. Egenskapene er hentet fra WUFIs materialdatabase.....34
Tabell 3-2: Initialfukt i materialer som ikke har konservativ RF på 80% 35
Tabell 3-3: Grensebetingelser for simuleringer i WUFI2D 36
Tabell 3-4: Beregningsmessige parametere for varmestrømsberegning og utvikling av klimafiler 39
Tabell 3-5: Monitorpunkter for fuktsimuleringen i WUFI2D, gjøres fra utsiden av veggen og innover. Inkluderer bredde og x- koordinat i WUFI- gridet.....42
Tabell 3-6: Beregningsmessige parametere, fuktsimulering 43
Tabell 3-7: Varmeovergangskoeffisient og absorpsjonsfaktorer for overflater, for beregningsvarianter med og uten sol 43
Tabell 3-8: Egenskaper for jordtypen benyttet i simuleringene. Varmeledningsevnen er konstant og basert på NS-EN ISO 13370:2017.....44
Tabell 3-9: Parametervariasjonstabell 44

Tabell 4-1: RF- verdi målt etter 10 år, øvre del av vegg, med og uten sol, ulik lambda. Høyeste målt RF er markert rødt, lavest målt RF er markert grønn 48
Tabell 4-2: RF- verdi målt etter 10 år, nedre del av vegg, med og uten sol, ulik lambda. Høyeste målt RF er markert rødt, lavest målt RF er markert grønn 49
Tabell 4-3: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 52
Tabell 4-4: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 53
Tabell 4-5: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 54
Tabell 4-6: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 55
Tabell 4-7: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 150 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 56
Tabell 4-8: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 150 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 56
Tabell 4-9: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 58
Tabell 4-10: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 58
Tabell 4-11: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 60
Tabell 4-12: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 60
Tabell 4-13: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 62
Tabell 4-14: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 62
Tabell 4-15: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 64
Tabell 4-16: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 64
Tabell 4-17: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 348 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen 66

Tabell 4-18: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 348 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen 66

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Anslagsvis 75 % av alle skadene i norske bygninger skyldes fukt eller følgeskader av fukt (SINTEF Byggforsk, 2018a). 7 % av fuktskadene opptrer i tilknytning til yttervegger mot terreng (Lisø, et al., 2006). Fuktteknisk vil yttervegger mot terreng være mer kompliserte enn yttervegger over terreng. Påkjenningen mot en yttervegg over terreng vil være lik over hele veggens høyde, mens under terrengoverflaten vil temperaturforholdene, og dermed påkjenningene være ulike. Under terrengoverflaten vil veggen påkjennes utenfra av fukt i grunnen i damp- og væskeform (Geving & Thue, 2002). Det at påkjenningen langs kjellerveggens høyde ikke er homogen gjør hygrotermiske beregninger og fuktsikring av yttervegger mot terreng utfordrende.

Som fuktsikring av yttervegger mot terreng anbefaler Byggforskserien at minst 50 % av isolasjonen i konstruksjonen plasseres på utvendig side. En slik plassering vil gi en tørrere vegg og redusere risiko for fuktskader (SINTEF Byggforsk, 2015). En kapillærbrytende- og vannavvisende grunnmursplate kan plasseres på den utvendige isolasjonen for å beskytte mot kapillær fuktvandring inn i veggen. Grunnmursplaten vil også beskytte veggen mot utvendige tilfyllingsmasser (SINTEF Byggforsk, 2020).

Å bygge opp kjellerveggen i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem er populært ettersom metoden er rask og effektiv. I forskalingssystemet fungerer isolasjonen på betongveggen også som forskaling for den støpte betongen. Metoden kan gi utfordringer for fuktsikkerheten til konstruksjonen ettersom en høy mengde byggfukt fra betongen må diffundere gjennom isolasjonen mot innvendig og utvendig side.

Varmetapet fra en kjellervegg mot grunnen beregnes etter standarden NS-EN ISO 13370:2017. I standarden inkluderes ikke de koblede effektene mellom varme- og fukttransport. Termisk- konduktivitet og kapasitet i grunnen er antatt konstante i tid og rom (Standard Norge, 2017a). Standarden er blitt kritisert og det er bevist en koblet effekt mellom varme- og fukttransport i grunnen. I tillegg blir termisk- konduktivitet og kapasitet påvirket av fuktinnholdet i grunnen. Utvendige forhold er vist å påvirke varmetapet fra en yttervegg mot terreng i større grad enn hvilken jordtype som befinner seg på utvendig side av kjellerveggen (Janssen, et al., 2004).

Det er ikke funnet et generelt beregningsoppsett som inkluderer endrede utvendige påkjenninger langs en kjellervegg. Ved bruk av et slik beregningsoppsett vil det være mulig å simulere uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Hvilket simuleringsverktøy som er best egnet for en slik beregning må også undersøkes. Det er også usikkerhet rundt hvilke utvendige forhold og hvilke av jordens egenskaper som påvirker kjellerveggens uttørkingsforløp. Fuktpåkjenningen i en konstruksjon ved bruk av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem er heller ikke godt dokumentert.

1.2 Formål

Masteroppgavens formål er to-delt. Den første delen er å identifisere et beregningsoppsett for å undersøke uttørkingsforløpet til yttervegger mot terreng. Oppgavens andre formål er å bruke beregningsoppsettet for å undersøke i hvilken grad utvendige faktorer påvirker uttørkingsforløpet til kjellerveggen. Helt konkret søker oppgaven å finne svar på disse tre forskningsspørsmålene:

1. Hvordan kan uttørkingsforløpet til yttervegger mot terreng undersøkes ved simuleringer?
2. Hvordan påvirker solforhold og jordens varmeledningsevne uttørkingsforløpet til kjellervegger støpt i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem?
3. Hvilke anbefalinger kan gis for hygrotermiske beregninger for yttervegger mot terreng?

Identifisering og utvikling av et beregningsoppsett for undersøkelser av uttørkingsforløpet til en kjellervegg viste seg å være en tidkrevende prosess. Dette gjorde at tiden for å utføre faktiske beregninger ble begrenset. Derfor undersøker masteroppgaven kun fire endringer på utvendige forhold og alle beregninger benytter lik oppbygning av kjellerveggen. Det kunne vært interessant å vurdere flere utvendig forhold samt ulik oppbygning av kjellerveggen dersom det hadde vært tid.

1.3 Rapportens oppbygning

Første del av oppgaven beskriver identifiseringen og utviklingen av et beregningsoppsett for undersøkelser av kjellerveggens uttørkingsforløp, samt hvordan beregningsoppsettet benyttes. Andre del beskriver hvilke parametere som er undersøkt og presenterer resultater fra beregninger av kjellerveggens uttørkingsforløp.

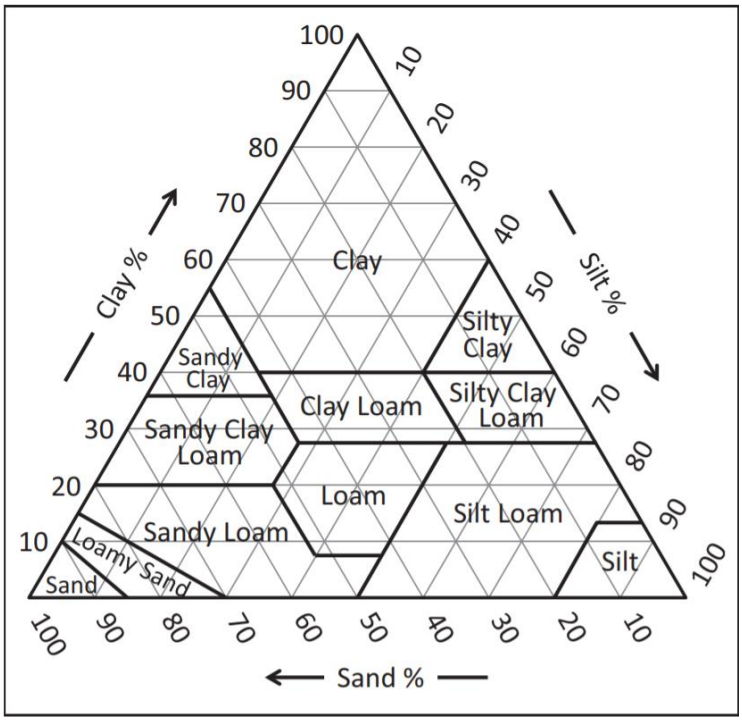
Vedleggene i rapporten er to- delt. I vedlegg A er det inkludert grafer som skal underbygge valgene som er gjort i utviklingen av beregningsoppsettet. Vedlegg B inneholder resultater fra varmestrømsberegningen av kjellerveggen. Resultatene i vedlegg B benyttes for å gjennomføre en fuktsimulering av kjellerveggen.

2 Teori

2.1 Utvendige forhold som påvirker uttørkingsforløpet til en yttervegg mot terreng

Det er knyttet stor usikkerhet i hvilken grad uttørkingsforløpet til en konstruksjon mot grunnen, blir påvirket av jordtypen som befinner seg på utvendig side av konstruksjonen. Samt betydningen det utvendige klimaet, og faktorer som solforhold har på uttørkingsforløpet til en konstruksjon mot grunnen.

For å undersøke hvordan grunnforholdene påvirker varmetapet fra en yttervegg mot terrenget, er det viktig å kartlegge hvilke jordtyper som er definert og hva som skiller de. Pallin og Kehrer (2012) har identifisert 12 ulike jordtyper og hva som skiller de, basert på innhold av leire, silt og sand. Fordelingen av jordtypene kan sees i Figur 2-1.



Figur 2-1: Identifisering av jordtyper basert på innhold av leire, silt og sand (Pallin & Kehrer, 2012)

De 12 ulike jordtypene som er definert vil ha ulike hygrotermiske egenskaper. Egenskapene til jordtypene er funnet av Pallin og Kehrer (2012) gjennom programvaren Rosetta. Rosetta er et beregningsprogram for estimering av grunnens hydrauliske karakteristikk (USDA, 2019). Tabell 2-1 viser jordtypene og de ulike materialegenskapene som er definert i WUFI av Pallin og Kehrer (2012).

Tabell 2-1: Materialegenskaper for 12 ulike jordtyper definert i WUFI av Pallin og Kehrer (2012). Vanninnhold = 0 kg/m³

	Clay	Clay Loam	Loam	Loamy Sand	Sand	Sandy Clay	Sandy Clay Loam	Sandy Loam	Silt	Silt Loam	Silty Clay	Silty Clay Loam
Densitet [kg/m³]	1267	1361	1287	1507	1579	1400	1522	1500	1387	1439	1396	1284
Porøsitet [m³/m³]	0,517	0,476	0,504	0,429	0,404	0,472	0,419	0,400	0,510	0,448	0,500	0,504
Varme-kapasitet [J/kgK]	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
Varme-ledningsevne [W/mK]	0,288	0,350	0,401	0,488	0,505	0,378	0,412	0,455	0,361	0,369	0,289	0,318
Fukt-motstand [-]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Dagens måte å beregne varmetapet fra en yttervegg mot terreng på beskrives i standarden NS-EN ISO 13370:2017 (Standard Norge, 2017a). Metoden baserer seg på at det ikke er en koblet effekt mellom varme- og fukttransport, og termisk konduktivitet og kapasitet er antatt konstante i tid og rom.

Standarden er blitt kritisert av Janssen, et al. (2004) som poengterer at metoden er for generell og ikke inneholder nok parametere som vil påvirke varmetapet fra en yttervegg mot terreng. Det største problemet med metoden i NS-EN ISO 13370:2017 er at i standarden inkluderes ikke de koblede effektene av varme- og fukttransport. Dersom den koblede effekten inkluderes i beregningen, vil varmetapet bli betraktelig større.

Janssen, et al. (2004) diskuterer hvilke faktorer som vil påvirke varmetapet fra en yttervegg mot terreng. Faroukis studier (1982, som sitert i Janssen, et al. 2004) konkluderte med at termisk konduktivitet og kapasitet blir påvirket av fuktinnhold i grunnen. Delsantes studier (1990, som sitert i Janssen, et al. 2004*)* konkluderte med at både den termiske konduktiviteten og kapasiteten til grunnen påvirker varmetapet fra en yttervegg mot terreng. Dermed kan det konkluderes med at både grunnens konduktivitet og kapasitet påvirkes av fuktinnholdet i grunnen, og varmetapet fra ytterveggen mot terreng påvirkes av fuktinnholdet i grunnen.

Rees, et al. sine studier (2001, som sitert i Janssen, et al. 2004) konkluderte med at fordampningen av fukt på overflaten påvirker varmetapet fra en yttervegg mot terreng. Derus studier (2003, som sitert i Janssen, et al. 2004) undersøkte hvordan nedbør påvirker varmetapet fra en yttervegg mot terreng. Gjennom to ulike simuleringer hvor nedbør var inkludert og ekskludert, ble konklusjonen at varmetapet fra en kjellervegg blir påvirket av grunnens fukttransport.

Bahnfleths studier (1990, som sitert i Janssen et al. 2004) har sett på virkningen solstråling kan ha på grunntemperaturen, og hvordan varmetapet fra en yttervegg mot terrenget påvirkes av solstrålingen. Grunntemperaturen er vanligvis styrt av den utvendige luft-temperaturen (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015). Varmetapet til kjellerveggen ble drastisk endret dersom solstråling ble inkludert i simuleringene.

Etter at de ulike faktorene har blitt inkludert i varmetapsberegninger av yttervegg mot terreng, kunne Janssen et al. (2004) komme med følgende anbefaling om endringer av NS-EN ISO 13370:2017. Fuktinnholdet i grunnen vil påvirke varmetransporten gjennom 3 mekanismer:

- Grunnens termiske konduktivitet og kapasitet er påvirket av grunnens fuktinnhold
- Transport, lagring og faseendringer av fukt resulterer i en samtidig transport og lagring av latent varme
- Fordampning er en integral del av overflatens varmebalanse

Disse 3 mekanismene gjør at bygningens varmetap mot terrenget blir et ikke-lineært problem og mer avansert enn tidligere antatt. Derfor mener Janssen et al. (2004) at den koblede effekten mellom varme- og fukttransport må inkluderes når varmetapet fra en yttervegg mot terrenget skal beregnes. Grunnens fukttransport vil påvirke kjellerveggens varmetap og skyldes i hovedsak 3 koblede effekter:

- Overflatetemperaturens amplitude (solstråling)
- Variasjon av termisk konduktivitet (fuktinnhold i grunnen)
- Varmetransport og permeans i vegger og gulv mot grunnen

Det ble og konkludert med at det ikke bare er egenskapene til de forskjellige jordtypene som styrer varme- og fukttransporten i grunnen, men transportmekanismene styres i hovedsak av det utvendige klimaet (Janssen, et al., 2004).

2.2 Fukttransport

Fukt fra grunnen kan transporteres inn i en yttervegg ved hjelp av vanntrykk, kapillærsuging og diffusjon. For yttervegger mot terreng vil uttørking av byggfukt være utfordrende, men viktig for å oppnå en konstruksjon med lav risiko for fuktskader (Geving & Thue, 2002).

Vanndampdiffusjon

Diffusjon skyldes vannmolekylenes egenbevegelser. Forskjeller i vanndampens partialtrykk er vanligvis dominerende som drivkraft, og diffusjon vil utjevne forskjellene i partialtrykket ved transport av vanndamp i retning av lavere vanndamptrykk. Om fukttransport ved vanndampdiffusjon vil skje innover eller utover av en konstruksjon avhenger av retningen på damptrykkgradienten. Dersom temperaturen i grunnen inntil bygningen varierer mye over året kan retningen på damptransporten endres med årstiden. Temperaturvariasjonene avtar med økende avstand fra terrengoverflaten, og i dybder på 2-3 meter vil temperaturen være konstant. Dette gjør at vanndamptrykket i grunnen også er konstant gjennom året (Geving & Thue, 2002).

Ren diffusjon skjer fra høye temperaturer mot lavere temperaturer, fordi damptrykket vil være høyest der lufta er varmest. Dersom temperaturen er lik på begge sider av konstruksjonen, vil dampstrømmer bare avhenge av vanndampens diffusjonstall og vanndampkonsentrasjonsendring (Thue, 2016). Dersom det er en innoverrettet damptrykkgradient vil fukt diffundere fra grunnen og inn i konstruksjonen. I en viss dybde

under terrengnivå vil det være betingelser for diffusjon innover om vinteren, og diffusjon utover om sommeren dersom kjelleren ikke er oppvarmet. For konstruksjoner mot terreng er det særlig diffusjon innenfra og utover som gir kondens innvendig i konstruksjonen og oppfukting over tid (Geving & Thue, 2002). Dette skyldes at varm inneluft diffunderer mot kald side av konstruksjonen, og når luft blir kjølt ned i retning utvendig side vil relativ fuktighet (RF) i lufta øke. Dersom RF i lufta blir 100 % vil det felles ut kondens og det vil bli en oppfukting av konstruksjonen (SINTEF Byggforsk, 2018a)

Fuktkonveksjon

Ved luftstrømming gjennom en konstruksjon vil luftas vanndampinnhold gi opphav til en fukttransport. Dette kalles *fuktkonveksjon.* Drivkraften for en slik luftstrømning er forskjeller i luftas totaltrykk, og vanndamp transporteres fra høyt lufttrykk til lavt lufttrykk. Lokale uregelmessigheter som sprekker, utettheter o.l. har stor innvirkning på forløpet av luftstrømningen, og vil være vanskelig å håndtere beregningsmessig (Geving & Thue, 2002).

Dersom konstruksjonen har dårlig lufttetthet, lekkasjer e.l., kan fuktig poreluft fra grunnen suges inn i konstruksjon via luftlekkasjer og forårsake kondens på kalde flater. I kjellere er det vanligvis et undertrykk, og hvis luft fra grunnen siger inn mellom innvendig isolasjon og betong kan det oppstå kondens i øvre del av veggen i kalde årstider (Geving & Thue, 2002).

Kapillærledning

Kapillærledning er vanntransport i vannfylt porer på grunn av forskjeller i porevannundertrykk. Grunnen vil ha en stabil RF- verdi på 99 % (Standard Norge, 2007), og ved dette nivået vil væsketransporten bli dominerende og større enn vanndamptransporten (Geving & Thue, 2002). Væsketransporten skjer ved en kombinasjon av overflatekryping og kapillærledning. Dersom materialene i konstruksjonen har en større sugekraft enn grunnen kan vann i væskefase suges kapillært fra grunnen og inn i bygningsdelen. Dette kan gjelde grunnmuren til et hus. En slik kapillær vandring kan føre til fuktige kjellere.

Den kapillære ledningsevnen til grunnen avhenger veldig av hvilken jordtype som er til stede. Grovkornet grunn som grus og grov sand, har en minimal kapillær sugehøyde, mens for mellomjordarter ligger sugehøyde i området 0,5-3 m. Finkornete jordarter som leire og silt, kan ha en sugehøyde på over 10 m (Geving & Thue, 2002). Figur 2-1 viser inndeling av forskjellige de jordtyper.

Byggfukt

Nystøpt betong har fritt vann og fuktmettet luft i alle porer og beskyttes mot skadelig uttørking ca. en uke etter støp gjennom ulike herdetiltak. Herdetiltakene skal forhindre den sterke uttørkingen av betongen rett etter støp, og dersom ikke betongen beskyttes mot uttørkingen vil det påvirke betongens levetidspotensial (SINTEF Byggforsk, 2006a). Etter at herdetiltakene er utført vil betongen ha 100 % RF i porelufta og det er behov for å tørke ut betydelige mengder byggfukt (SINTEF Byggforsk, 2021). For et kombinert isolasjons- og forskalingssystem kan betongfukten ha store konsekvenser for konstruksjonens fuktsikkerhet. Utfordringer med å benytte et slikt system er at betongen støpes direkte i isolasjonen og er nødt til å tørke ut gjennom isolasjonen, dette kan forsinke uttørkingshastigheten. Muligheten for uttørking av byggfukten vil avhenge av:

- Temperaturen på materialsjiktet med fuktoverskudd
- Damptettheten for de forskjellige sjiktene i konstruksjonen
- Damptrykket på utvendig og innvendig side.

Dersom materialsjiktet med fuktoverskudd har tilnærmet lik temperatur som grunnen utenfor, kan uttørkingen bare skje innover. Dersom materiale med byggfukt har høy temperatur og det er en dampåpen konstruksjon vil dette gi raskere uttørking. Byggfukt kan føre til flere praktiske problemer i konstruksjonen (Geving & Thue, 2002):

- Fukt som blir stengt inne i konstruksjonen kan gi skader og innemiljøproblemer
- Uttørking av byggfukt kan føre til høy RF i innelufta og oppfukting av tørre materialer

2.3 Oppbygning av yttervegger mot terreng

Fuktsikring av yttervegger mot terreng er en stor utfordring, ettersom drenerings/ luftings mulighetene under terrengoverflaten ikke er like gode som over. Temperatur- og fuktforholdene under terrengoverflaten vil variere over hele vegghøyden og veggen påkjennes utenfra av fukt i grunnen i både damp- og væskeform (Geving & Thue, 2002). TEK17 krever at bygningsdeler under terreng skal innføre nødvendige tiltak for å lede bort sigevann og hindre at fukt trenger inn i konstruksjon (TEK17, 2017a). Fuktsikring av yttervegger mot terreng er basert på følgende prinsipper (Edvardsen & Ramstad, 2017, s. 168):

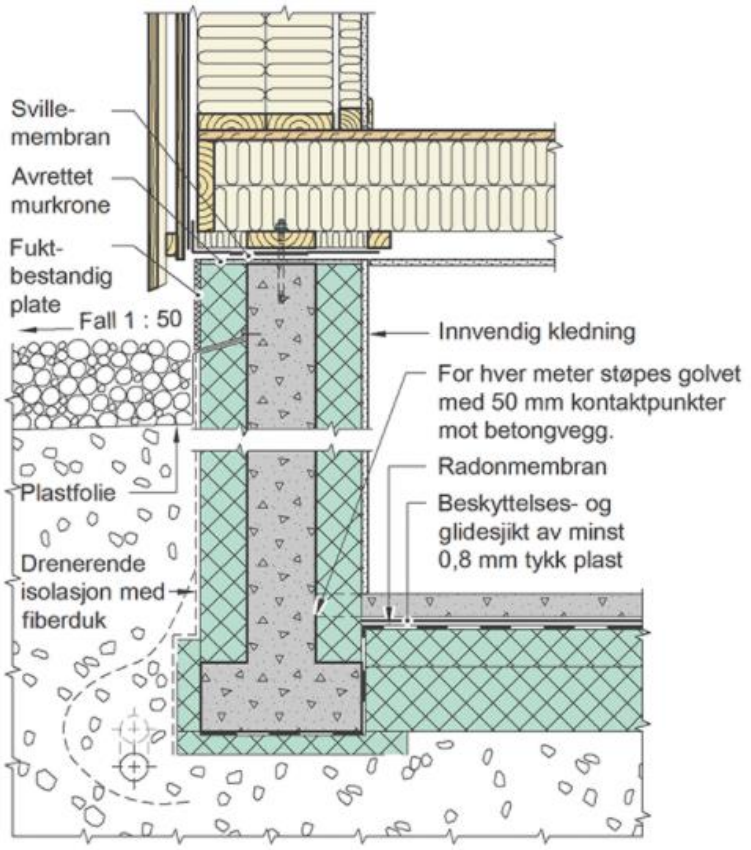
- Tilførselen av vann ovenfra må begrenses, og det vannet som kommer inn mot bygningen, må dreneres vekk
- Bygningsdelene må ha utvendige sperresjikt som sikrer at vann ikke suges inn i konstruksjonene fra fuktige masser
- Bygningsdelene må være lufttette, slik at fuktig luft ikke trekkes inn fra grunnen

Byggforsk anbefaler å plassere minst 50 % av den totale isolasjonen på utvendig side. En slik plassering gir en tørrere vegg og redusert risiko for fuktskader. Med dampåpen isolasjon montert direkte på utsiden av betongveggen vil man få en raskere uttørking og et lavere fuktinnhold. Ved å plassere isolasjonen direkte på betongen kan betongfukten tørke mot innvendig og utvendig side. Betongfukten som diffunderer mot utvendig side, går gjennom isolasjonen fra varm til kald side og kondenserer på den kalde siden av isolasjonen. Her ledes kondensen vekk av de drenerende massene. En utoverrettet uttørking forutsetter at det ikke er montert et damptett materiale mellom utvendig isolasjon og betongveggen. For best uttørking anbefales det å montere all isolasjonen på utvendig side (SINTEF Byggforsk, 2015). Se Figur 2-2 for oppbygningen til en yttervegg mot grunn, med minst 50 % av isolasjonen på utvendig side.

Det er viktig at kjellerveggen beskyttes med et kapillærbrytende- og vannavvisende sjikt for å hindre kapillærfuktvandring inn i veggen (SINTEF Byggforsk, 2020). I dag anbefales det av Byggforsk å plassere en grunnmursplate på utsiden av utvendig isolasjon for at betongveggen skal kunne tørke utover. En slik plassering av grunnmursplaten vil gi konstruksjonen enda høyere sikkerhet mot fuktskader ved å muliggjøre raskere uttørking av betongfukten og en tørrere kjellervegg. Grunnmursplaten vil og beskytte den utvendige isolasjon mot tilfyllingsmassene plassert på utvendig side (SINTEF Byggforsk, 2015).

På innvendig side av ytterveggen vil det være mulig å gjøre en del tilpasninger, basert på ønsket bruk av rommet. Dersom >50 % av isolasjonen er plassert på utvendig side, betongen er tilstrekkelig lufttett og det ikke er et høyt fukttilskudd på innvendig side vil

det ikke være nødvendig å montere en dampsperre på veggen. Grunnen til dette er at med >50 % av isolasjonen på utvendig side og en lufttett betong vil dette være fuktsikkert nok til at det erstatter dampsperren (SINTEF Byggforsk, 2015). Hvis man ønsker å montere en innvendig påføring slik at elektriske føringer kan skjules i veggen, kan dette gjøres direkte på betongoverflaten eller på innvendig EPS.



Figur 2-2: Betongvegg under terreng, 50 % av isolasjon på utvendig side (SINTEF Byggforsk, 2015)

2.4 Typiske fuktskader i materialer og kjellervegger

En vesentlig del av de bygningstekniske skadene og problemene som forekommer i norske bygninger, skyldes fukt i en eller annen form. Anslagsvis 60-80 % av skadene som opptrer skyldes fukt eller følgevirkninger av fukt (Thue, 2016). Problemene som kan oppstå i forbindelse med fukt i selve byggematerialene er mange (Edvardsen & Ramstad, 2017, s. 402):

- Mugg- og svertesopp på overflater
- Råte i trevirke
- Nedbrytning av lim
- Avgivelse av kjemiske stoffer
- Volumendringer (svinn og svelling) i materialer som kan føre til vridning, utbulinger og sprekkdannelser i konstruksjonen
- Endring i materialers fasthets- og elastisitetsegenskaper
- Frostsprengning

Svinn og svelling

Dersom det blir en endring av fuktinnholdet, vil de fleste porøse ikke-metalliske materialer endre volum. Når fuktinnholdet øker, vil volumet øke (svelling) og tilsvarende vil volumet minke når materialet tørker ut (svinn). Faren for dette er særlig stor for organiske materialer (Thue, 2016).

Råteskader

Så lenge trevirke er vannmettet vil ikke råtesopp angripe, det er først når fuktinnholdet blir lavere enn i ferskt virke at betingelsene blir gunstige for råtesoppen. Når fuktinnholdet synker lavere enn ca. 20-25 vektprosent stanser gjerne soppens videre utvikling. I dette kritiske fuktområdet er det ideell grobunn for soppsporene, og under slike forhold vil trevirke raskt råtne. Dette i kombinasjon med mangel på fri lufttilgang vil være en kritisk situasjon, og gjelder typisk for fuktig jord og dårlig ventilerte kjellere (Thue, 2016).

Kritisk fuktnivå er en grenseverdi for fuktnivå som bør overholdes for å unngå fuktskader og andre fuktrelaterte problemer. I byggeprosessen vil entreprenøren benytte kritisk fuktnivå som en indikator på når materialene er tørre nok slik at de kan brukes til å «lukke» bygget. Noen eksempler på kritisk fuktnivå til forskjellige materialer (SINTEF Byggforsk, 2018a):

- Ved RF over 80 % og temperatur over 0 °C over tid kan det oppstå vekst av mugg- og råtestopp
- Ved for høy RF vil betong fukte opp og skade fuktømfintlige materialer som er i kontakt med betongen. Lim under damptette gulvbelegg eller trekonstruksjoner som står i kontakt med betongen kan ta skade av høy RF i betongen.
- Store variasjoner i RF kan gi skadelige fuktbevegelser med problemer som oppsprekking, svelling og setninger
- Problemer kan i visse tilfeller også oppstå ved for lave fuktnivåer over tid, trebaserte materialer får krymping og sammentrekning som fører til oppsprekking og skader.

I Tabell 2-2 kan det kritiske RF nivået ved forskjellige temperaturer for trevirke sees (Martinsen, 2010)

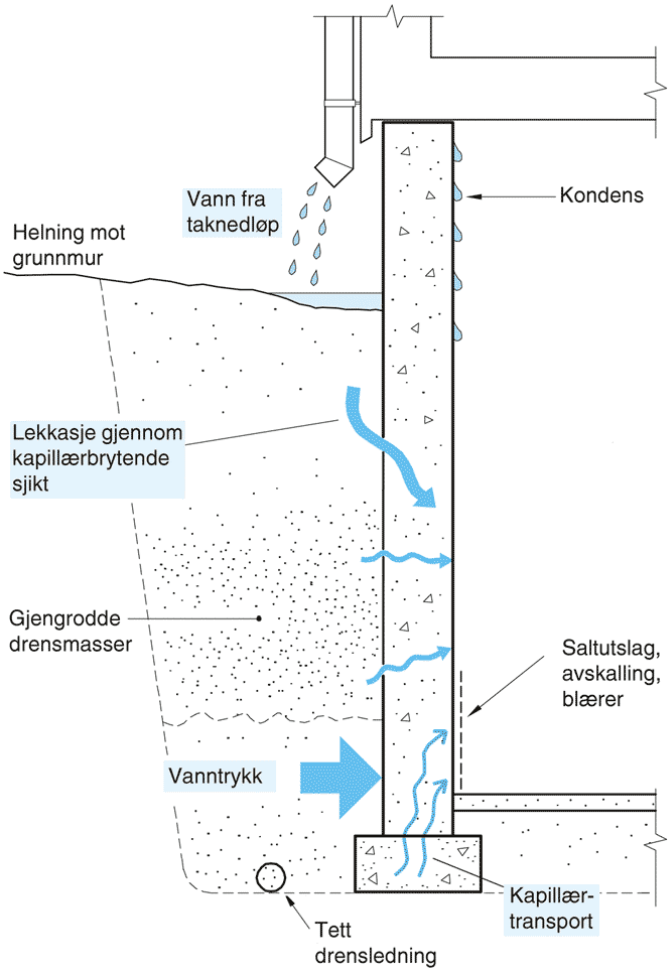
Tabell 2-2: Kritisk RF for trevirke

	< 0 °C	**0 – 5 °C**	**5 – 15 °C**	**15 – 50 °C**	**> 50 °C**
$RF_{kritisk}$	100 %	90 %	85 %	80 %	100 %

Yttervegger mot terreng er en spesielt utsatt konstruksjon for fuktskader, og stiller strenge krav til utførelse og dimensjonering av konstruksjonen. Figur 2-3 viser de typiske oppfuktingsmekanismene og hvilke skader de kan påføre en uisolert kjellervegg. I Tabell 2-3 er flere feil ved dimensjonering/utførelse og tilhørende fuktskader til en kjellervegg kommentert (Geving & Thue, 2002).

Tabell 2-3: Typiske feil under dimensjonering/utførelse og tilhørende fuktskader på kjellervegger

Feil under dimensjonering/ utførelse	**Skade**
Mangelfull utvendig drenering	Vann lekker inn i kjellerkonstruksjonen gjennom sprekker Fukt transporteres kapillært inn gjennom vegg eller opp via fundament
Bruk av innvendig dampsperre	Veggens uttørkingsevne blir minimal, og deler av veggen kan ha mulighet for muggvekst. Særlig uheldig for vegger med mye byggfukt (kombinert isolasjons- og forskalingssystem)
For mye innvendig isolasjon	Øker faren for skadelig kondens og muggvekst i konstruksjonen
Støpeskjøt mellom betonggulv og grunnmur er ikke tett	Muliggjør fukttransport ved konveksjon. Fuktig luft fra grunnen kan trekke opp i bindingsverket gjennom sprekker mellom grunnmur og fundament/dekke



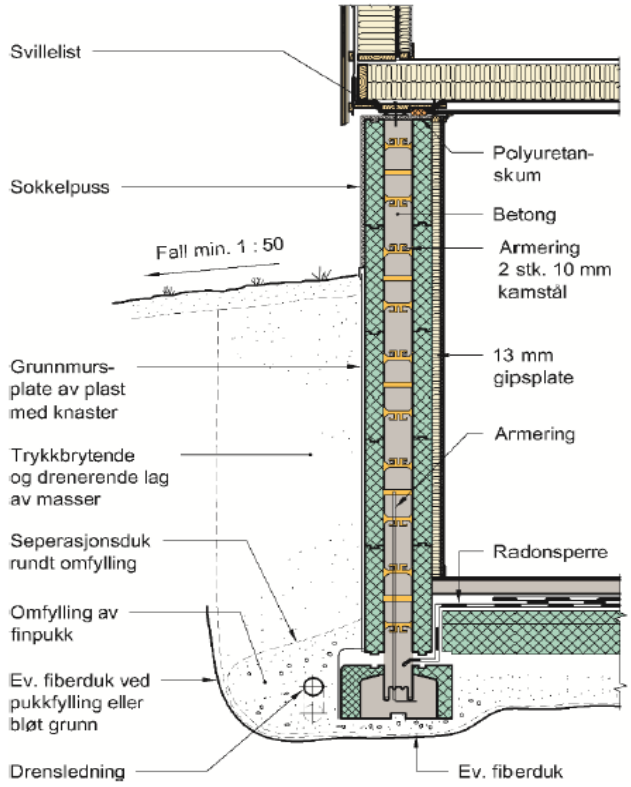
Figur 2-3: Oppfuktingsmekanismer og skadeårsaker for uisolerte kjellervegger (SINTEF Byggforsk, 2006)

2.5 Isolasjons- og forskalingssystemer for kjellervegger

En rask og effektiv måte å håndtere kompleksiteten rundt en kjellervegg, vil være å bygge opp kjellerveggen i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem. Et slikt system vil være veldig tidsbesparende ettersom selve forskalingen er isolasjonen til kjellerveggen og entreprenøren vil slippe å rive forskalingen etter støp. Systemet består typisk av to EPS-vanger bundet sammen med ulike typer bindere. EPS- vangene tørrstables i hel vegghøyde og støpes ut med betong etter at betongarmeringen først er plassert i blokkene (Edvardsen & Ramstad, 2017).

Hele systemet vil kunne monteres/heises på plass i en byggegrop og det eneste som trengs er å fylle hulrommet med betong. Systemet vil ha mange valgmuligheter rundt kjellerveggens oppbygning. Leverandører av slike forskalingssystemer tilbyr mange valgmuligheter på hvordan kjellerveggen kan bygges opp. På Tabell 2-4 kan de ulike kombinerte isolasjons- og forskalingssystemene som har fått Sintef Teknisk Godkjenning sees. Det finnes mange forskjellige kombinasjoner av tykkelsen på både utvendig vange, innvendig vange og betong. Varmekonduktiviteten til EPS- vangene varierer fra 0,031-0,035 W/mK avhengig av hvilken U- verdi som er ønskelig på kjellerveggen.

På Figur 2-4 kan man se oppbygningen av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem, hvor det er like mye EPS på innvendig og utvendig side. Ettersom det også er montert 50 mm mineralull med innvendig påføring av tre, anbefales det av leverandøren å montere en dampsperre mellom EPS og påføringen (SINTEF Certification, 2019a). EPS- materialet skal dekkes av minimum ett lag 13 mm gipsplater for å oppfylle kravet om brannsikkerhet i TEK17 (TEK17, 2017b). Eventuelt kan det monteres en innvendig påføring av 50 mm mineralull, som oppnår samme brannklassifisering som gipsplater.



Figur 2-4: Eksempel på oppbygning av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem (SINTEF Certification, 2019a)

Tabell 2-4: Dimensjoner og egenskaper til kombinerte isolasjons- og forskalingssystemer av EPS som har Teknisk Godkjenning fra Sintef

Forskalingssystem	Variant	Utvendig EPS [mm]	Innvendig EPS [mm]	Betongtykkelse [mm]	λ_d [W/mK]
KOMPAKTMUR TEK 17 (SINTEF Certification, 2018a)	-	100	80	100	0,035
		165			
		200			
Nordic Grunnmurssystem (SINTEF Certification, 2019b)	-	30-150	30-150	Utforing: 150x150	0,035
Vartdal Veggsystem (SINTEF Certification, 2018b)	-	95	95	160	0,031
Sundolitt Kub veggsystem (SINTEF Certification, 2019a)	U17	100	100	150	0,035
	U11	200			
Thermomur (SINTEF Certification, 2016)	200	50	50	100	0,035
	250			150	
	250X				
	350	100	100		
	350 Super				0,031
	450	200			0,035
BEWI Byggesystem (SINTEF Certification, 2018c)	-	80	80	140	0,031
		130	130	190	

2.6 Simuleringsverktøy

Simuleringsverktøyet som skal brukes for beregningene i oppgaven er WUFI2D. WUFI2D beregner parallell varme- og fukttransport i 2- dimensjonale bygningsdeler. Det fysikalske og numeriske grunnlaget for beregningene i WUFI er utviklet og diskutert i doktorgraden til Künzel (Künzel, 1995).

Avgrensningene i beregningene er styrt av hvilke former av varme- og fukttransport som er inkludert i WUFI2D. Tabell 2-5 oppsummerer hvilke transportmekanismer som er inkludert i WUFI og hvilke som ikke er inkludert.

Tabell 2-5: Transportmekanismer som er inkludert og ikke-inkludert i WUFI2D (WUFI2D, 2008)

Transportmekanisme	**Inkludert**	**Ikke- inkludert**
Varmetransport	Termisk varmeledningsevne	Konveksjon
	Entalpistrøm	
	Kort-bølget solstråling	
Fukttransport	Dampdiffusjon	Konveksjon av dampstrømmer
	Løsningsdiffusjon	
Væsketransport	Kapillær konduktivitet	Infiltrering av overflatevann
	Overflatekryping	Hydraulisk strømning over trykkforskjeller
		Elektrokinetisk og osmotisk effekt

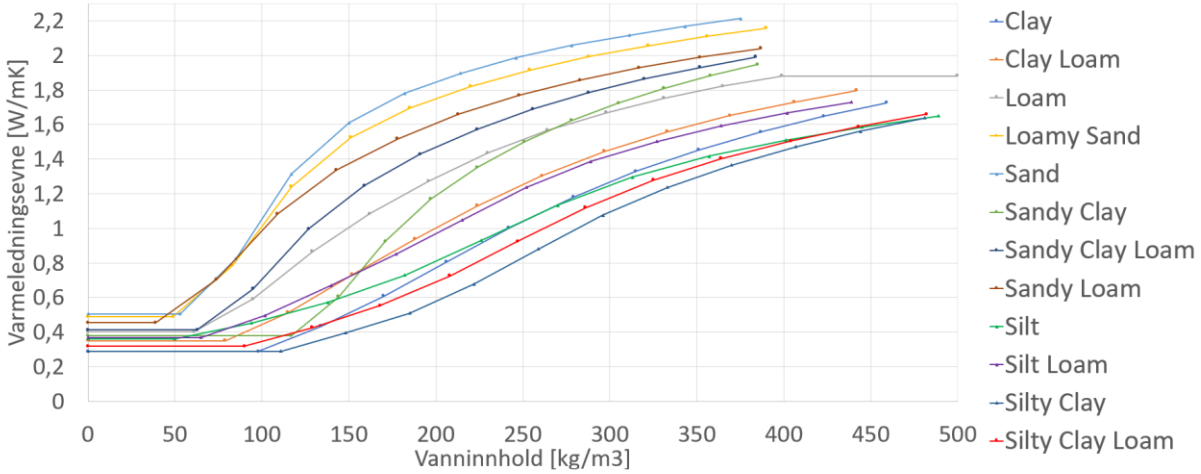
3 Metode

Metodekapittelet er tre- delt. Første del omhandler metoden for identifisering og utvikling av et beregningsoppsett som kan benyttes til beregninger av fuktforholdene til yttervegger mot terreng. Den andre delen beskriver metoden som er valgt for å kunne beregne uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Metoden som er valgt baserer seg på arbeidet som er blitt gjort i en tidligere studie (Martinsen, 2010). Til forskjell fra den tidligere studien hvor HEAT ble benyttet som varmestrøms beregningsprogram er det i denne masteroppgaven brukt WUFI2D. Den siste delen omhandler en parameterstudie som er valgt for å undersøke hvordan ulike utvendige klimaforhold kan påvirke risikoen for fuktskader i den innvendige delen av en kjellervegg.

3.1 Utviklingen av en metode for beregninger av fuktforholdene til yttervegger mot terreng

For å undersøke hvordan uttørkingsforløpet til yttervegger mot terreng kan beregnes ble først metodene brukt i to tidligere studier gjennomgått og evaluert (Martinsen, 2010; Lund, 2017). Ettersom fuktinnholdet i jorden er vist å ha stor påvirkning på varmetapet fra kjellere (Janssen, et al., 2004), var det ønskelig å inkludere fuktinnholdet i beregningene av det utvendige klimaet til kjelleren. Variasjonen i fuktinnholdet i jorden ble først forsøkt beregnet for en endimensjonal jordsøyle i både WUFI2D og WUFI Pro. WUFI egnet seg ikke til å simulere jord med et så høyt fuktinnhold som opptrer i grunnen utenfor en kjellervegg. I NS-EN ISO 15026:2007 er RF i grunnen anbefalt til 99 % (Standard Norge, 2007). WUFI inkluderer heller ikke absorpsjon av nedbør i terrengets overflate eller overflatevann som renner gjennom grunnen. Ettersom det å inkludere variasjoner i fuktforholdene for beregning av utvendig klima under terreng ble utfordrende uten et mer avansert simuleringsverktøy, ble det besluttet å endre fokus.

Siden variasjoner i jordens fuktinnhold påvirker jordens varmeledningsevne (Janssen, et al., 2004), ble det besluttet å i første omgang undersøke hvordan høy og lav varmeledningsevne i jorden vil påvirke fuktforholdene samt varmetapet i en isolert kjellervegg. Janssen, et al. (2004) beregnet hvordan fuktinnholdet i jorden på utsiden av en kjellervegg kan variere over året. Fra fuktinnholdet beregnet i denne studien ble det undersøkt hvordan varmeledningsevnen for ulike jordtyper varierte i henhold til materialdata i WUFI. Varmeledningsevnen til jordtypene som er definert i WUFI ble undersøkt og de kan sees i Figur 3-1.



Figur 3-1: Varmeledningsevne som funksjon av vanninnhold for 12 jordtyper definert i WUFI

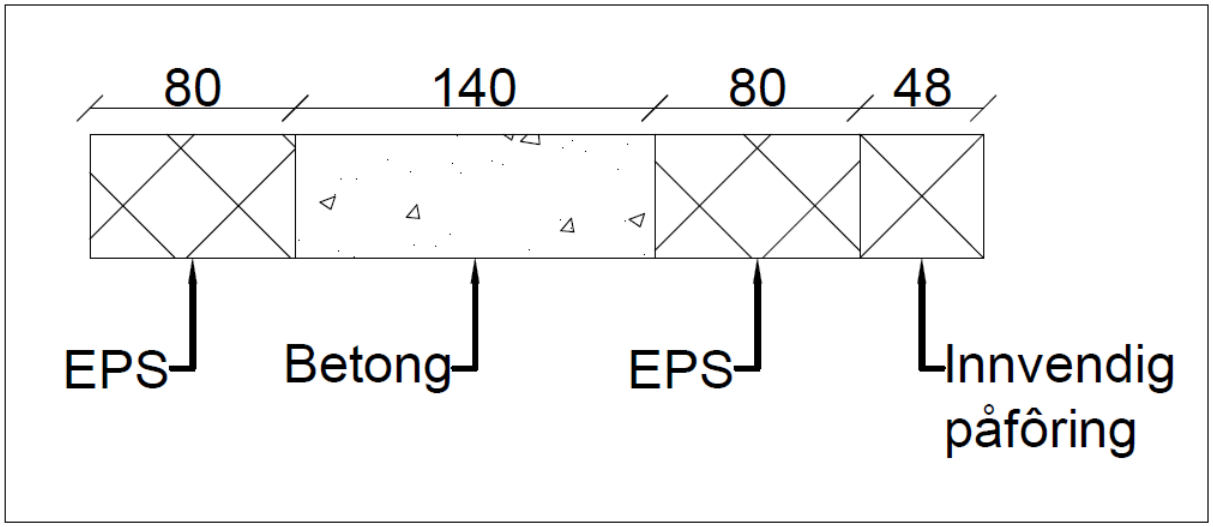
For å undersøke hvor stor påvirkning variasjon i varmekonduktiviteten potensielt kan ha på risikoen for skader i en isolert kjellervegg ble det valgt følgende varmeledningsevner i grunnen: Høy= 2,212 W/mK og Lav= 1,4533 W/mK. Verdiene tilsvarer tørr leire og fuktig sand i materialdatabasen til WUFI og representere to ulike fuktinnhold i grunnen. Det ble valgt å undersøke en kjeller som var bygget opp av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem, med like mye isolasjon på innvendig og utvendig side av betongen. Dette er et system som er mye brukt for kjellere ettersom man slipper å rive forskalingen når betongen er støpt. Fuktsimuleringene ble utført i WUFI2D ettersom programmet hadde en detaljert materialdatabase over ulike jordtyper og forfatteren var godt kjent med programmet. I simuleringene var Oslo, Bergen og Karasjok valgt som utvendig klima over terrenget. Resultatet på simuleringene ga ikke et tydelig svar om hvilke forhold i utvendige klima over terreng som påvirket uttørkingsforløpet til kjellerveggen i størst grad. Forskning som har blitt undersøkt hevder at nedbør, infiltrasjon av overvann og solstråling kan gi store utslag i varmetapet og uttørkingsforløpet til en kjellervegg (Janssen, et al., 2004).

Basert på gjennomgang av tidligere studier (Martinsen, 2010; Lund, 2017) ble det konkludert med at for å gjennomføre en fukttransportberegning med grunn på utvendig side av konstruksjonen er det hensiktsmessig å gjennomføre simuleringen i to steg. Først gjennomføres en varmestrømsberegning av konstruksjonen og grunnen, for å undersøke hvordan påkjenningene fra grunnen endres mot konstruksjonen. Varmestrømsberegningen gjøres fordi WUFI2D har problemer med å utføre en fuktsimulering av jord med et høyt fuktinnhold. Deretter gjennomføres en fuktsimulering av kun kjellerveggkonstruksjonen med de endrede utvendige påkjenningene fra varmestrømsberegningen. Basert på fuktsimuleringen kan veggens uttørkingsforløp undersøkes.

To simuleringer hvor fukttransportberegningen er to- delt ble gjennomført for en kjellervegg bygd opp av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem. Simuleringene ble gjennomført i WUFI2D. På innvendig side var det dimensjonert for et baderom, noe som stiller krav til økt fuktsikkerhet. Det ble derfor montert en våtromsplate med sd- verdi = 10 m (TEK17, 2017c) på innvendig side. Det utvendige klima var likt og bestemt til å være Oslo. Grunnen hadde høy eller lav varmeledningsevne fordelt på to varianter. Varmeledningsevnen var den samme som i tidligere simuleringer, basert på jordtypene tørr leire og våt sand. Resultatene viste at forskjellen i veggens uttørkingsforløp mellom de ulike varmeledningsevnene var minimal. Dette skyldtes at veggen var dimensjonert til

å være veldig fuktsikker. Det var ønskelig å finne en oppbygning som ga tydelige utslag mellom de ulike varmeledningsevnene og da vil en fuktsikker oppbygging av kjellerveggen ikke egne seg. Resultater fra de innledende beregningene er inkludert i Vedlegg A.

Konstruksjonen som er valgt som case i masteroppgaven er et forskalingssystem med like mye EPS på innvendig og utvendig side. På innvendig side er det i tillegg montert en innvendig påføring. Se Figur 3-2 for et tverrsnitt av konstruksjonen. Konstruksjonen vil avvike fra Byggforsk sin anbefaling om minst 50 % av isolasjonen på utvendig side, og det vil være interessant å se hvor skadelig en slik oppbygning er for konstruksjonens fuktsikkerhet.



Figur 3-2: Tverrsnitt av konstruksjonen som benyttes som case i masteroppgaven

Beregningsprogrammet som skal benyttes for beregningene i oppgaven er WUFI2D. Dette er et program som forfatteren er godt kjent med, som inkluderer tilstrekkelig med transportmekanismer i varmestrøms- og fukttransportberegningene og har en omfattende materialdatabase.

Beregningsvariantene er bestemt i samarbeid med veileder for å undersøke hvordan utvendige faktorer påvirker uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Forskjellen mellom høy og lav konduktivitet for jordtypene definert i WUFI og de konservative verdiene for høy og lav varmeledningsevne oppgitt i NS-EN ISO 13370:2017 ble sammenlignet. Forskjellene i verdi var små, og for videre simuleringer blir de konservative verdiene fra standarden brukt. Bahnfleths studier (1989, som sitert i Janssen, et al. 2004) har vist at dersom solstråling er inkludert i beregninger av varmetapet fra en kjellervegg mot grunnen vil varmetapet endres drastisk. Solstråling kan derfor og tenkes å gi store forskjeller i uttørkingsforløpet til kjellerveggen og oppgaven vil undersøke denne påvirkningen.

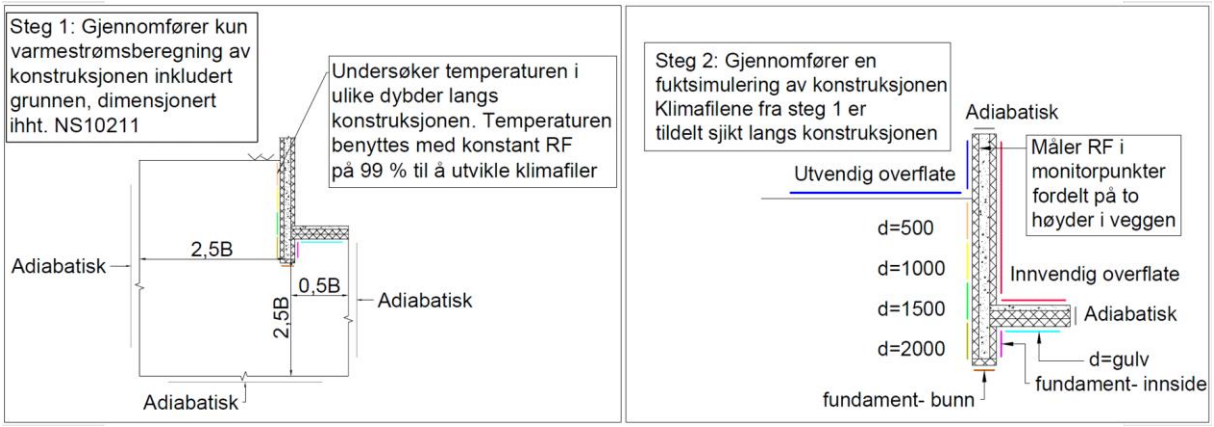
3.2 Beregning av fuktforhold i yttervegg mot terreng

3.2.1 Simuleringer i WUFI2D

Uttørkingsforløpet til en yttervegg mot terreng skal beregnes med en 2- stegs metode:

- Steg 1: Utvikle klimafiler ved å gjennomføre en varmestrømsberegning. Beregningsoppsettet inkluderer konstruksjon og grunn.
- Steg 2: Fuktsimulering av kun konstruksjonen. Konstruksjonen er tildelt klimafiler på utvendig side fra steg 1.

Forklaringen på 2- stegs metoden er vist på Figur 3-3.



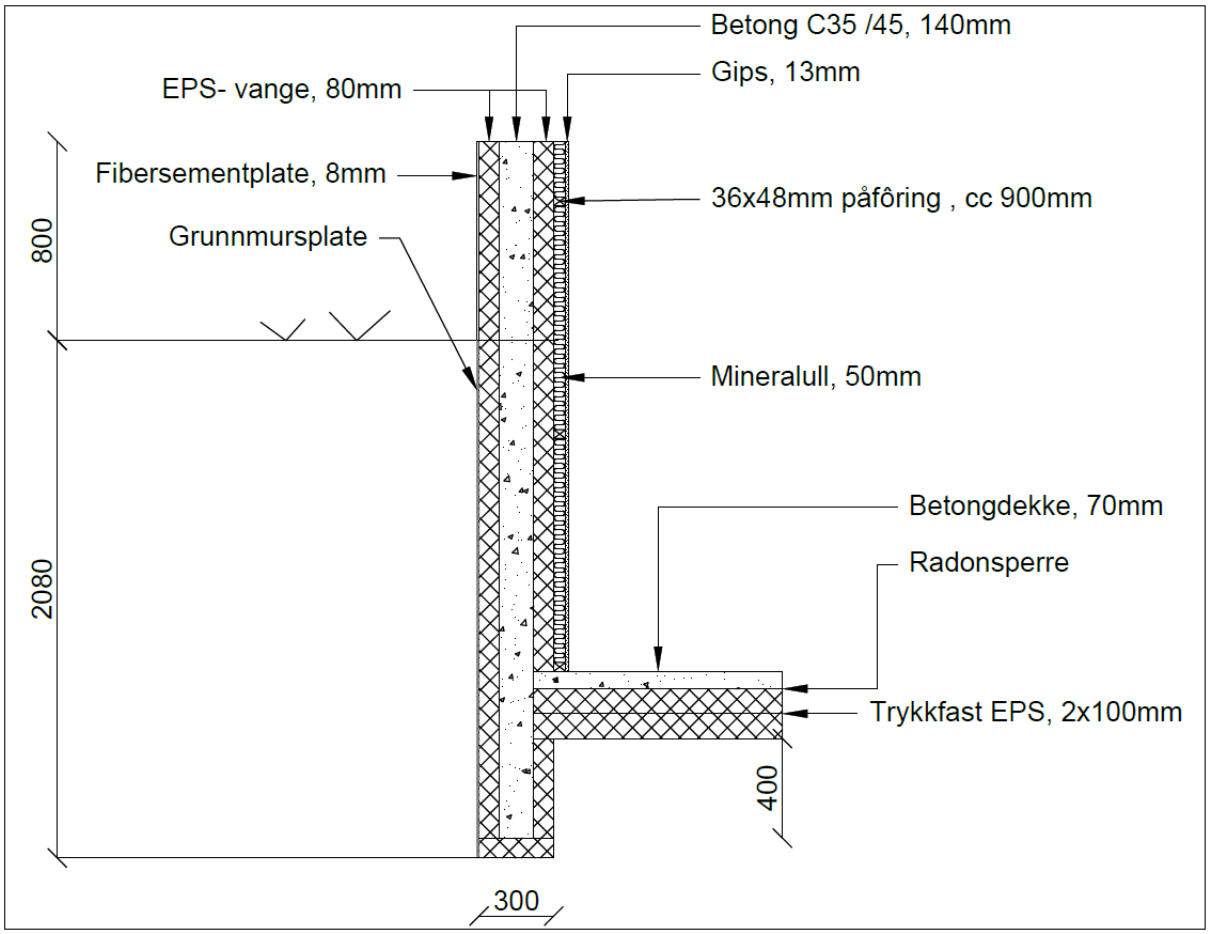
Figur 3-3: 2 stegs metode for simuleringene i WUFI2D. Steg 1: varmestrømsberegning, steg 2: fuktsimulering

Oppbygning av konstruksjonen

Oppbygningen av kjellerveggen som skal simuleres skal etterligne et kombinert isolasjons- og forskalingssystem. Oppbygningen er basert på de ulike systemene som har fått Sintef Teknisk Godkjenning, disse er vist i Tabell 2-4. Kjellerkonstruksjonens oppbygging kan sees i Figur 3-4.

Kjellerveggen er bygd opp av to EPS- vanger med tykkelse 80 mm på hver side av betongen. Tykkelsen på betongen er 140 mm (SINTEF Certification, 2018c) og er av kvalitet C35/45. Betongdekke er av samme betong som veggen. Under dekke er det plassert 2x100 mm EPS for å oppnå ønsket U- verdi. Radonsperren er plassert i bruksgruppe B under betongen, et beskyttelses- og glidesjikt er plassert over radonsperre mot betongen for å beskytte radonsperren (SINTEF Byggforsk, 2018b).

På innvendig side er det montert 48 mm påføring av tre med mineralull og innvendig kledning av 13 mm gips. Oppfyllingshøyden på de utvendige massene er 2,08 m. Over terreng skal utvendig isolasjon dekkes av en 8 mm fibersementplate (Jackon, 2018). Den utvendige isolasjonen er beskyttet av en grunnmursplate under terrenget.



Figur 3-4: Geometri og oppbygging av kjellerkonstruksjonen som det skal utføres en varmestrømsberegning og en fuktsimulering på i WUFI2D

Materialegenskaper

WUFI har et stort materialbibliotek som inneholder flere forskjellige materialer. Det er fortrinnsvis materialene i WUFI som er brukt i konstruksjonen. Der det er funnet egenskaper for materialer gjennom Sintef Teknisk Godkjenning er disse verdiene brukt da det er en mer presis verdi. Tabell 3-1 viser alle materialene som er brukt i konstruksjonen, og deres egenskaper i WUFI2D.

Tabell 3-1: Materialegenskaper i for materialene som er brukt i konstruksjonen. Egenskapene er hentet fra WUFIs materialdatabase

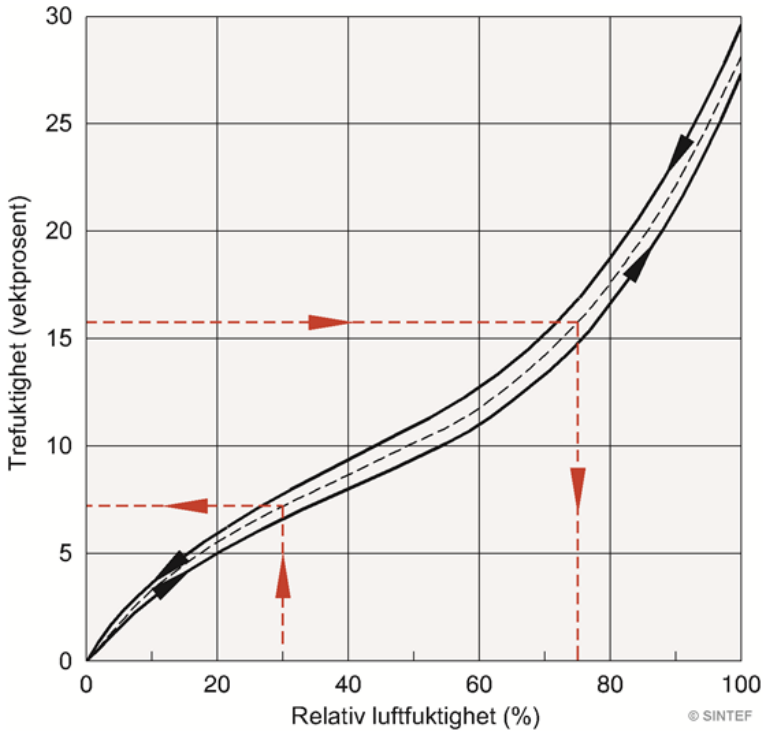
Materiale	Densitet [kg/m³]	Porøsitet [m³/m³]	Varme-kapasitet [J/kgK]	λ_d [W/mK]	μ [-]	Kilde	Materiale WUFI
Grunnmurs-plate	900	0,001	2300	2,3	280	(SINTEF Certification, 2018d)	
Mineralull	60	0,95	850	0,04	1,3	WUFI	Mineralwool
EPS-vanger	25	0,95	1500	0,035	50	(SINTEF Certification, 2018c)	EPS
Betong C35/45	2220	0,18	850	1,6	248	WUFI	Concrete C35/45
Trevirke	650	0,47	1400	0,13	200	WUFI	Hardwood
Radon-sperre	965	0,001	2300	2,3	184	(SINTEF Certification, 2018e)	
Gips	850	0,65	850	0,2	8,3	WUFI	Gypsum Board
Fiber-sement plate	1482	0,44	850	0,954	17	WUFI	Fiber Cement Sheathing Board

Initialtemperatur

Initialtemperatur i materialene er noe som vil innstille seg omgivelsene raskt i WUFI. Dette i kombinasjon med at fuktsimuleringene skal gjøres i 10 år, gjør at denne verdien ikke er utslagsgivende for resultatene. Det er bestemt at initialtemperaturen på hele konstruksjonen skal være 15 °C.

Initialfukt

TEK17 stiller krav om at produkter og materialer skal være så tørre ved innbygging eller forsegling at det ikke oppstår problemer med soppdannelser, nedbrytning av organisk materiale, eller økt avgassing. Som en preakseptert ytelse er kritisk fuktnivå for trevirke i konstruksjoner under grunnen 15 vektprosent (TEK17, 2017d). Figur 3-5 viser sorpsjonskurven til furu. Ut fra sorpsjonskurven tilsvarer en vektprosent på 15 % en RF på 75 %. Denne verdien benyttes i simuleringene. Simuleringene begynner rett etter at betongen er støpt i forskalingen og det antas det at initialfukten i betongen er 99 %. Betongdekke støpes tidligere enn betongveggen, og det antas at dekke har tørket ut til 90 % RF. For resten av materialene er det brukt en konservativ verdi på 80 % RF. Se Tabell 3-2 for initialfukten til materialene i konstruksjonen som ikke har en konservativ RF på 80 %.



Figur 3-5: Sorpsjonskurve for furu, trefuktighet (vektprosent) som funksjon av relativ fuktighet (SINTEF Byggforsk, 2018a)

Tabell 3-2: Initialfukt i materialer som ikke har konservativ RF på 80%

Materiale	**RF [%]**	**Kommentar/Kilde**
Grunnen	99	NS 15026 (Standard Norge, 2007)
Betongvegg	99	Simuleringene begynner rett etter at betong er støpt
Betongdekke	90	Dekke er støpt på et tidligere tidspunkt og fått tørke ut
Påføring av tre	75	Konstruksjonsvirke under grunnen skal ikke ha vektprosent > 15 ettersom det er dårligere uttørkingsmuligheter under terreng (SINTEF Byggforsk, 2021).

Grensebetingelser

For å gjennomføre beregningene i WUFI er innvendige, utvendige og adiabatiske overflater nødt til å defineres. Tabell 3-3 viser verdien til de ulike grensene som inkluderes i beregningen. Figur 3-7 viser plasseringen av grensene i kjellerveggen

Tabell 3-3: Grensebetingelser for simuleringer i WUFI2D

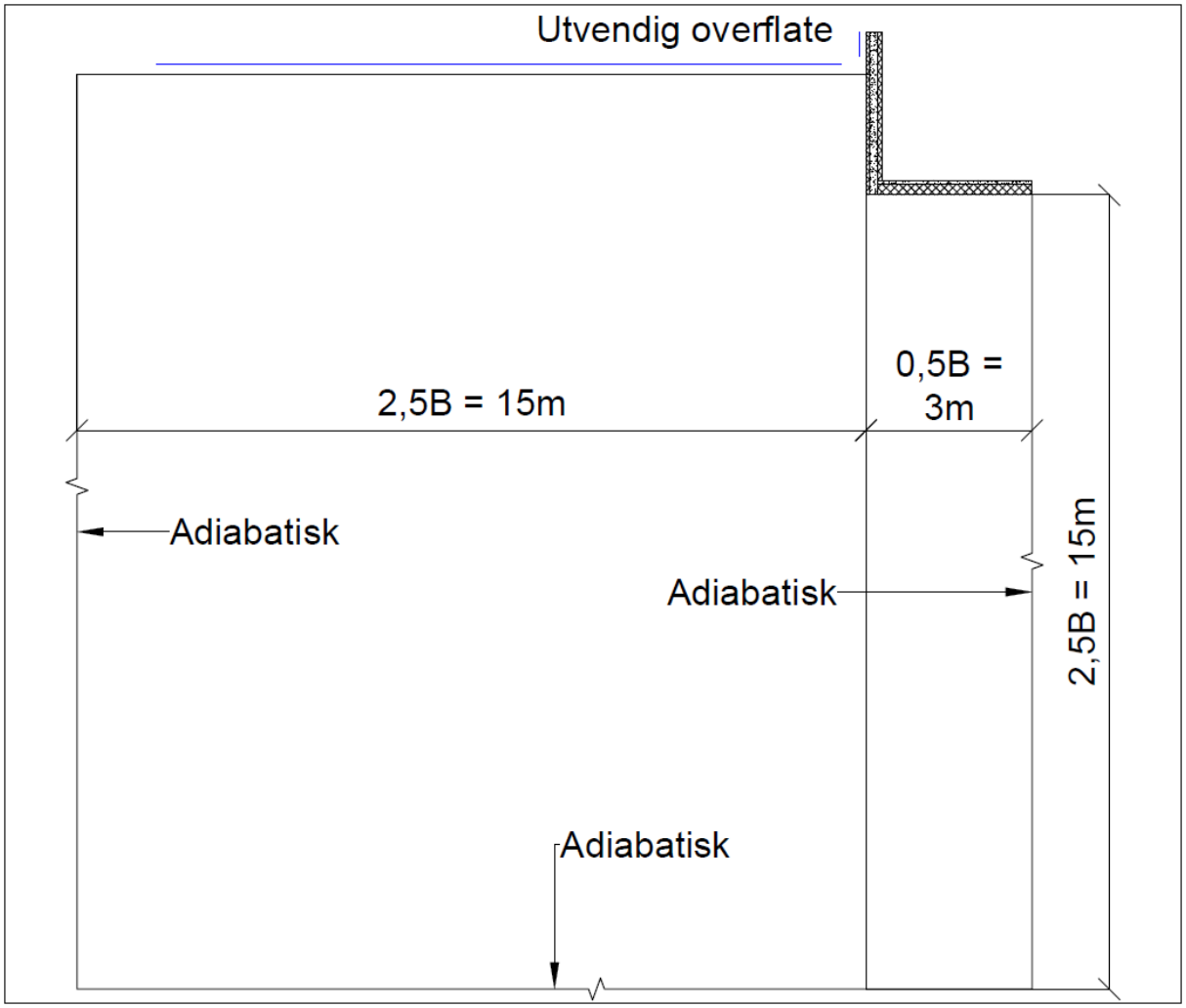
Grensebetingelse	**Verdi**	**Kommentar/Kilde**
Sol orientering	Sørvendt- asimut 0°	Huset er vendt mot sør for mest solpåvirkning
Utvendig overflate	Trondheim	Fil hentet fra WUFI sin database. Øverste 800 mm av konstruksjonen er over terreng
Innvendig overflate	Fuktklasse 3 21 ^{o}C	Beregnet etter ISO13788 (Standard Norge, 2012)
Adiabatisk overflate	Q = 0	Varmefluksen gjennom flaten er lik null, konstruksjonens systemgrense (Thue, 2016)

3.2.2 Beregning av utvendige grensebetingelser under terreng

Det første steget i 2- stegs metoden er å lage korrekte klimafiler for kjellerkonstruksjonen. Klimafilene erstatter grunnen i en fuktsimulering. Generering av klimafiler gjøres ved en varmestrømsberegning i WUFI2D. Beregningsoppsettet inkluderer både grunnen og kjellerkonstruksjonen. Oppbygningen av konstruksjonen er vist i Figur 3-4. Dimensjonene til grunnen som skal inkluderes er beskrevet i NS-EN ISO 10211:2017 (Standard Norge, 2017b). For to-dimensjonale beregninger er det bare den ene halvdelen av bygget som blir modellert. Et av avgrensningsplanene er plassert i midten av bygget. Bredden til huset er bestemt å være 6 meter og dimensjonene til grunnen som skal inkluderes i beregningen er:

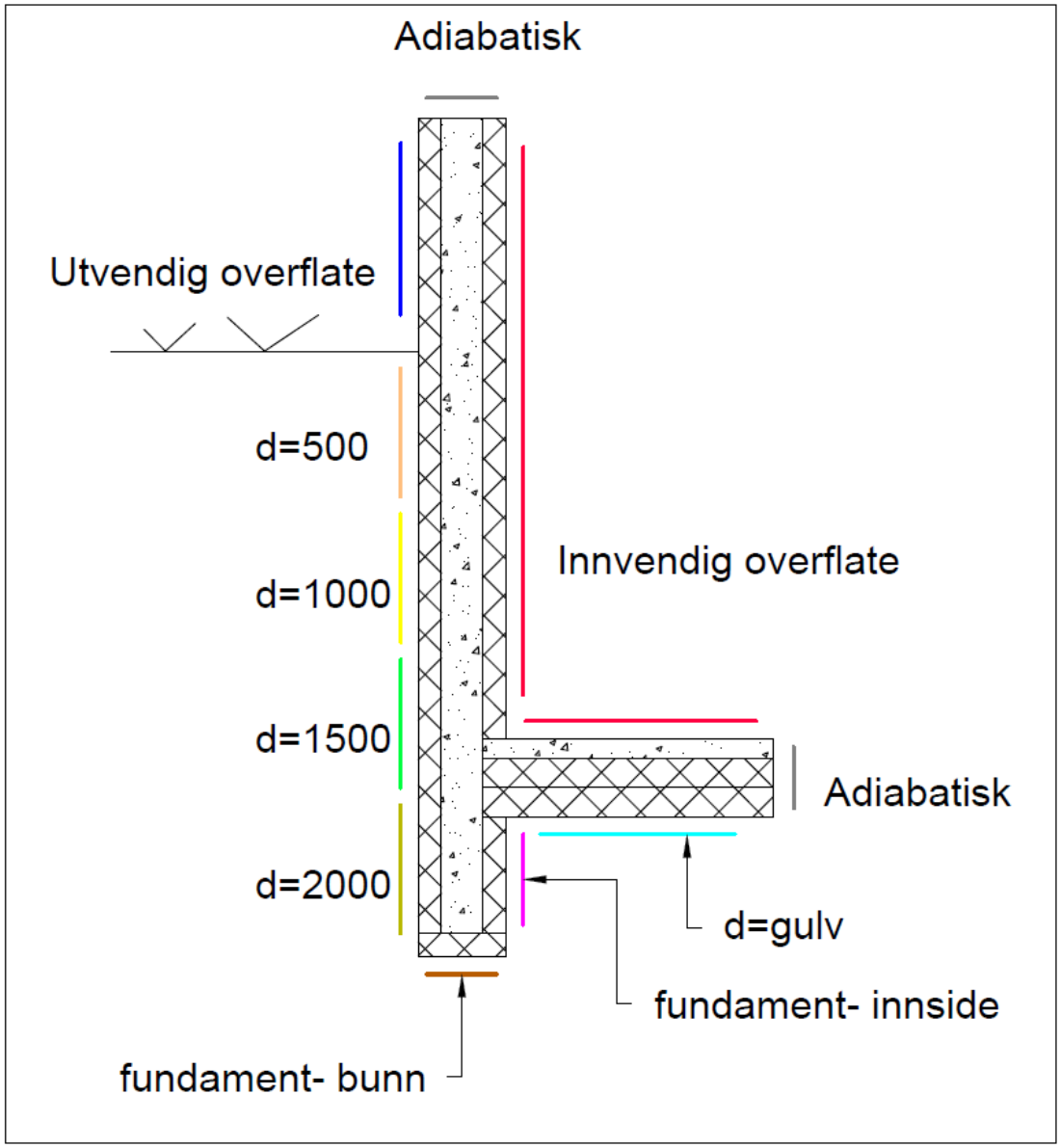
- Horisontal retning mot innsiden av bygget: 0,5 x B = 0,5 x 6m = 3m
- Horisontal retning mot utsiden: 2,5 x B = 2,5 x 6m = 15m
- Vertikal retning under bygget: 2,5 x B = 2,5 x 6m = 15m

Figur 3-6 viser dimensjonene til grunnen basert på bredden av huset. Områdene som begrenser beregningsområdet, er adiabatiske grenser.



Figur 3-6: Dimensjonene til grunnen som må inkluderes i varmestrømsberegningen av konstruksjonen. Avgrensningene er adiabatiske grenser. Konstruksjonen er i topp av høyre hjørnet.

I klimafilberegningen gjøres det kun en varmestrømsberegning. Simuleringen brukes for å se hvordan temperaturen varierer i forskjellige sjikt der kjellerkonstruksjonen er i kontakt med grunnen. Sjiktene er plassert langs veggen med dybde 500 mm nedover fra terrengoverflaten, samt på fundamentet og under dekke. Dette gjør at man får en jevn endring i temperatur i ulike dybder nedover kjellerkonstruksjonen. De ulike sjiktene er vist i Figur 3-7.



Figur 3-7: Sjikt hvor det leses av temperaturer langs kjellerkonstruksjonen. Brukes for utvikling av klimafiler.

Varmestrømsberegningen kjøres i tre år, men det er temperaturen fra det siste året som brukes i klimafilene. Formålet med de to første årene vil være å sikre at det har innstilt seg en korrekt temperatur i konstruksjonen. Dette gjør at temperaturen i sjiktene fra det siste året som brukes til utvikling av klimafiler er korrekt. Temperaturen hentes fra de ulike sjiktene i WUFI som .txt- filer og konverteres til Excel hvor de behandles.

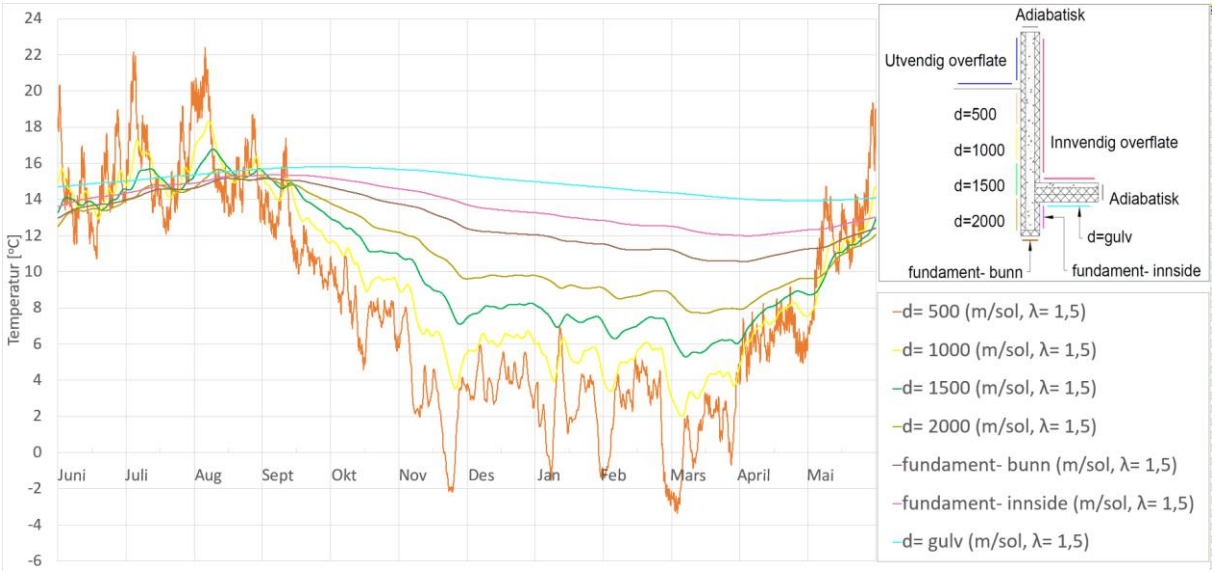
I WUFI er klimafiler betegnet som .wac- filer. Klimafiler kan lages gjennom et Excel- ark som leveres av WUFI. Excel- arket fungerer som en .wac- konverter og endrer filer i Excel

til en .wac- fil. Klimafilene består av temperatur og RF. RF i grunnen har en konstant verdi på 99 % og vil gjelde for alle sjiktene gjennom året (Standard Norge, 2007). Klimafilene i WUFI benytter et tidssteg på 1 time, så det er viktig at varmestrømsberegningen har samme tidssteg. Tabell 3-4 viser de beregningsmessige parameterne for klimafil simuleringen. Legg merke til at simuleringen begynner i juni.

Tabell 3-4: Beregningsmessige parametere for varmestrømsberegning og utvikling av klimafiler

Tidssteg [s]	3600
Antall tidssteg [-]	17520 (3 år)
Maks iterasjoner [-]	2000
Konvergeringskriteriet [-]	5e-4
Radial diameter [m]	-1
Steg	3
Max stages	5
Simuleringsstart	01.06.2018

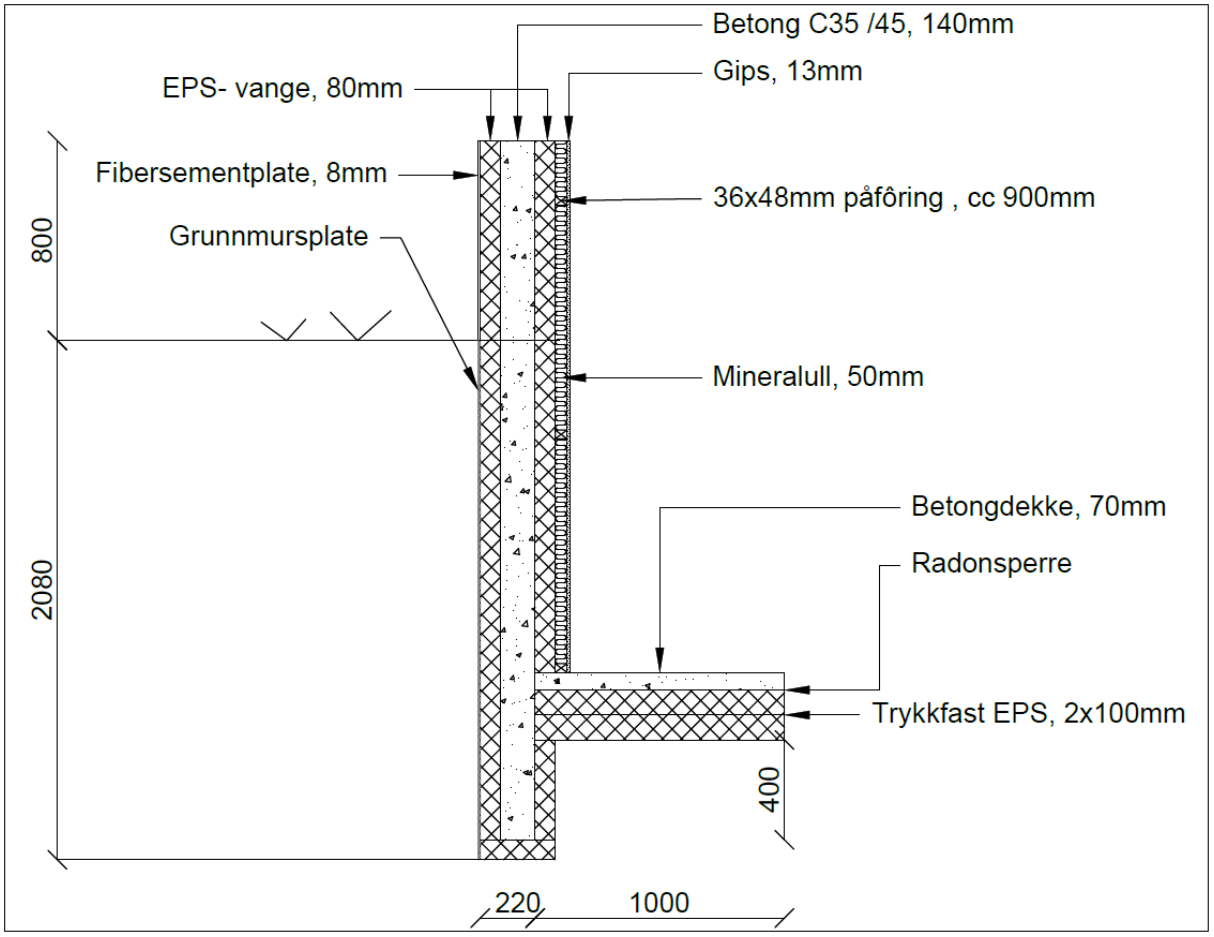
Temperaturen i sjiktene vil variere med høy og lav varmeledningsevne i grunnen og om solstråling er inkludert eller ikke. Klimafilberegningen gjøres for alle beregningsvariantene. Temperaturprofilen for en av beregningsvariantene er vist i Figur 3-8. Temperaturfordelingen for alle variantene kan sees i vedlegg B.



Figur 3-8: Temperaturvariasjon i ulike dybder langs kjellerkonstruksjonen, for varianten m/sol og λ=1,5 W/mK

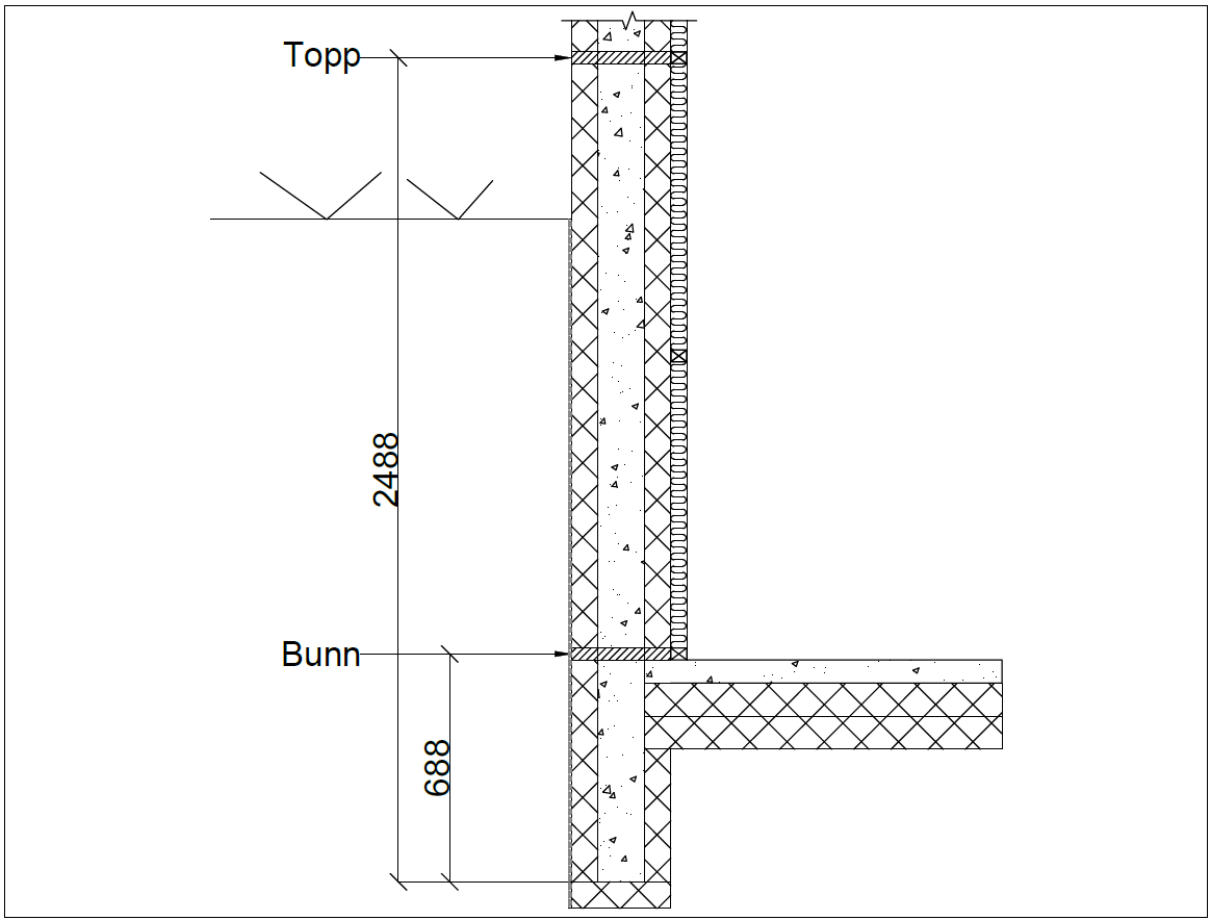
3.2.3 Fuktsimuleringer av kjellerkonstruksjonen

Steg 2 i 2- stegs metoden er fuktsimulering av konstruksjonen. Oppbygningen av konstruksjonen er vist i Figur 3-9. Dekke er ikke lenger dimensjonert til å være 0,5 B slik som i varmestrømsberegningen, men forkortet til 1 m. Dette gjøres fordi det kun er interessant å se på uttørkingsforløpet til veggen og beregningstiden blir redusert dersom konstruksjonen reduseres i størrelse. Klimafilene fra varmestrømsberegningen tildeles hvert sitt sjikt nedover konstruksjonen, som vist i Figur 3-7.



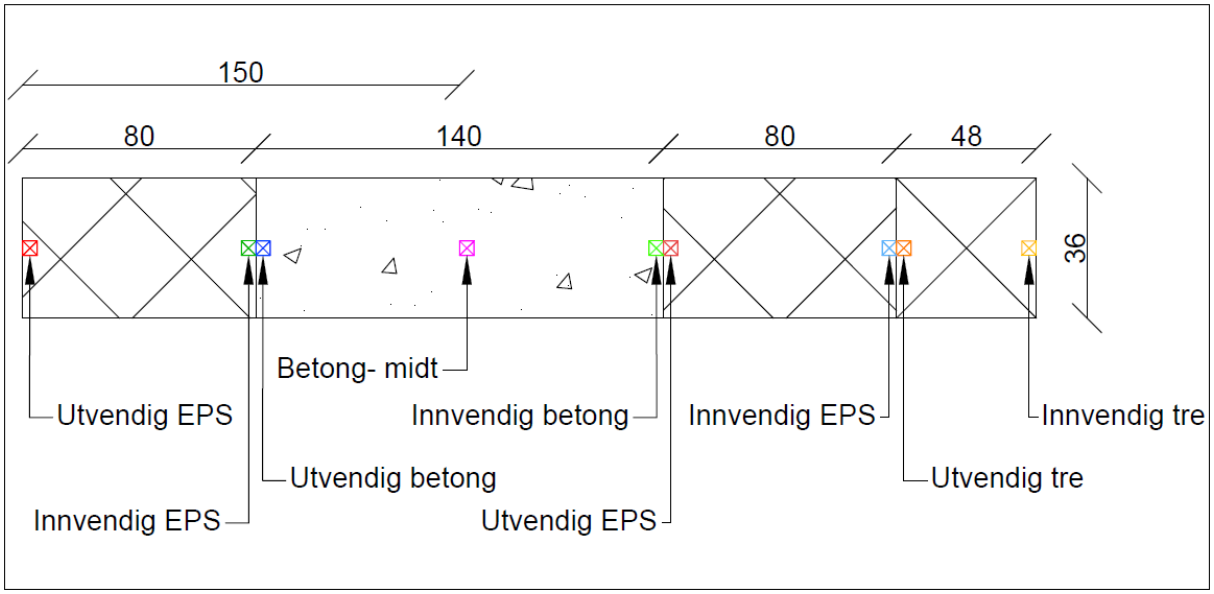
Figur 3-9: Kjellerkonstruksjonen som det gjøres en fuktsimulering på i WUFI2D

Monitorpunktene i kjellerveggen er basert på avsnitt 2.4 vedrørende skadelige fuktsituasjoner for yttervegg mot terreng. Trevirke er materialet i konstruksjonen som kan ta størst skade av en fuktpåkjenning over tid ettersom det er et organisk materiale. Høydene til målepunktene er basert på hvor bindingsverket til den innvendige påføringen er plassert og kan sees i Figur 3-10. De to høydene er plassert over og under terrenget. Ved å ha monitorpunktene over og under terrenget vil påvirkningen solstråling og ulik varmeledningsevne har på kjellerveggens uttørkingsforløp observeres tydeligere.



Figur 3-10: Høydene til monitorpunktene i konstruksjonen. Tverrsnittet som monitorpunktene er plassert i er skravert og markert topp og bunn

For å vise hvordan uttørkingsforløpet er i konstruksjonen skal RF måles i ulike avstander fra utvendig side. Det er bestemt å se på innsiden og utsiden av de forskjellige materialene i veggen. RF skal også måles i midten av betongen. Figur 3-11 viser plasseringen av monitorpunktene i veggen.



Figur 3-11: Plassering av monitorpunkter i veggen med avstander fra utvendig side og bredde til hvert av materialene i konstruksjonen

Som utgangspunkt er det bestemt at hvert monitorpunkt skal ha en tykkelse på ca. 5 mm. Totalt vil det være 9 monitorpunkter i veggen, i to ulike høyder. Dette gir totalt 18 monitorpunkter. I Tabell 3-5 kan koordinatene til de 9 forskjellige målingene som gjøres fra utsiden mot innsiden i veggen sees.

Tabell 3-5: Monitorpunkter for fuktsimuleringen i WUFI2D, gjøres fra utsiden av veggen og innover. Inkluderer bredde og x- koordinat i WUFI- gridet

Utvendig EPS		
Utvendig/innvendig	**Bredde**	**x- koordinat**
Utvendig (d=0)	5,17	8,04
Innvendig (d=80)	4,94	85,53
Betongvegg		
Utvending (d=80)	4,94	90,47
Midt (d=150)	13,85	164,93
Innvendig (d=220)	4,94	225,53
Innvendig EPS		
Utvendig (d=220)	4,94	230,47
Innvendig (d=300)	3,53	306,24
Trevirke		
Utvendig (d=300)	3,53	309,76
Innvendig (d=348)	5,61	353,27

I Tabell 3-6 er de beregningsmessige parameterne for fuktsimuleringen beskrevet. Fuktsimuleringen vil også begynne i juni, ettersom varmestrømsberegningen også begynte denne måneden.

Tabell 3-6: Beregningsmessige parametere, fuktsimulering

Tidssteg [s]	3600
Antall tidssteg [-]	87600 (10 år)
Maks iterasjoner [-]	2000
Konvergeringskriteriet [-]	5e-4
Radial diameter [m]	-1
Steg	3
Max stages	5
Simuleringsstart	01.06.2018

3.3 Undersøkelser av hvilke utvendige forhold som påvirker fuktforholdene i kjellervegger

En parameterstudie er blitt gjennomført for å undersøke hvilke utvendige faktorer som kan påvirke uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Det er interessant å se hvilke utvendig forhold som har mest å si for uttørkingsforløpet og om det er store variasjoner mellom de ulike parameterne. Parameterne som er valgt er sol og varmeledningsevnen til jord.

Sol

Bahnfleths studier (1989, som sitert i Janssen, et al. 2004) viser at sol vil påvirke varmetapet fra en yttervegg drastisk. For beregningene i masteroppgaven vil sol være inkludert eller ikke- inkludert i beregningene. Hvordan sol inkluderes eller ikke i WUFI kan sees i Tabell 3-7.

Tabell 3-7: Varmeovergangskoeffisient og absorpsjonsfaktorer for overflater, for beregningsvarianter med og uten sol

Overflate	**Parameter**	**Verdi [m/sol]**	**Verdi [u/sol]**
Bakke	Varmeovergangskoeffisient	17 W/m^{2}K	17 W/m^{2}K
	Kortbølget absorpsjon	0,3	-
	Langbølget emissivitet	0,0	-
	Eksplisitt strålingsbalanse	Benyttes ikke i denne simuleringen	
Vegg	Varmeovergangskoeffisient	17 W/m^{2}K	17 W/m^{2}K
	Kortbølget absorpsjon	0,4	-
	Langbølget emissivitet	0,9	-
	Eksplisitt strålingsbalanse	Benyttes ikke i denne simuleringen	

Varmeledningsevne til grunnen

Det er ønskelig å vurdere hvilken effekt forskjellige varmeledningsevner i grunnen har på fuktforholdene i en kjellervegg. Faroukis studier (1982, som sitert i Janssen, et al. 2004) har vist at varmeledningsevnen til jorda blir påvirket av fuktinnholdet i grunnen. Som parametervariasjon er det vurdert en høy og lav varmeledningsevne, basert på konservative verdier i NS-EN ISO 13370:2017. Jordtypen i WUFI er valgt å være sand og egenskapene er hentet fra WUFI sitt materialbibliotek. Tabell 3-8 viser egenskapene til jordtypen med høy og lav varmeledningsevne. Legg merke til at konduktivitet er konstant og ikke endres basert på vanninnhold i grunnen.

Tabell 3-8: Egenskaper for jordtypen benyttet i simuleringene. Varmeledningsevnen er konstant og basert på NS-EN ISO 13370:2017.

	Densitet [kg/m³]	**Porøsitet [m³/m³]**	**Varmeledningsevne, konstant [W/mK]**	**Spesifikk varmekap. [J/KgK]**	**Vanndamp-diffusjons faktor [-]**
Lav	1267	0,517	1,5	850	50
Høy	1267	0,517	2,0	850	50

Som case er det valgt at kjellerveggen skal være bygd opp av et kombinert isolasjons- og forskalingssystem av EPS. For å se hvor skadelig det er med <50 % av isolasjonen på utvendig side er det montert 48mm påfôring med 50 mm mineralull på innvendig side. På Figur 3-4 vises oppbygningen av kjellerveggen.

De ulike beregningsvariantene med parametere er vist i Tabell 3-9. For hver beregningsvariant er man nødt til å gjennomføre en 2- stegs metode, som er forklart i avsnitt 3.2.

Tabell 3-9: Parametervariasjonstabell

Parameter		**Varianter**			
		Uten sol λ_{jord}=2,0	Uten sol λ_{jord}= 1,5	Med sol λ_{jord}= 1,5	Med sol λ_{jord}= 2,0
Sol	Uten	x	x		
	Med			x	x
Varmekonduktivitet	Høy (2,0 W/mK)	x			x
	Lav (1,5 W/mK)		x	x	

3.4 Styrker og svakheter ved simuleringer i WUFI2D

Uttørkingsforløpet til kjellerveggen er blitt undersøkt i WUFI2D, et to- dimensjonalt beregningsverktøy for varmestrøms- og fukttransport beregninger. Beregningsoppsettet deler varmestrøms- og fukttransportsimuleringene i to, ettersom WUFI hadde problemer med å utføre en fuktsimulering av jord med høy RF. Varmestrømsberegningen vil gi informasjon om hvordan temperaturen endres langs dybden av kjellerkonstruksjonen for ulike utvendige forhold. Temperaturen langs konstruksjonen brukes med en konstant RF på 99 % for å utvikle klimafiler. Klimafilene skal simulere påkjenningen utvendig side har på kjellerkonstruksjonen og vil erstatte grunnen når det skal gjennomføres en fuktsimulering. Etter fuktsimuleringen vil RF måles i monitorpunkter i veggen, og man kan undersøke veggens uttørkingsforløp.

Styrker

For å benytte seg av WUFI2D behøves ingen tidligere kunnskaper om programmet eller lignende program som finnes på markedet. Brukergrensesnittet er forståelig og alle parametere og grensebetingelser som må defineres for å gjennomføre en beregning er nøye forklart. Det er også en omfattende material- og klimadatabase som er inkludert i WUFI2D. Dette gjør at man slipper å vurdere alle ulike egenskaper for materialene som benyttes, samt egenskaper ved det utvendige klima. 2- stegs metoden muliggjør en fuktsimulering av en yttervegg mot terreng i et relativt enkelt beregningsprogram, og dermed vil det være mulig for mange å gjennomføre en slik beregning.

Svakheter

WUFI2D sliter med å gjennomføre fuktsimuleringer av jord som har et høyt fuktinnhold, og dermed må det gjøres en tilnærming av hvordan påkjenningene endres med dybden langs kjellerkonstruksjonen. Dette gjør at når grunn skal simuleres er det ikke mulig å variere med fuktinnhold i grunnen og en konstant RF i grunnen er bestemt. Det er heller ikke mulig å variere grunnens egenskaper med varierende fuktinnhold. For å få en tilnærming til faktiske forhold burde dette implementeres i beregningene. Hvordan regn og overflatevann absorberes av jorden er heller ikke implementert i beregningene. For å kunne simulere en konstruksjon mot terrenget som inkluderer alle de forskjellige egenskapene som endres i grunnen, vil man måtte ta i bruk et mye mer avansert simuleringsverktøy.

4 Resultater

4.1 Simulering av uttørkingsforløpet til kjellervegger

Fremgangsmåten som ble valgt for å undersøke uttørkingsforløpet til en kjellervegg er en 2- stegs metode. Her deles varmestrøm- og fukttransportberegningen opp slik at de endrede utvendige påkjenningene langs en kjellerkonstruksjon som skyldes grunnen kan inkluderes i en fuktsimulering på WUFI2D. Detaljer rundt metoden er nærmere beskrevet i avsnitt 3.2.

4.2 Påvirkningen solstråling og jordens varmeledningsevne har på uttørkingsforløpet til en kjellervegg

I beregningene vurderes de forskjellige variantene som er valgt på bakgrunn av en parameterstudie, variantene er vist i Tabell 3-9. Konstruksjonen som undersøkes er en kjellervegg bygd opp i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem. Oppbygningen av konstruksjonen er vist på Figur 3-4. Det er forskjeller i uttørkingsforløpet til kjellerveggen basert på ulike utvendige forhold som skal undersøkes. Undersøkelser av uttørkingsforløpet vil basere seg på hvor lav RF i veggen blir i løpet av simuleringen, hvordan RF varierer i løpet av et år i veggen og forskjell i uttørkingshastighet for de ulike variantene. Uttørkingsforløpet vil si noe om hvilke utvendige forhold som gir lavest RF i veggen og hvilke utvendig forhold som gir høyest RF. Tabell 4-1 og Tabell 4-2 viser en oppsummering av RF- verdien til de ulike variantene. Verdien er den siste RF- verdien som er målt i hvert monitorpunkt etter at det har blitt simulert i 10 år. Punktene som er i kontakt med betongen opplever en voldsom oppfukting de første ukene av simuleringen, og derfor skjer det en uttørking av betongfukt i disse monitorpunktene.

For monitorpunktene; d=300 og d=348 er verdien i Tabell 4-1 og Tabell 4-2 lik verdien til det siste toppunktet etter at det er simulert 10 år. Grunnen til at RF- verdien i disse sjiktet er målt i det siste toppunktet som oppstår er fordi sjiktene ikke har en markant uttørking, men RF varierer i større grad med det innvendige klimaet. Forskjell mellom høyeste og laveste RF målt i hvert punkt er også vist.

Tabell 4-1: RF- verdi målt etter 10 år, øvre del av vegg, med og uten sol, ulik lambda. Høyeste målt RF er markert rødt, lavest målt RF er markert grønn

	Uten sol, λ_{jord}=2,0	**Uten sol, λ_{jord}=1,5**	**Med sol, λ_{jord}=1,5**	**Med sol, λ_{jord}=2,0**	**Forskjell**
Utvendig side av utvendig EPS	-	-	-	-	-
Innvendig side av utvendig EPS	**93,0 %**	92,7 %	**90,0 %**	90,3 %	3, 0 %
Utvendig betong	**93,0 %**	92,5 %	**89,5 %**	90,0 %	3,5 %
Midt av betong	**93,4 %**	93,0 %	**90,2 %**	90,5 %	3,2 %
Innvendig betong	**93,4 %**	93,1 %	**90,2 %**	90,5 %	3,2 %
Utvendig side av innvendig EPS	**93,4 %**	93,1 %	**90,2 %**	90,5 %	3,2 %
Innvendig side av innvendig EPS	**76,5 %**	**76,5 %**	**76,0 %**	**76,0 %**	0,5 %
Utvendig side av trevirke	**76,0 %**	**76,0 %**	**75,5 %**	**75,5 %**	0,5 %
Innvendig side av trevirke	72,5 %	72,5 %	72,5 %	72,5 %	-

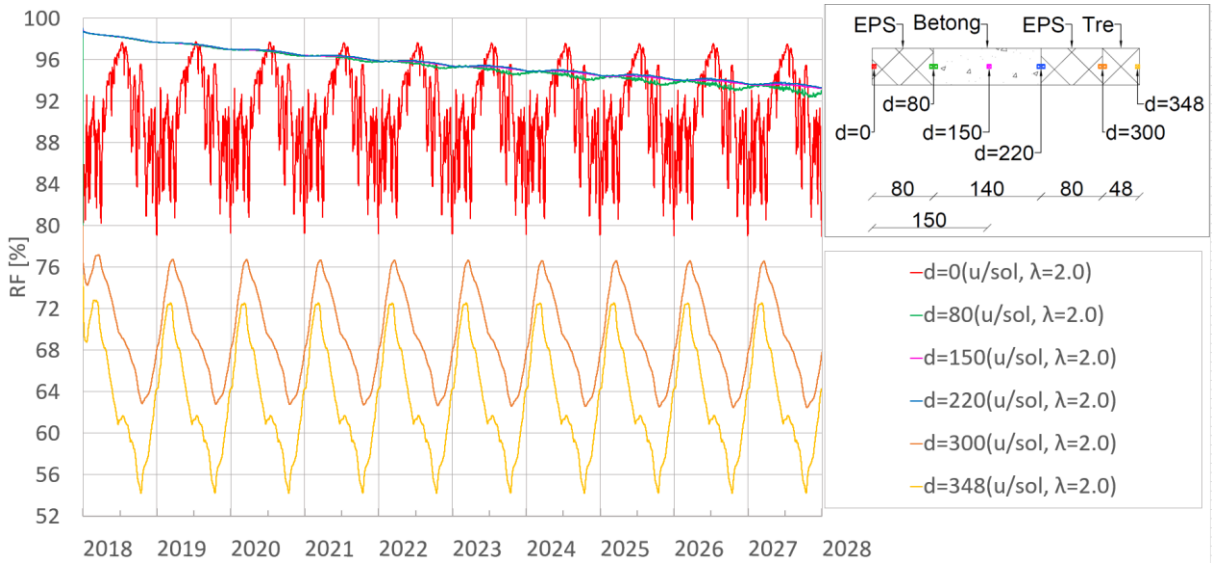
Tabell 4-2: RF- verdi målt etter 10 år, nedre del av vegg, med og uten sol, ulik lambda. Høyeste målt RF er markert rødt, lavest målt RF er markert grønn

	Uten sol, λ_{jord}=2,0	**Uten sol, λ_{jord}=1,5**	**Med sol, λ_{jord}=1,5**	**Med sol, λ_{jord}=2,0**	**Forskjell**
Utvendig side av utvendig EPS	100 %	100 %	100 %	100 %	-
Innvendig side av utvendig EPS	86,5 %	**87,0 %**	86,0 %	**85,8 %**	1,2 %
Utvendig betong	86,5 %	**87,0 %**	86,5 %	**86,0 %**	1,0 %
Midt av betong	87,0 %	**87,3 %**	86,5 %	**86,0 %**	1,3 %
Innvendig betong	86,5 %	**86,7 %**	85,7 %	**85,5 %**	1,2 %
Utvendig side av innvendig EPS	86,5 %	**86,7 %**	85,7 %	**85,5 %**	1,2 %
Innvendig side av innvendig EPS	**81,3 %**	80,9 %	**80,5 %**	81,0 %	0,8 %
Utvendig side av trevirke	**81,0 %**	80,5 %	**80,2 %**	80,8 %	0,8 %
Innvendig side av trevirke	**78,0 %**	**77,5 %**	**77,5 %**	**78,0 %**	0,5 %

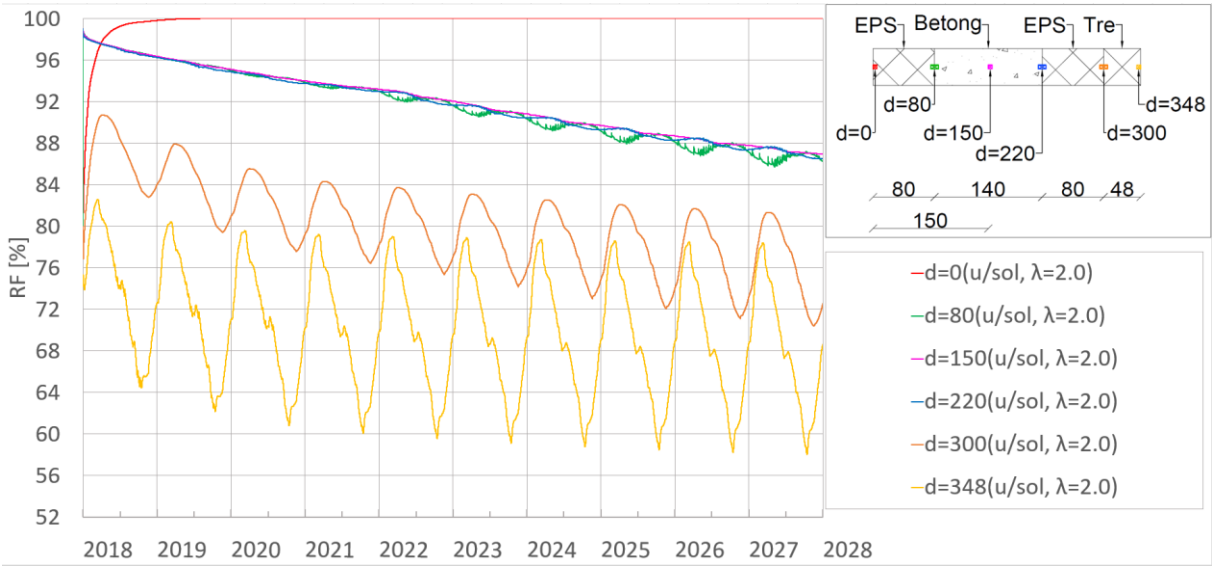
På Tabell 4-2 observeres det at i sjiktet «Innvendig side av innvendig EPS» skjer det en endring i hvilken variant som gir lavest RF. I dette sjiktet vil varianten m/sol og λ=1,5 W/mK gi lavest RF. Det samme gjelder for de resterende sjiktene mot innvendig side. Disse sjiktene vil bli mest påvirket av det innvendige klimaet og kuldebroen som er mellom dekke og veggen. Dersom varmeledningsevnen på grunnen er lav vil dette påvirke temperaturen i kuldebroen, og føre til en lavere temperatur. Den lave temperaturen gjør at fukt diffunderer i retning kuldebroen, og variantene som har den laveste temperaturen på kuldebroen, får best uttørking i sjiktet.

Figur 4-1 viser hvordan uttørkingsforløpet er gjennom hele veggen, i øvre del, for varianten som ikke inkluderer solstråling, med høy varmeledningsevne på utvendig side. Tabell 4-1 viser at dette er den fuktigste varianten gjennom hele veggen.

Figur 4-2 viser uttørkingsforløpet for den samme varianten, men i nedre del av konstruksjonen. I den nedre delen er ikke varianten den fuktigste før RF måles i sjiktene på innvendig side.



Figur 4-1: Uttørkingsforløpet gjennom hele veggen for varianten u/sol, λ=2,0 W/mK, i øvre del av konstruksjonen



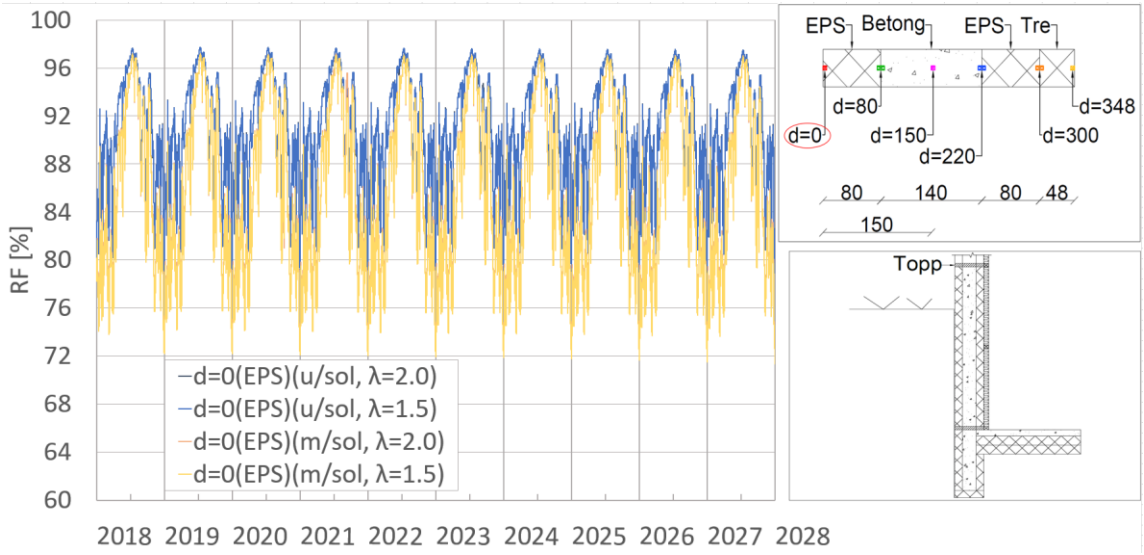
Figur 4-2:Uttørkingsforløpet gjennom hele veggen for varianten u/sol, λ=2,0 W/mK, i nedre del av konstruksjonen

4.2.1 Utvendig side av utvendig isolasjon

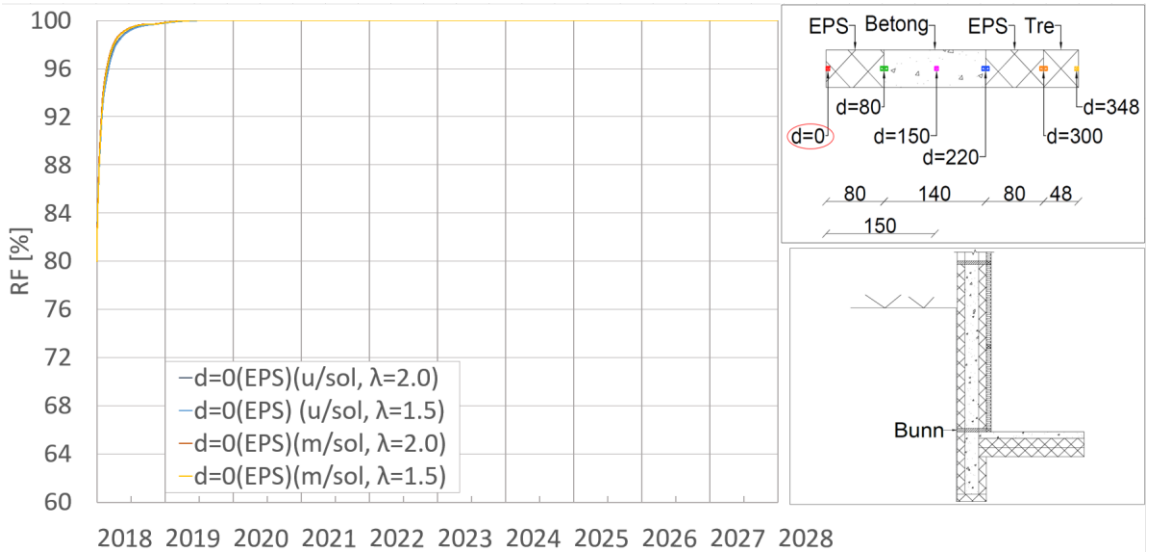
På Figur 4-3 og Figur 4-4 vises uttørkingsforløpet, i ytterste del av utvendig isolasjon i konstruksjonens øvre og nedre del. Dette er målingen som blir mest påvirket av det utvendige klimaet. Det er ikke mulig å konkludere om noen av beregningsvariantene gir ulikt uttørkingsforløp i kjellerveggen basert på dette sjiktet.

Figur 4-3 viser uttørkingsforløpet i øvre del av konstruksjonen. Her varierer alle varianter med tilsvarende RF gjennom alle årene, og veggen vil ha samme variasjon av RF i sjiktet gjennom 10 år. RF er lavest på sommeren og høyest om vinteren. Dette tilsvarer variasjonen i RF i det utvendige klimaet.

Figur 4-4 viser RF- verdien i nedre del av konstruksjonen. Her har alle variantene samme trend. RF stiger hurtig rett etter at simuleringene begynner. 1 1/2 år etter at simuleringene begynner, er RF 100 % i den utvendige isolasjonen. Det vil ikke skje noe uttørking i dette sjiktet.



Figur 4-3: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 0 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-4: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 0 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.2 Innvendig side av utvendig isolasjon

Figur 4-5 og Figur 4-6 viser hvordan RF endrer seg på innvendig side, av den utvendige isolasjonen i øvre og nedre del av konstruksjonen. En interessant observasjon er at de høyeste og laveste punktene for RF opptrer på motsatte tidspunkt over og under terrenget. Den laveste RF- verdien blir målt i nedre del av veggen.

Figur 4-5 viser hvordan uttørkingen er i øvre del av konstruksjonen. RF i EPS materialet stiger til 99 % i løpet av de første ukene, og uttørkingen de første årene skjer sent. Etter at materialet får en RF på 93 % skjer uttørkingen hurtigere. Variasjonen i RF målt i sjiktet gjennom et år blir større ettersom simuleringen varer. I sjiktet begynner effekten av solstråling å bli stor og variantene som inkluderer solstråling får en mye lavere RF enn de som ikke inkluderer solstråling. Uttørkingen skjer hurtigere for variantene med sol, men trenden i hvordan RF varierer er lik for de fire variantene i sjiktet. Høyeste og laveste RF som blir målt i sjiktene gjennom et år forekommer på de samme månedene for alle varianter. Forskjellene mellom de ulike konduktivitetene er ikke stor, men lav konduktiviteten gir lavest RF i veggen. For variantene som inkluderer solstråling vil RF minke fra 99 % til 90 %, en uttørking på 10 %. For variantene som ikke inkluderer solstråling vil materiale ha nådd en RF på 93 % etter 10 år, en uttørking på 6 %. Høyeste og laveste RF- verdi i sjiktet etter at det er simulert 10 år er oppsummert i Tabell 4-3.

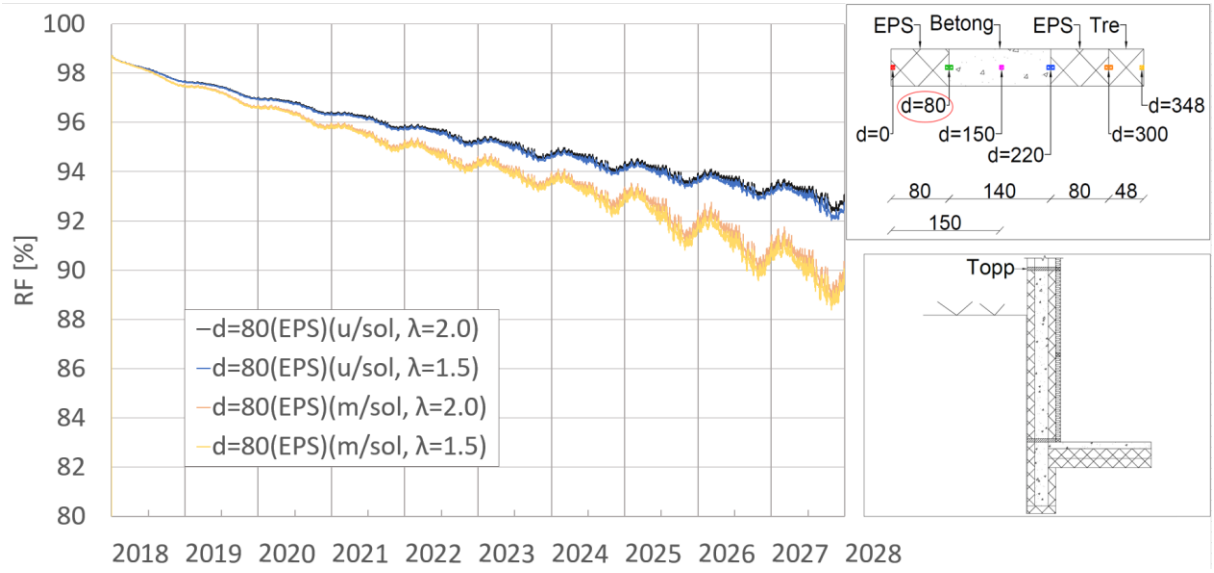
Tabell 4-3: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	August	u/sol, λ=2,0 W/mK	93,0
Bunnpunkt/ lavest målte RF	April	m/sol λ=1,5 W/mK	90,0

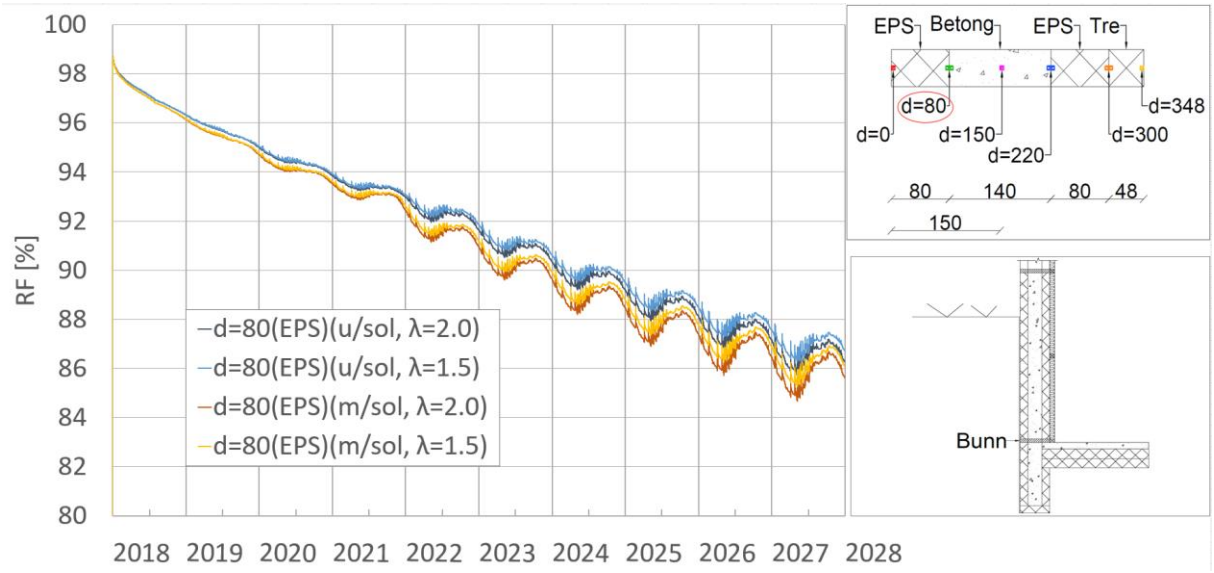
Figur 4-6 viser hvordan uttørkingen er i nedre del av konstruksjonen. Effekten av solstråling i dette sjiktet er mindre enn i øvre del av konstruksjonen, men variantene som inkluderer solstråling får den laveste RF- verdien i sjiktet. Solstråling gir størst effekt på uttørkingen av konstruksjonen fra det er simulert 2 år og frem til det er simulert 7 år. Etter 7 år blir effekten av solstråling mindre og når simuleringene har vart i 10 år vil effekten av solstråling være liten. RF- verdien i materialet stiger raskt fra 80 % til 99 % og tørker ut til en RF på rundt 86 %. Det er en reduksjon av RF med 13 %. Variantene i sjiktet har samme variasjon i RF gjennom hele simuleringen. Etter at RF i materiale har sunket til 93 % blir forskjellen mellom målt RF i de ulike årstidene større for hvert år. Etter 10 år er denne forskjellen 1 %. Effekten av ulik varmeledningsevne i grunnen på konstruksjonens uttørkingsforløp er mindre enn effekten av solstråling. Men i sjiktet gir høy varmeledningsevne lavest RF. Høyeste og laveste RF- verdi i sjiktet er oppsummert i Tabell 4-4.

Tabell 4-4: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	Variant	RF [%]
Toppunkt/ høyest målte RF	April	u/sol, λ=1,5 W/mK	87,0
Bunnpunkt/ lavest målte RF	August	m/sol, λ=2,0 W/mK	85,8



Figur 4-5: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-6: Uttørkingsforløp for utvendig EPS, 80 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.3 Utvendig side av betongen

Figur 4-7 og Figur 4-8 viser hvordan RF endrer seg i den utvendige siden av betongen, mot den utvendige isolasjonen i øvre og nedre del av konstruksjonen. De høyeste fuktverdiene i løpet av et år kommer på motsatte tidspunkt i øvre og nedre del i betongen. Den laveste RF- verdien blir målt i nedre del av veggen.

Figur 4-7 viser hvordan RF varierer i øvre del av konstruksjonen. Trenden er lik som for den utvendige isolasjonen, men i betongen vil variasjonene i RF være mer dempet med mindre variasjoner gjennom et år. Solstråling har i øvre del av konstruksjonen størst effekt på veggens uttørking og variantene som inkluderer solstråling får lavest RF. Etter 10 år vil betongen ha tørket ut til en RF på ca. 90 % for variantene som inkluderer solstråling. Det tilsvarer en uttørking på 9%. For variantene som ikke inkluderer solstråling vil RF ende på ca. 93 %, dette tilsvarer uttørking på ca. 7 %. Effekten av solstråling gir en forskjell i uttørking på rundt 3 %. Effekten av ulik varmeledningsevne i grunnen er liten, men for alle varianter gir lav varmeledningsevne den laveste RF- verdien i sjiktet. Selv om det er forskjell i hvor mye av materiale som tørker ut, er trenden fortsatt lik. Det laveste og høyeste fuktinnholdet opptrer i de samme månedene for alle variantene. Etter at RF i betongen har kommet under 93 % skjer uttørkingen raskere, og variasjonen i RF gjennom et år blir større. Forskjellen øker med simuleringstiden og etter at det er simulert 10 år er forskjellen mellom høyest og lavest RF i løpet av et år, 2 %. For variantene som ikke inkluderer solstrålingen er forskjellen mellom høyeste og laveste RF mindre, og etter 10 år er forskjellen 1 %. En oppsummering av varianten med høyest og lavest fuktinnhold i sjiktet kan sees i Tabell 4-5.

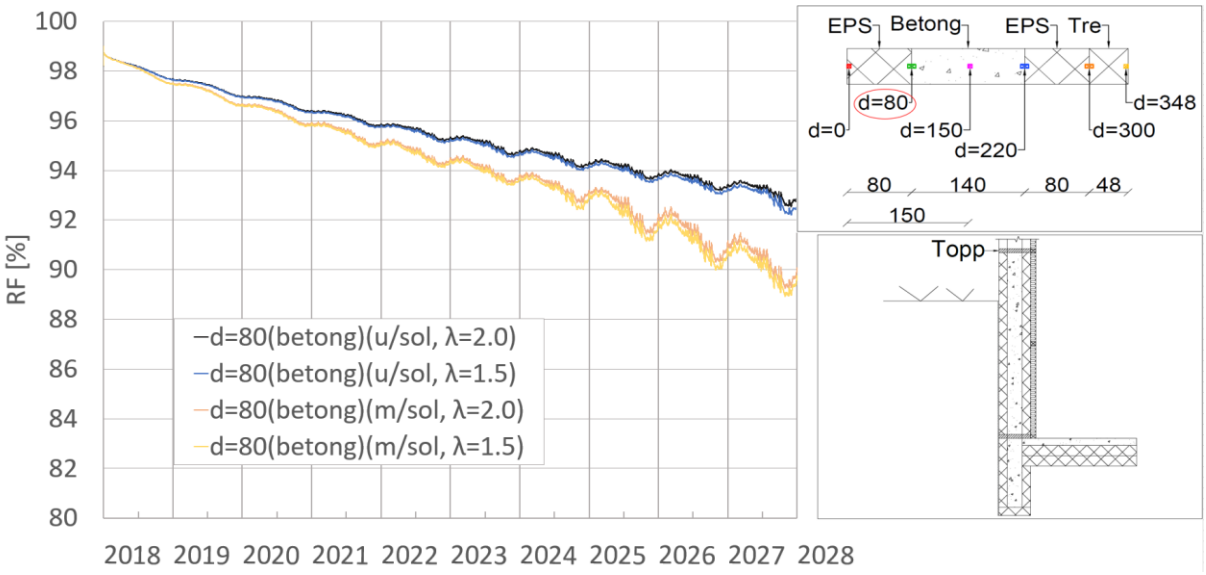
Tabell 4-5: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	November	u/sol, λ=2,0 W/mK	93,0
Bunnpunkt/ lavest målte RF	Mai	m/sol, λ=1,5 W/mK	89,5

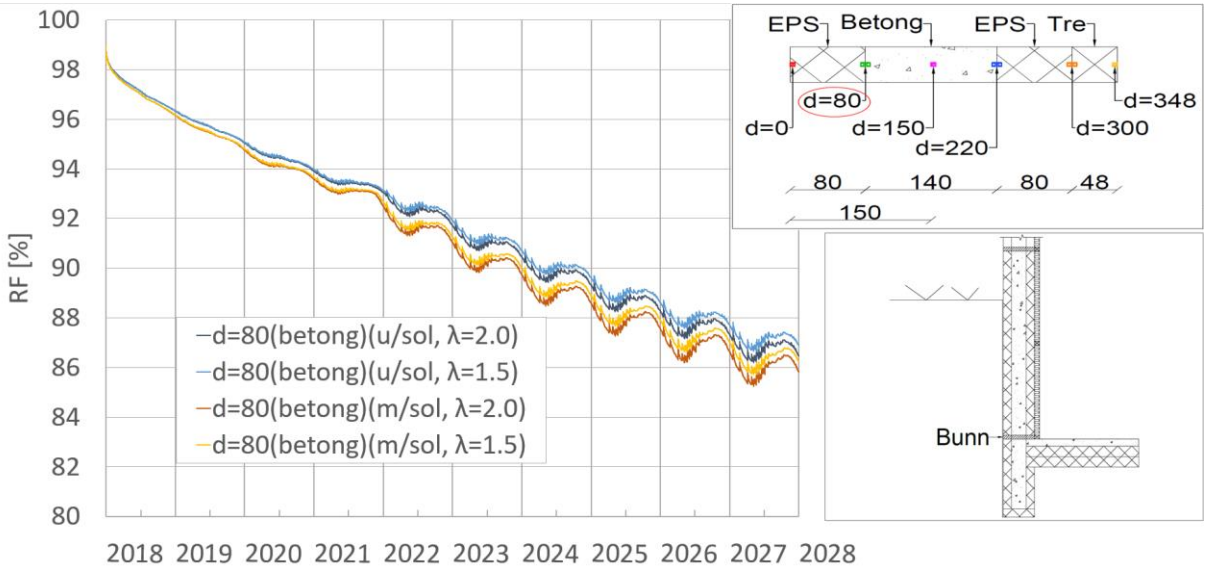
Figur 4-8 viser hvordan RF varierer i nedre del av konstruksjonen. Her er trenden lik som for den utvendige isolasjonen, men variasjonen i RF er mer dempet. Effekten av solstråling på veggens uttørking i sjiktet er mindre enn i øvre del, men gir fortsatt lavest RF i sjiktet. Solstråling har størst effekt på uttørkingen av veggen mellom 2 og 7 år. Etter 10 år vil effekten av solstråling være liten. Variantene som inkluderer solstråling ender med en RF på ca. 86 %, som tilsvarer en uttørking på 13 %. For variantene som ikke inkluderer solstråling, blir RF ca. 87 %, en uttørking på 12 %. I sjiktet er effekten av jordens varmeledningsevne på veggens uttørkingsforløp større enn i veggens øvre del. Variasjonen i RF gjennom et år er lik for alle variantene og høyest og lavest RF- verdi opptrer i de samme månedene. Forskjellen i RF gjennom et år er størst mot slutten av simuleringen, da endres RF i materialet med 2 %. Tabell 4-6 oppsummerer hvilken variant som gir en konstruksjon med høyest og lavest fuktinnhold.

Tabell 4-6: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 80 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	Mai	u/sol, λ=1,5 W/mK	87,0
Bunnpunkt/ lavest målte RF	November	m/sol, λ=2,0 W/mK	85,8



Figur 4-7: Uttørkingsforløp for betongen, 80 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-8: Uttørkingsforløp for betongen, 80 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.4 Midten av betong

Figur 4-9 og Figur 4-10 viser variasjon i RF- verdien i midten av betongen. Den laveste RF- verdien blir målt i nedre del av veggen

Figur 4-9 viser uttørkingsforløpet til betongen i øvre del av konstruksjonen. Effekten av solstråling er stor i midten av betongen og gir den laveste RF- verdien. Etter 10 år vil variantene som inkluderer solstråling synke til en RF på ca. 90 %. For variantene som ikke inkluderer solstråling er endelig RF- verdi på ca. 93 %. Effekten av solstråling er en forskjell i RF på ca. 3 % i dette sjiktet. Effekten av jordens varmeledningsevne er større i dette sjiktet sammenlignet med sjikt plassert lenger mot utvendig side. Lav varmeledningsevne gir en lavere RF. De 4 variantene ser ut til å følge hverandres trender med topp- og bunnpunkter i de samme månedene. RF ser ikke ut til å stige i verdi i løpet av et år, men den holder seg konstant den første halvdelen av et år for så å synke. Når RF- verdien for variantene som inkluderer solstråling kommer på 93 % begynner uttørkingen å bli betraktelig raskere og effekten av jordens varmeledningsevne blir også større. Tabell 4-7 oppsummerer hvilke varianter som får høyest og lavest RF- verdi i sjiktet.

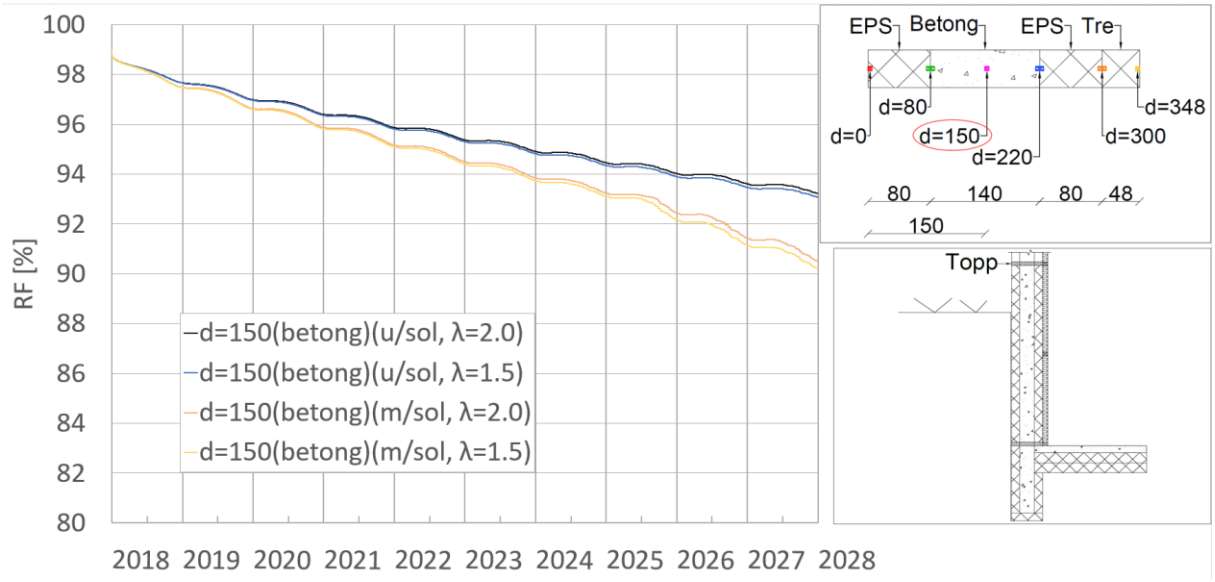
Tabell 4-7: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 150 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	Januar	u/sol, λ=2,0 W/mK	93,4
Bunnpunkt/ lavest målte RF	Juni	m/sol, λ=1,5 W/mK	90,2

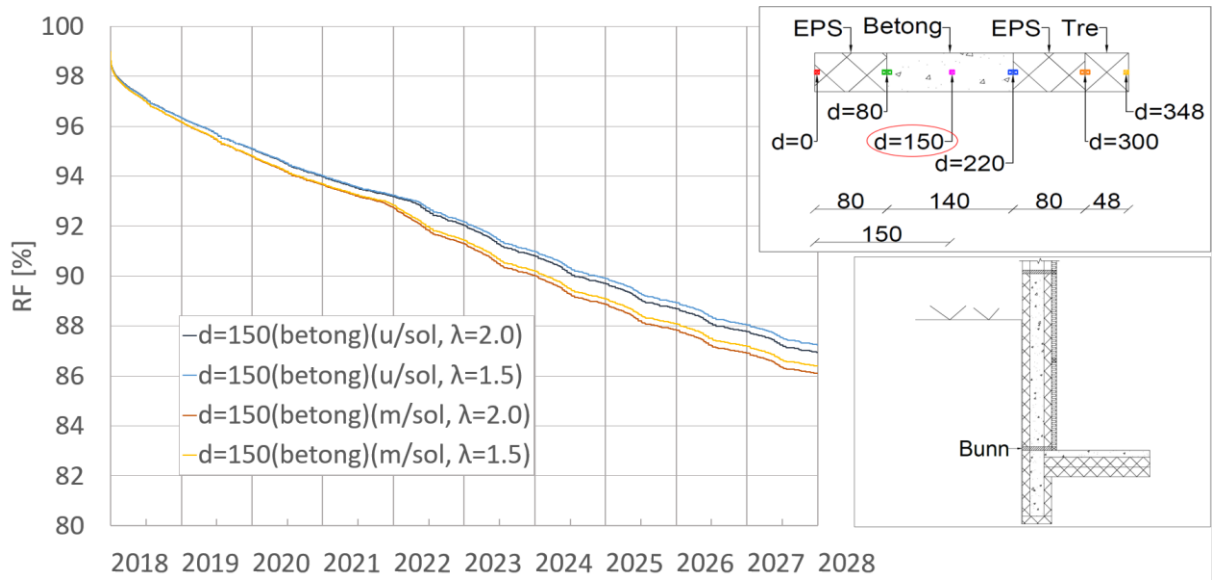
Figur 4-10 viser hvordan uttørkingen skjer i nedre del av konstruksjonen. Effekten av solstråling er større i dette sjiktet enn for de andre sjiktene som er plassert nærmere utvendig side. Etter 10 år har variantene som inkluderer solstråling endt opp med en RF på 86 %, det er en uttørking på 13 %. For variantene som ikke inkluderer solstråling, ender RF opp på 87 %. En uttørking på 12 %. Det observeres ingen markante topp- og bunnpunkter av RF i dette sjiktet. Trenden er en jevn uttørking uten store variasjoner. Uttørkingen skjer mye hurtigere etter at RF har nådd 93 %. Etter RF har sunket til 93 % blir grafen brattere og effekten av ulik varmeledningsevne og solstråling blir større. En oppsummering av hvilke varianter som gir lavest RF er vist i Tabell 4-8.

Tabell 4-8: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 150 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	-	u/sol, λ=1,5 W/mK	87,3
Bunnpunkt/ lavest målte RF	-	m/sol, λ=2,0 W/mK	86,0



Figur 4-9: Uttørkingsforløp for betongen, 150 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-10: Uttørkingsforløp for betongen, 150 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.5 Innvendig side av betong

Figur 4-11 og Figur 4-12 viser hvordan RF varierer i øvre og nedre del av konstruksjonen på innsiden av betongen, mot innvendig isolasjon. I motsetning til utvendig side av betongen forekommer høyeste og lavest RF i løpet av et år, på samme tidspunkt i øvre og nedre del av veggen. Den laveste RF- verdien blir målt i nedre del av veggen

Figur 4-11 viser hvordan RF varierer i øvre del av konstruksjonen. Effekten solstråling har på veggens uttørkingsforløp er stor og gir lavest RF i sjiktet. RF i sjiktet med variantene som inkluderer solstråling blir ca. 90 % etter 10 år. Dette tilsvarer en uttørking på 9 %. For variantene som ikke inkluderer solstråling går uttørkingen tregere og RF ender på 93 %. Effekten av solstråling på veggens uttørkingsforløp er på ca. 2 %. Effekten av jordens varmeledningsevne er mindre enn solstråling. I sjiktet gir lav varmeledningsevne lavest RF. RF i sjiktet varierer mellom høy og lav verdi gjennom et år, og alle variantene har lik variasjon. Uttørkingshastighet øker når materialet får en RF under 93 %. Da blir kurven brattere, og variasjonen i løpet av et år blir større. Effekten av jordens varmeledningsevne blir også større etter at RF- verdien kommer under 93 %. Tabell 4-9 oppsummerer hvilke varianter som gir lavest og høyest RF i veggen.

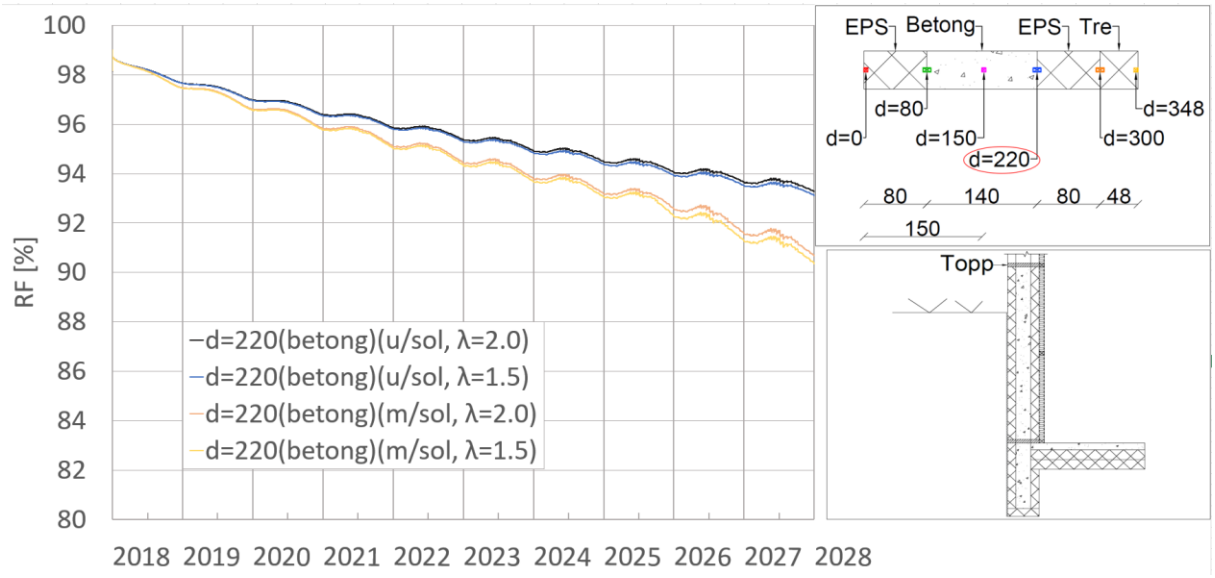
Tabell 4-9: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	Desember	u/sol, λ=2,0 W/mK	93,4
Bunnpunkt/ lavest målte RF	Juni	m/sol, λ=1,5 W/mK	90,2

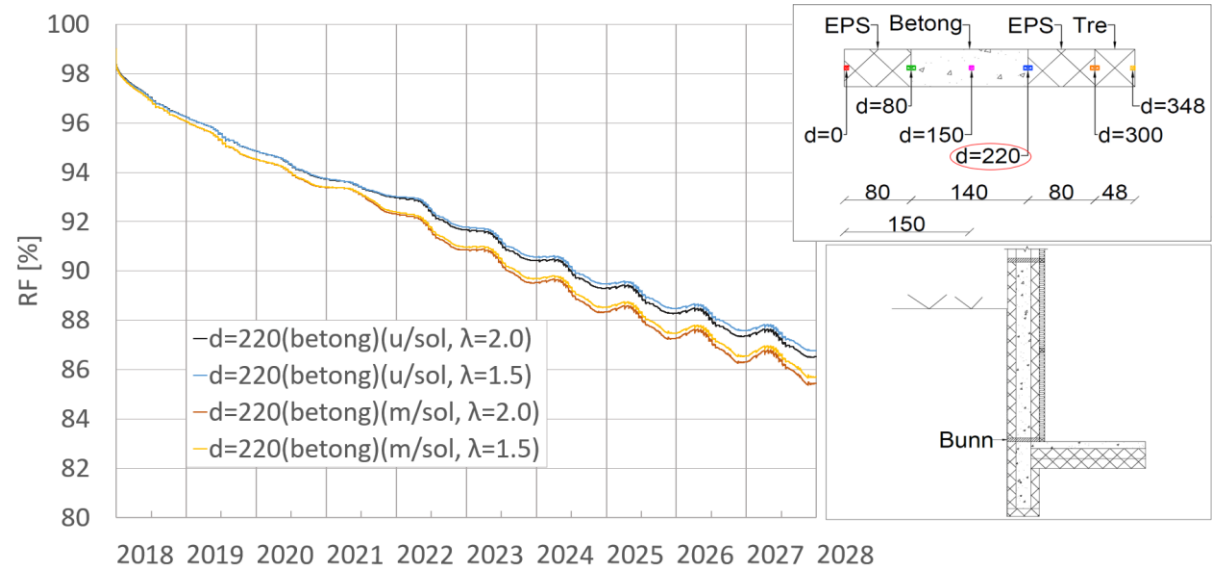
Figur 4-12 viser hvordan RF varierer i nedre del av konstruksjonen. Effekten av solstråling er mye større i dette sjiktet, sammenlignet med sjiktene nærmere utvendig side. Variantene som inkluderer solstråling har etter 10 år en RF på ca. 85,5 %. Dette tilsvarer en uttørking på 13,5 %. Variantene som ikke inkluderer solstråling, får en RF på 87 % og en reduksjon i RF på 12 %. Effekten av solstråling er en lavere RF- verdi på 1,5 %. Ulik varmeledningsevne har en mindre påvirkning på veggens uttørkingsforløp. Trenden til de ulike variantene er lik gjennom hele simuleringen. Etter at RF i betongen er under 93 % skjer uttørkingen mye raskere og variasjonen i RF i løpet av et år blir større. Effekten av både solstråling og ulik varmeledningsevne i grunnen blir også større. Tabell 4-10 oppsummerer hvilke varianter som får høyest og lavest RF.

Tabell 4-10: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i betongen, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	November	u/sol, λ=1,5 W/mK	86,7
Bunnpunkt/ lavest målte RF	Mai	m/sol, λ=2,0 W/mK	85,5



Figur 4-11: Uttørkingsforløp for betongen, 220 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-12: Uttørkingsforløp for betongen, 220 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.6 Utvendig side av innvendig isolasjon

Figur 4-13 og Figur 4-14 viser hvordan RF varierer i den innvendige isolasjonen, mot betongen. Veggen har likt uttørkingsforløp i øvre og nedre del av veggen, ettersom høyeste og laveste RF i løpet av et år er på samme tidspunkt for de to høydene. Den laveste RF-verdien blir målt i den nedre delen av veggen

Figur 4-13 viser variasjonen i øvre del av konstruksjonen. Uttørkingsforløpet er lik som for betongen i samme avstand fra utvendig side. I sjiktet er effekten av solstråling størst og gir lavest RF- verdi. Variantene som inkluderer solstråling, har hurtigst uttørking og forskjellen blir større jo lenger simuleringen varer. Etter 10 år har effekten av solstråling ført til en forskjell i RF på ca. 3 %. Effekten av jordens varmeledningsevne er mindre enn solstråling, og lav varmeledningsevne gir lavest RF. Variasjonene i RF i løpet av et år er lik for alle varianter. Som i tidligere sjikt skjer det også en økning i uttørkingshastigheten når materialet får en RF på 93 %. Da blir kurven brattere og forskjellen i RF i løpet av et år blir større. Det blir også større forskjeller mellom konduktivitetene etter at materiale har en RF på 93 %. En oppsummering av hvilke varianter som får høyest og lavest RF i dette sjiktet er vist i Tabell 4-11.

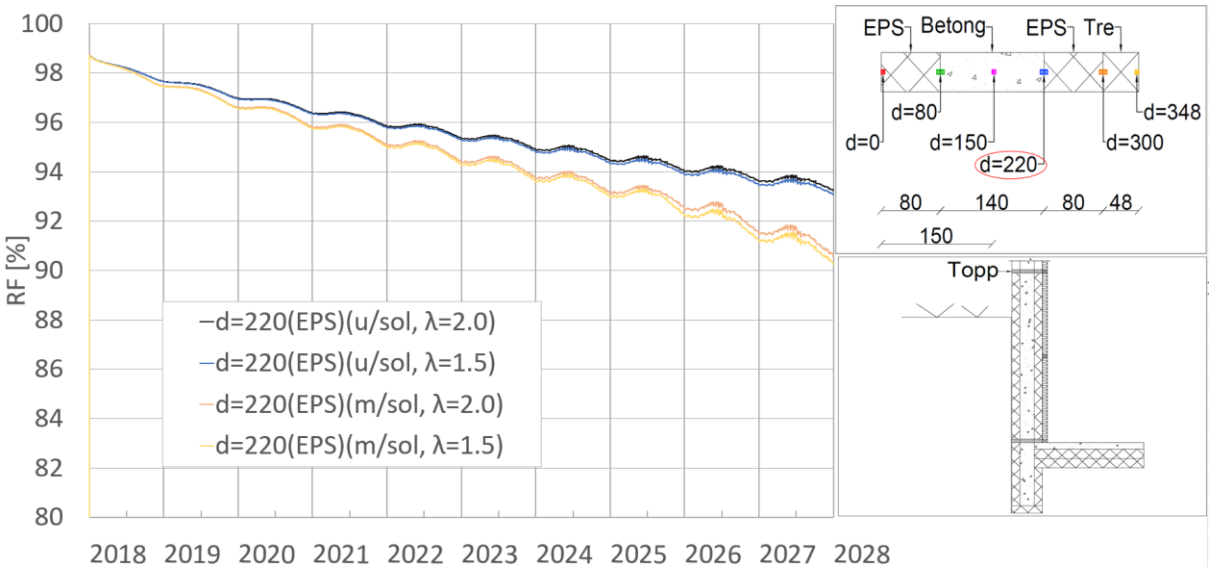
Tabell 4-11: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	November	u/sol, λ=2,0 W/mK	93,4
Bunnpunkt lavest målte RF	Juli	m/sol, λ=1,5 W/mK	90,2

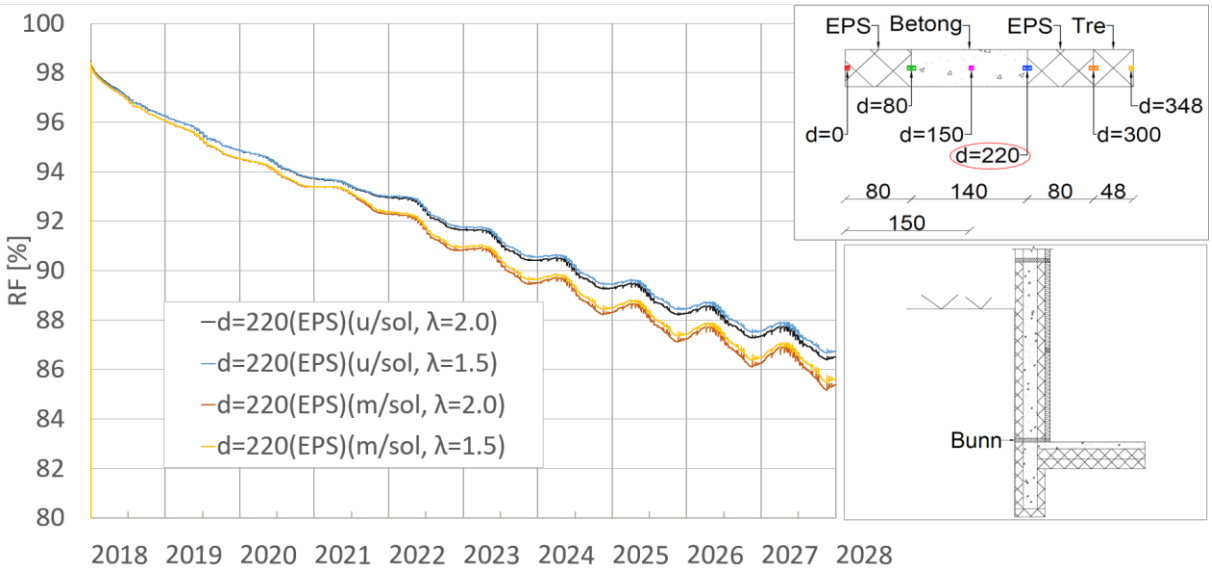
Figur 4-14 viser hvordan variasjonen i RF er i nedre del av konstruksjonen. Uttørkingsforløpet er lik som for betongsjiktet i samme avstand fra utvendig side. Effekten av solstråling er mindre i den øvre delen, og forskjellene blir større etter at RF er under 93 %. Mot slutten av simuleringen er effekten av solstråling i målt RF ca. 1 % og variantene som inkluderer solstråling gir lavest RF i sjiktet. Forskjellene i uttørking for variantene med ulike varmeledningsevne blir også større etter at RF har sunket til 93 %. Effekten til varmeledningsevnen på uttørkingsforløpet til veggen er liten sammenlignet med solstråling. Det er forskjeller i RF målt gjennom et år for alle varianter, og trenden er lik for alle. En oppsummering av måneden med lavest og høyest RF målt i konstruksjonen, og hvilken variant som får høyest og lavest RF- verdi kan sees i Tabell 4-12.

Tabell 4-12: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktet etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	Oktober	u/sol, λ=1,5 W/mK	86,7
Bunnpunkt lavest målte RF	Mai	m/sol, λ=2,0 W/mK	85,5



Figur 4-13: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-14: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 220 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.7 Innvendig side av innvendig isolasjon

Figur 4-15 og Figur 4-16 viser hvordan RF varierer i den innvendige isolasjonen, mot den innvendige påfôringen. Her er det store forskjeller mellom uttørkingsforløpet i øvre og nedre del av konstruksjonen, men i begge høydene er variasjonen lik som RF variasjonen for det innvendige klimaet. Den laveste RF- verdien blir målt i øvre del av veggen. At den laveste RF- verdien måles i øvre del av konstruksjonen skiller seg fra de andre sjiktene mot utvendig side.

Figur 4-15 viser hvordan RF varierer i øvre del av konstruksjonen. Det skjer ingen uttørking og materialet får heller ingen kraftig oppfukting som var tilfelle for materialer i direkte kontakt med betongen. Det er vanskelig å avgjøre hvordan uttørkingsforløpet påvirkes av ulik varmeledningsevne for i dette sjiktet. Variantene som inkluderer solstråling, vil gi lavest RF. Tabell 4-13 oppsummerer høyeste og laveste målte RF- verdi for dette sjiktet.

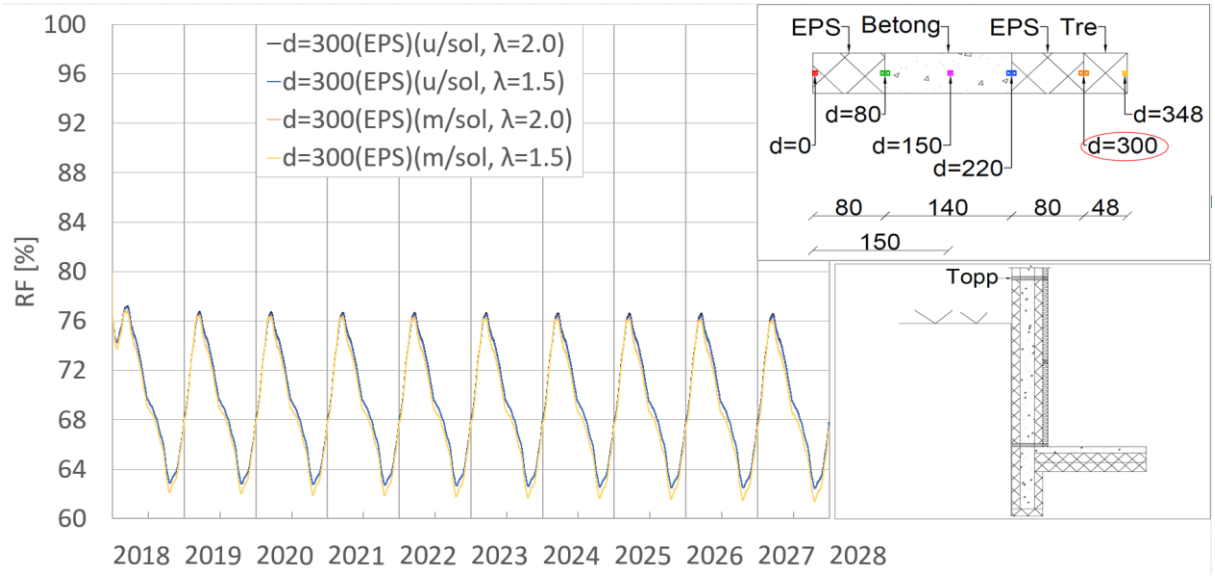
Tabell 4-13: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	August	u/sol	76,5
Bunnpunkt lavest målte RF	April	m/sol	76,0

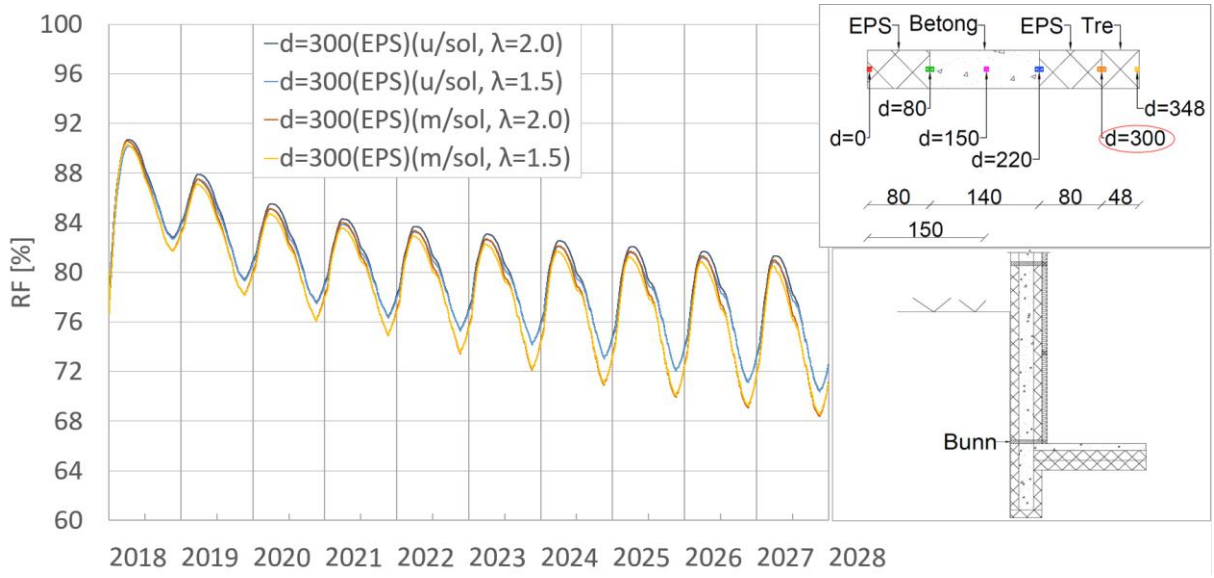
Figur 4-16 viser hvordan RF varierer i bunnen av konstruksjonen. Her skjer det en hurtig økning av RF i materialet, RF stiger raskt til 90 % før den tørker ut til 81 %. Variantene har samme trend gjennom hele simuleringen, og det er ingen forskjell i måten RF varierer på gjennom året for variantene. Konstruksjonen har en uttørking på 9 % etter at det er simulert 10 år. Effekten av solstråling vises i hvor lavt bunnpunktet kommer, og RF er lavest for variantene som inkluderer solstråling. Forskjellen mellom å inkludere solstråling eller ikke er på 2 %. Effekten av jordens varmeledningsevne er minimal, men kommer tydeligst frem når RF er på sitt høyeste gjennom et år. Da gir lav varmeledningsevne lavest RF. Tabell 4-14 oppsummerer høy og lav RF i sjiktet.

Tabell 4-14: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	August	u/sol, λ=2,0 W/mK	81,3
Bunnpunkt lavest målte RF	Mai	m/sol, λ=1,5 W/mK	80,5



Figur 4-15: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-16: Uttørkingsforløp for innvendig EPS, 300 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.8 Utvendig side av trevirke

Figur 4-17 og Figur 4-18 viser variasjonen i RF i den innvendige påføringen, mot den innvendige isolasjon. Uttørkingsforløpet er lik som for EPS materiale med lik avstand fra innvendig side. Den laveste RF- verdien blir målt i øvre del av veggen.

Figur 4-17 viser hvordan RF varierer i øvre del av konstruksjonen. Det er ikke store forskjeller mellom de ulike variantene, og det er vanskelig å se effekten de ulike utvendige forholdene har på uttørkingsforløpet. Solstråling gir lavest RF når sjiktet tørker ut, men når sjiktet blir fuktigere blir RF lik for alle varianter. Alle variantene har samme RF i toppunktet, 76 %. Trenden for alle variantene er lik gjennom hele simuleringen og følger hvordan RF varierer i det innvendige klimaet. Variasjonen i RF i løpet av et år er høy og forskjellen mellom høyeste og laveste RF er på 15 %. Tabell 4-15 oppsummerer RF-verdiene i sjiktet.

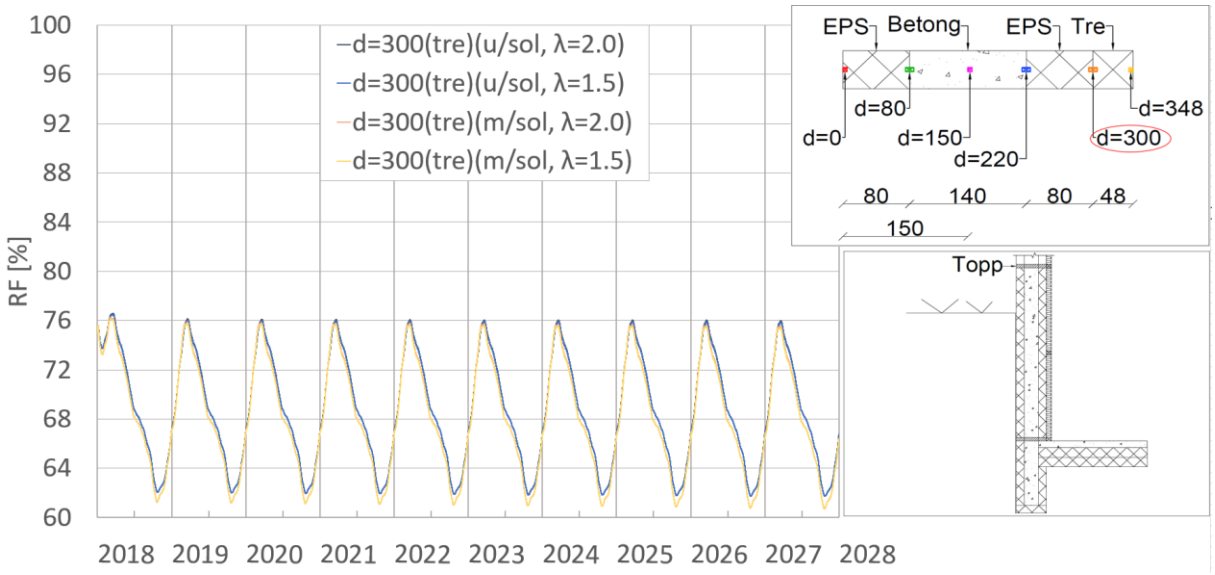
Tabell 4-15: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	Oktober	u/sol	76,0
Bunnpunkt lavest målte RF	Mai	m/sol	75,5

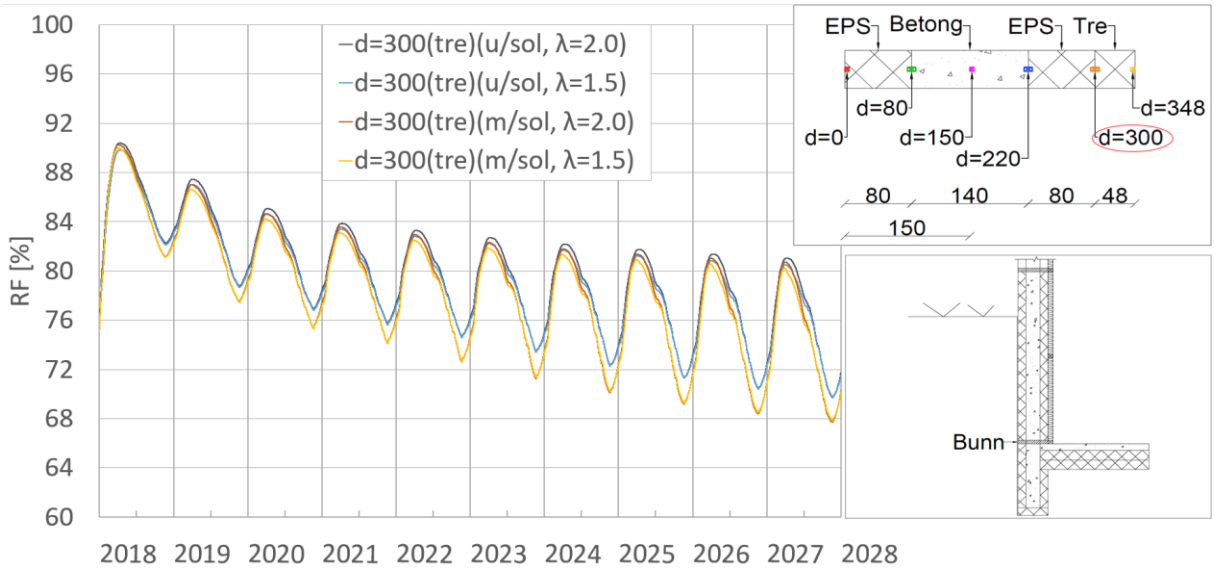
Figur 4-18 viser uttørkingsforløpet i bunnen av konstruksjonen. Her stiger RF fort fra 75 % til 91 %. Trevirke vil tørke ut og få en lavere RF for hvert år og ender opp med en RF på 81 %. Dette er en uttørking på ca. 10 % etter en kraftig oppfukting de første ukene. Variasjonene i RF i løpet av et år blir større jo lenger simuleringen varer, og variasjonen er lik for alle varianter. Variasjonene i RF i sjiktet følger hvordan RF varierer for innvendig klima. Når RF er på sitt laveste i løpet av et år kan effekten til solstråling observeres. Variantene som inkluderer solstråling, får den laveste RF- verdien. Verdien er ca. 2 % lavere enn variantene med ulik varmeledningsevne. Effekten av ulik varmeledningsevne i jorda er minimal. Tabell 4-16 oppsummerer trender i RF for sjiktet.

Tabell 4-16: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 300 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	November	u/sol, λ=2,0 W/mK	81,0
Bunnpunkt lavest målte RF	Mai	m/sol, λ=1,5 W/mK	80,2



Figur 4-17: Uttørkingsforløp for trevirke, 300 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-18: Uttørkingsforløp for trevirke, 300 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

4.2.9 Innvendig side av trevirke

Figur 4-19 og Figur 4-20 viser hvordan RF varierer i trevirke i topp og bunn av konstruksjonen på innvendig side av påfôringen, mot innvendig kledning. Den laveste RF-verdien blir målt i øvre del av veggen.

Figur 4-19 viser uttørkingsforløpet i toppen av konstruksjonen. Initialfukten i trevirke er 75 % og denne synker hurtig den første tiden til 69 %. Etter dette innstiller det seg en likevekt i trevirke med innvendig klima og det skjer ingen store endringer i verdien av RF i topp- og bunnpunktet. Det er ikke mulig å si noe om hvilken av de utvendige faktorene som påvirker uttørkingsforløpet i dette sjiktet, alle variantene har lik trend som er tilsvarende med hvordan RF varierer for innvendig klima. Tabell 4-17 oppsummerer hvilken RF- verdi som er lavest og høyest, og når verdiene oppstår i sjiktet.

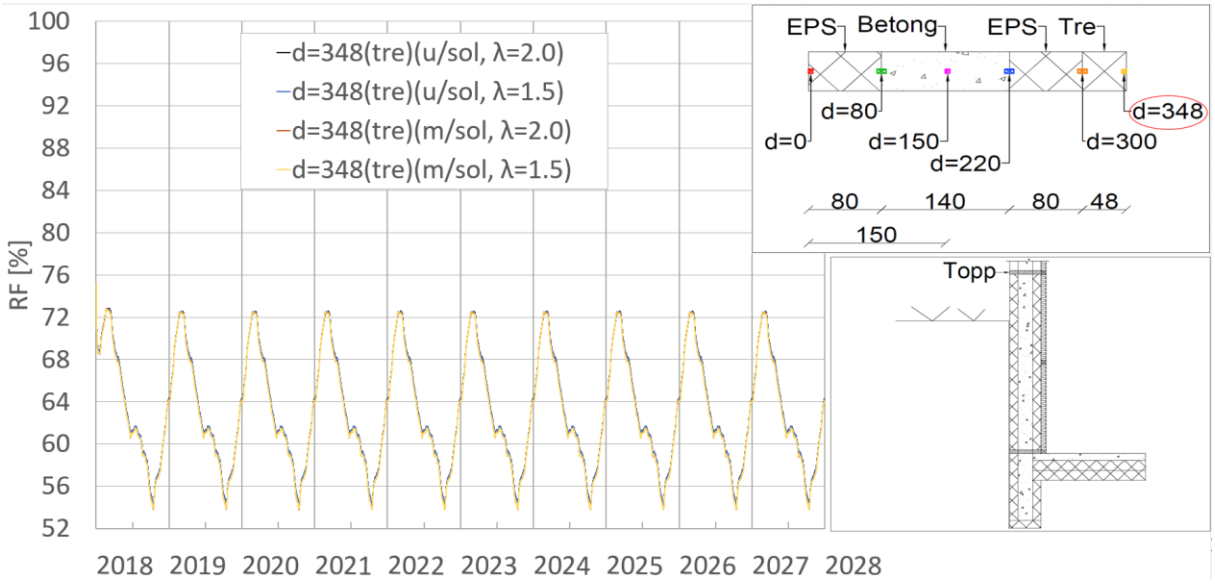
Tabell 4-17: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 348 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Øvre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	August	-	72,5
Bunnpunkt lavest målte RF	April	-	72,5

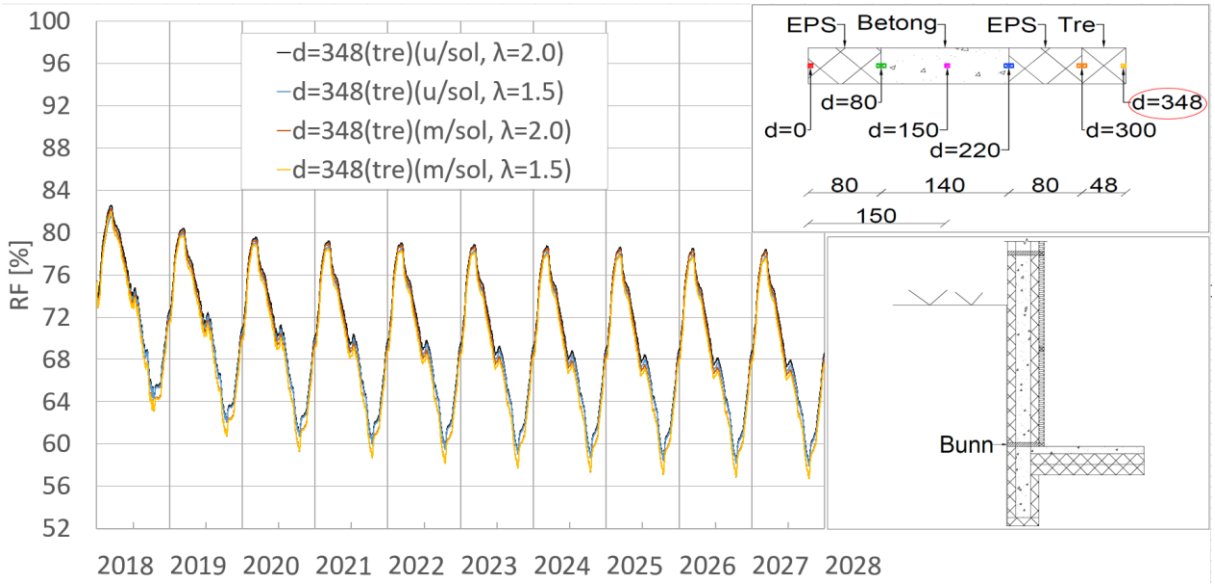
Figur 4-20 viser hvordan RF varierer i bunnen av konstruksjonen. Når simuleringen begynner stiger RF hurtig fra 75 % opp til 82 %. Etter at trevirke har nådd en RF- verdi på 82 % begynner RF å synke. På samme måte som i øvre del av veggen kan det se ut som om trevirke har innstilt en likevekt med innvendig klima etter oppfuktingen. Effekten til solstråling kan sees når RF er på sitt laveste, ved at solstråling gjør at veggen får en lavere RF enn ulik varmeledningsevne. Når RF er på sitt høyeste i sjiktet kan det for første gang observeres at solstråling ikke lenger har en effekt på uttørkingsforløpet i veggen. Toppunktet er i august, og her er effekten av grunnens varmeledningsevne størst. Høy varmeledningsevne gir høyest RF i sjiktet, og lav varmeledningsevne gir lavest RF. Trenden for alle variantene er lik for sjiktet. Tabell 4-18 oppsummerer hvilke måneder som har høyest og lavest RF i sjiktet og hvilke varianter som har høyest og lavest RF i toppunktet etter at det er simulert 10 år.

Tabell 4-18: Variantene med høyeste og laveste RF- verdi målt i trevirke, 348 mm fra utvendig side. RF- verdien er målt i sjiktets toppunkt etter at det er simulert 10 år. Nedre del av konstruksjonen

	Måned	**Variant**	**RF [%]**
Toppunkt/ høyest målte RF	August	u/sol, λ=2,0 & m/sol, λ=2,0	78,0
Bunnpunkt/ lavest målte RF	April	u/sol, λ= 1,5 & m/sol, λ=1,5	77,5



Figur 4-19: Uttørkingsforløp for trevirke, 348 mm fra utvendig side i øvre del av veggen, simulert i 10 år



Figur 4-20: Uttørkingsforløp for trevirke, 348 mm fra utvendig side i nedre del av veggen, simulert i 10 år

5 Diskusjon

I masteroppgaven er det undersøkt hvilket beregningsoppsett som egner seg for undersøkelser av uttørkingsforløpet til en kjellervegg. Beregningsoppsettet som ble valgt er en 2- stegs metode. I oppgaven er det gjennomført 4 ulike simuleringer hvor det er variert med 2 ulike parametere basert på en parameterstudie. Simuleringene er inkludert solstråling (**m/sol**), ikke- inkludert solstråling (**u/sol**), jorden på utvendig side har hatt høy varmekonduktivitet (**λ= 2,0 W/mK**) og lav varmekonduktivitet (**λ= 1,5 W/mK**). For hver av de ulike variantene er det gjennomført en 2- stegs metode. For alle disse 4 variantene er RF blitt målt i 9 forskjellige monitorpunkter:

- d=0
- d=80(EPS)
- d=80(betong)
- d=150(betong)
- d=220(betong)
- d=220(EPS)
- d=300(EPS)
- d=300(tre)
- d=348(tre)

Monitorpunktenes plassering i veggen kan sees i Figur 3-11. De 9 målingene er blitt gjort i 2 ulike høyder, høydene kan sees i Figur 3-10. Punktene er valgt for å undersøke veggens uttørkingsforløp, og hvordan kjellerveggen påvirkes av solstråling og jordens varmeledningsevne, både over og under terrenget.

Resultatene fra simuleringene viser at solstråling vil ha størst påvirkning på kjellerveggens uttørkingsforløp. Varmeledningsevnen til jorden på utvendig side har liten påvirkning på kjellerveggens uttørkingsforløp.

5.1 Hvordan utføre beregninger av kjellerveggens uttørkingsforløp

Det er viktig at simuleringsverktøyet som benyttes for å undersøke uttørkingsforløpet til en yttervegg mot terreng bruker tilstrekkelig med variabler i beregningen slik at resultatet blir nøyaktig nok. Det finnes flere ulike simuleringsverktøy på markedet, som hver inkluderer ulike variabler i varme- og fuktberegninger.

WUFI2D er et varme- og fuktberegnings program som inkluderer følgende transportmekanismer i varme- og fukttransport beregninger (WUFI2D, 2008):

- Termisk varmeledning
- Kort- bølget solstråling
- Vanndamp diffusjon
- Kapillær diffusjon
- Overflate diffusjon

WUFI 2D hadde problemer med å utføre fuktberegninger hvor grunnen på utvendig side hadde et høyt fuktinnhold. For varme- og fuktberegninger av grunn skal jorda ha en

konstant RF på 99 % (Standard Norge, 2007). En løsning på dette ble å dele opp varmestrøms- og fukttransport beregningen i en 2- stegs metode. En lignende metode er tidligere benyttet av Martinsen (2010) og Lund (2017), men da har HEAT blir brukt som varmestrøms beregningsprogram. For beregningene i masteroppgaven er det kun benyttet WUFI2D.

I 2- stegs metoden skal det først gjennomføres en varmestrømsberegning av konstruksjon og grunn, før det gjennomføres en fuktsimulering av kun konstruksjonen.

Steg 1 av metoden er en varmestrømsberegning på hele konstruksjonen, inklusiv grunnen på utvendig side. Dimensjonene til grunnen er funnet i NS-EN ISO 10211:2017 (Standard Norge, 2017b). Når varmestrømsberegningen er fullført undersøkes temperaturen i ulike dybder langs kjellerkonstruksjonen. Temperaturene hentes ut fra området der hvor konstruksjonen er i kontakt med bakken. Dette vil simulere de endrede påkjenningene som oppstår langs konstruksjonen i ulike dybder under terrenget. Når temperaturen ved de forskjellige punktene er undersøkt vil verdiene overføres til Excel og omformes til klimafiler. I WUFI2D benyttes .wac- filer som klimafiler og gjennom et Excel-ark kan man omforme Excel- filer til .wac- filer. Klimafilene lages av temperatur og RF. Temperaturen i ulike punkter langs veggen er undersøkt gjennom varmestrømsberegningen og RF er konstant på 99 %.

Steg 2 er å gjennomføre en fuktsimulering av kjellerkonstruksjonen. Klimafilene erstatter grunnen i fuktsimuleringen og det gjennomføres en fuktsimulering av konstruksjonen på WUFI2D. Når klimafilene er tilegnet langs hele konstruksjonen kan man utføre fuktsimuleringen, med et utvendig klima under terrenget som inkluderer endrede påkjenninger fra utvendig klima. RF vil måles i ulike monitorpunkter i veggen for å undersøke uttørkingsforløpet til kjellerveggen. Se Figur 3-3 for en detaljert beskrivelse av 2- stegs metoden

5.2 Påvirkningen solforhold og jordens varmeledningsevne har på en kjellervegg støpt i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem

Dagens metode for å beregne kjellerveggens varmetap mot grunnen er beskrevet i standarden NS-EN ISO 13370:2017 og antar at (Standard Norge, 2017a):

- Termisk konduktivitet er konstant over tid og rom.
- Det finnes ingen koblede effekter mellom varme- og fukttransport.

Til motsetning fra NS-EN ISO 13370:2017 mener Janssen, et al. (2004) at det finnes beviser for en koblet effekt mellom varme- og fukttransport. Den koblede fukt- og varmetransporten vil øke varmetapet fra en yttervegg mot grunnen og bør inkluderes i en slik beregning. Forenklingen som gjøres i NS-EN ISO 13370:2017 fører til et mindre varmetap fra ytterveggen, lavere overflatetemperatur og forskjeller i fukttransport i vegger og gulv. De 3 koblede effektene som i hovedsak vil påvirke varmetapet til en kjellervegg er (Janssen, et al., 2004):

- Økning i amplituden av jordas overflatetemperatur, grunnet solstråling og fordamping
- Variasjon av termiske egenskaper i jorda, basert på fuktinnhold
- Varmetransport med væske fukttransport

For denne masteroppgaven er parameteren sol bestemt å være inkludert eller ikke for de ulike variantene. Det er interessant å se om solstråling har en tydelig påvirkning på uttørkingsforløpet til ytterveggen. Som variasjon av termiske egenskaper i jorda, er det valgt å se på to konservative verdier, hentet fra NS-EN ISO 13370:2017, λ=2,0 W/mK og λ=1,5 W/mK (Standard Norge, 2017a).

Ettersom kjellerveggen er støpt i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem vil betongen være mettet på fukt når simuleringen begynner (SINTEF Byggforsk, 2021). Dette betyr at byggfukten i betongen er nødt til å diffundere mot utvendig og innvendig side av isolasjonen som fungerer som forskaling for den støpte betongveggen. Det vil være interessant å se hvordan veggen reagerer på en så kraftig oppfukting i starten av simuleringen.

I masteroppgavens undersøkelser av kjellerveggen vises effekten av solstråling og jordens varmeledningsevne på uttørkingsforløpet. Det er også tydelig at byggfukten fra den støpte betongveggen påvirker alle materialer som er i kontakt med betongen, og det vil bli en kraftig oppfukting de første ukene av simuleringen.

Solstråling

I øvre del av veggen er det tydelig at solstråling vil sørge for en rask uttørking av ytterveggen, sammenlignet med variantene som ikke inkluderer solstråling. Solstrålingen vil gjøre at fukten diffunderer mot innvendig side for alle sjikt innover i veggen, frem til d=300(EPS). I dette sjiktet skjer det ingen uttørking eller oppfukting og variasjonen i RF i sjiktet følger hvordan RF varierer i det innvendige klimaet. Ren diffusjon vil gå fra varm til kald side, og når solen varmer opp utvendig side av konstruksjonen vil fukten diffundere innover mot kaldere temperaturer. Dette gjør at uttørkingshastigheten til de ulike sjiktene mot utvendig side blir raskere, men det er allikevel ikke den gunstigste løsningen. Det er ikke ønskelig at all fukten skal diffundere mot innvendig side. Et fukttilskudd på innvendig side kan føre til ubehag for menneskene som oppholder seg i rommet. Dessuten er det montert en innvendig påføring på innvendig side og trevirke i påføringen vil ta stor skade av en oppfukting. Sammenligning av sjiktene; d=80 (EPS) og d=220 (EPS), viser en innoverrettet damptrykkgradient. I periodene hvor d=80 (EPS) tørker ut vil det bli en oppfukting i d=220 (EPS). Dette skyldes solstråling, og at damptrykkgradienten vendes mot innvendig side. Når d=220 (EPS) tørker ut, ser man derimot at det blir en oppfukting i d=80 (EPS). Dette viser at når solstrålingen ikke varmer opp utvendig side i like stor grad, vil damptrykkgradienten vende ut av ytterveggen. Variantene som ikke inkluderer solstråling, har en tregere uttørking av veggen. Dette skyldes at temperaturen på utvendig side vil være lavere og diffusjonen vil ikke være like sterk. Dersom temperaturen er lik på begge sider av konstruksjonen, vil dampstrømmer bare avhenge av vanndampens diffusjonstall og vanndampkonsentrasjonsendring (Thue, 2016). Fukten vil diffundere mot områder med lavere fuktnivå, og dette kan ta lengre tid enn om områdene hadde hatt temperaturforskjeller i tillegg.

Den nedre delen av veggen blir i mye mindre grad påvirket av solstrålingen. Dette er ikke overraskende ettersom sjiktet vil være under terreng og ikke få direkte eksponering av solstråling. Det vil allikevel være en forskjell mellom variantene som inkluderer solstråling og de som ikke gjør det, selv om sjiktet er under terrenget. For alle sjiktene innover i veggen gir solstråling en lavere RF. For sjiktene under terrenget kan det virke som om fukten vil diffundere mot utvendig side, ettersom utvendig EPS får et stort fukttilskudd og ikke har noen uttørking i simuleringstiden. Dette er motsatt av hva som foregår over terrenget, der damptrykkgradienten i noen tilfeller peker mot innvendig side. Diffusjonen

vil gå fra høy til lav temperatur, og det er sannsynlig å anta at det vil være kaldere på utvendig side så langt under terrenget. Oppfuktingen i sjiktet skyldes at når temperaturen blir lavere vil RF i lufta øke. Innelufta som diffunderer mot utvendig side vil bli kjølt ned, og RF vil øke. Selv om det er ulike temperaturer som driver damptrykkgradienten kan det på resultatene virke som om størst temperaturforskjell ikke gir best uttørking. Variantene som inkluderer solstråling, vil ha den høyeste temperaturen og minst temperaturforskjell på innvendig og utvendig side. Dette gir den laveste RF- verdien i sjiktet. Varianten som ikke inkluderer solstråling, kan antas å være den kaldeste varianten hvor temperaturforskjellen på innvendig og utvendig side er størst. Dette er derimot varianten med høyest RF. Det kan være at diffusjonen av fukt er mest effektiv ved en viss temperatur, og dersom temperaturforskjellen blir for stor og utvendig side blir for kald, vil diffusjonen gå tregere. For mange av sjiktene observeres en tidsperiode fra 2 til 7 år hvor solstråling har størst effekt på uttørkingsforløpet til veggen og gir en lavere RF i veggen. Etter at det er simulert 7 år blir effekten av solstråling redusert og forskjellen mellom de ulike variantene blir mindre. I perioden fra 2 til 7 år vil solstråling varme opp grunnen hurtigere, enn når solstråling ikke er inkludert. Etter at det er simulert 7 år vil temperaturen for alle variantene være lik i grunnen ettersom temperaturen i grunnen i hovedsak er styrt av utvendig temperatur (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015). Når denne temperaturen er oppnådd er uttørkingshastigheten også lik. Det er interessant å observere at i d=150 (betong) og d=220 (betong), er effekten av solstråling større enn sjiktene nærmere utvendig side. Ettersom damptrykkgradienten peker mot utvendig side, kan det antas at for sjiktene på innvendig side vil fukttilskuddet være minst. Dette er grunnen til at forskjellene er tydeligere mellom de ulike variantene. For sjiktene nærmere utvendig side vil fukten diffundere mot sjiktene, og oppfuktingen blir hyppigere noe som gir mindre forskjeller mellom de ulike variantene.

Varmeledningsevne

Det er også forskjeller i uttørkingsforløp når varmeledningsevnen til de ulike variantene varieres. Høy varmeledningsevne vil bety at grunnen vil lede varme lettere (Thue, 2016). I den øvre delen av konstruksjonen vil det alltid være lav varmeledningsevne som gir best uttørking av veggen, altså den laveste RF- verdien. I de ytre sjiktene vil forskjellen mellom høy og lav varmeledningsevne være liten, men for sjiktene lenger inn i veggen øker forskjellen mellom de ulike konduktivitetene. Lav varmekonduktivitet vil føre til at grunnen varmes opp tregere. Dette gjør at temperaturen på utvendig side av veggen, jordtemperaturen, vil ha en lavere temperatur enn dersom grunnen hadde høy varmeledningsevne. I den øvre delen av veggen vil fukt diffundere mot kuldebroen mellom dekke og vegg, ettersom temperaturen er lavere i kuldebroen enn utvendig side. Dersom varmeledningsevnen er lav, vil kuldebroen få en lavere temperatur ettersom utvendig side også har en lavere temperatur. Den lave temperaturen i kuldebroen vil øke temperaturforskjellen, og fukten diffunderer i større grad fra øvre del av veggen mot kuldebroen. Dersom varmeledningsevnen til grunnen er høy, gir dette en høyere temperatur på kuldebroen, og diffusjonen i øvre del av veggen styres i større grad av vanndampkonsentrasjonsendringer og vanndampens diffusjonstall. Dette gir en tregere uttørking (Thue, 2016). Sjiktene mot innvendig side av veggen vil ha en uttørking mer i retning av kuldebroen, og derfor ser man en tydeligere forskjell mellom de ulike konduktivitetene i dette sjiktet. Dette skyldes at konduktivitetene påvirker temperaturen i kuldebroen.

I den nedre delen av veggen vil forskjellen mellom konduktivitetene være størst i midten av betongen. I sjiktene på hver side av betongen ser man at forskjellen i RF mellom

konduktivitetene minker. I motsetning til øvre del av veggen er det høy varmeledningsevne som gir lavest RF- verdi. Ettersom det er høy varmekonduktivitet som gir lavest RF- verdi i sjiktet vil det ikke nødvendigvis være at størst temperaturforskjell mellom innvendig og utvendig side gir best uttørking. Den laveste temperaturen på utvendig side vil komme fra lav varmeledningsevne og uten solstråling, dette er den fuktigste varianten. For kjellerveggen kan det virke som om det er hurtigst uttørking ved en viss temperatur på utvendig side, og ikke når temperaturforskjellen er størst. Høy varmeledningsevne gir høy temperatur på utvendig side, og tilsvarende som for solstråling er uttørkingen best ved en gitt temperatur, og ikke størst temperaturforskjell. Ettersom nedre del av veggen grenser mot grunnen kan det tenkes at dette området er mer påvirket av grunnforholdene. Høy varmeledningsevne gir bedre uttørking under terrenget, dette er motsatt av over terrenget hvor lav varmekonduktivitet gir lavest RF- verdi. Største delen av væsketransporten i grunnen vil være kapillærtransport, ettersom RF i grunnen er så høy (Geving & Thue, 2002). Varmeledningsevne er vist at påvirker fukttransporten i grunnen (Janssen, et al., 2004). Dermed kan varmeledningsevnen til grunnen påvirke kapillærtransporten til grunnen. Ved lav varmeledningsevne i grunnen kan kapillærtransporten øke, og kjellerveggen får en høyere RF. Dersom varmeledningsevnen er høy, er kapillærtransporten lav og kjellerveggen får en lavere RF. Dette kan man se ved at lav varmeledningsevne vil ha en høyere RF enn høy varmeledningsevne.

De ulike kombinerte isolasjons- og forskalingssystemene som har fått SINTEF Teknisk Godkjenning anbefaler en oppbygging av sitt system. Dersom det er montert en innvendig påføring anbefales det å montere en dampsperre på innvendig side (SINTEF Certification, 2018c). I konstruksjonen som er simulert i denne masteroppgaven vil damptrykkgradienten være innoverrettet i visse perioder og en god del betongfukt vil diffundere mot innvendig side. Montering av dampsperre på innvendig side mellom EPS og påføring ville være en uheldig løsning ettersom betongfukten er avhengig av å tørke ut mot innvendig side. En dampsperre på innvendig side vil øke risikoen for eventuelle skader (SINTEF Byggforsk, 2006). Bunnsvillen er plassert rett ved kuldebroen mellom dekke og veggen, og her vil det være en oppfukting av trevirke. RF i trevirke er >80 % gjennom hele simuleringen og det er store muligheter for råtedannelse i trevirke. Dersom det hadde vært montert en fuktsperre der bunnsvillen er i kontakt med betongen kunne oppfuktingen i materiale vært unngått. Det kunne også blitt montert en kuldebrobryter av 20 mm EPS mellom dekke og veggen for å hindre at fukt diffunderer mot dette område (Geving & Thue, 2002).

5.3 Anbefalinger for hygrotermiske beregninger av yttervegg mot grunn

Ved å benytte 2- stegs metoden kan utvendige grensebetingelser under bakken beregnes først og deretter benyttes i en hygrotermisk simulering av kjellerveggen. Oppgaven viser at de to ulike varmekonduktivitetene som er simulert gir liten forskjell i risikoen for fuktskader på kjellerveggen. Sol gir den største forskjellen på uttørkingsforløpet og det vil være konservativt dersom sol neglisjeres i fremtidige beregninger. Dersom det er prosjektert en veldig fuktsensitiv kjellervegg, med f.eks. høyt fukttilskudd på innvendig side eller mye isolasjon på innvendig side, bør grunnforholdene vurderes mer nøyaktig. Ettersom konstruksjon er mindre fuktsikker og risikoen for fuktskader kan øke ved små endringer på utvendige forhold. Dersom veggen er fuktsikker, kan det være tilstrekkelig med en konservativ løsning hvor det dimensjoneres for høy og lav varmeledningsevne i jorden.

6 Konklusjon

Oppgavens formål var å undersøke hvordan uttørkingsforløpet til en yttervegg mot terreng kan simuleres og finne ut hvordan to utvendige forhold, solstråling og jordens varmeledningsevne påvirket veggens uttørkingsforløp. Samt gi anbefalinger til fremtidige hygrotermiske simuleringer av yttervegger mot terreng.

For å kunne undersøke uttørkingsforløpet for en yttervegg mot terreng anbefales det å ta i bruk programvaren WUFI2D. Beregningsoppsettet bør være en 2- stegs metode. I steg 1 gjøres en varmestrømsberegning av hele konstruksjonen, inkludert grunn på utvendig side. Når varmestrømsberegningen er gjennomført vil temperaturer langs kjellerkonstruksjonen undersøkes, og sammen med en konstant RF på 99 % lages det klimafiler. Klimafilene representerer endrede utvendige påkjenninger langs kjellerkonstruksjonen. Klimafilene benyttes i en fuktsimulering og fungerer som konstruksjonens utvendige klima under terreng. I steg 2 gjennomføres en fuktsimulering som kun inkluderer kjellerkonstruksjonen. Klimafilene fra varmestrømsberegningen er inkludert i denne beregningen og erstatter grunnen. Uttørkingsforløpet til en kjellervegg undersøkes ved å måle RF i ulike punkter i veggen.

Kjellervegger som er støpt i et kombinert isolasjons- og forskalingssystem har mye byggfukt som må diffundere ut av veggen og gjennom isolasjonen. Materialene som er i kontakt med betongen vil bli kraftig oppfuktet og betongfukten diffunderer mot innvendig og utvendig side. På innvendig side oppstår det skadelig fuktnivå på bunnsvillen og det vil være fare for muggvekst. Solforhold vil være parameteren som påvirker uttørkingsforløpet til kjellerveggen i størst grad. Uttørkingshastigheten øker betraktelig og veggen får en lavere RF dersom sol inkluderes i beregningene, særlig over terrenget. Solstråling vil over terrenget føre til en innadrettet damptrykkgradient i visse perioder. I nedre del av veggen vil påvirkningen av solstråling være mindre, men også her gir solstråling lavest RF i de fleste sjiktene i veggen. Damptrykkgradienten vil i nedre del av veggen peke mot utvendig side og ettersom solstråling gir lavest RF i dette sjiktet tyder det på at diffusjonen er størst ved en viss temperatur og ikke ved størst temperaturforskjell mellom innvendig og utvendig side. Jordens varmeledningsevne påvirker uttørkingsforløpet i mindre grad enn solforhold. I øvre del av kjellerveggen vil det være lav varmeledningsevne som gir den tørreste veggen med lavest RF- verdi. Den lave varmeledningsevnen gjør at temperaturen på utvendig side blir lavere og fukten diffunderer mot kuldebroen mellom dekke og veggen. I nedre del av veggen vil uttørkingsforløpet bli mer påvirket av varmeledningsevnen til grunnen. Her er det i motsetning til over terreng, høy varmeledningsevne som gir lavest RF- verdi. Varmeledningsevnen vil påvirke kapillærtransporten i grunnen, og ved høy varmeledningsevne vil kapillærtransporten være lav. Dette gir en vegg med lavere RF.

For å håndtere kompleksiteten ved hygrotermiske beregninger av yttervegger mot terreng vil 2- stegs metoden være en god tilnærming. På denne måten kan hygrotermiske beregninger av yttervegger mot terrenget utføres i WUFI2D, selv om programmet har problemer med fuktsimulering av jord med et høyt fuktinnhold. Simuleringene i denne oppgaven har vist at det vil være konservativt og ikke inkludere solstråling i beregninger av de utvendige grensebetingelsene til yttervegger mot terreng. Dette er fordi effekten av solstråling har i store deler av veggen ført til en lavere RF. Over terrenget har solstråling gitt en kraftig innadrettet damptrykkgradient. Solforhold bør inkluderes i hygrotermiske

beregninger ettersom solstråling er vist å ha en påvirkning på veggens uttørkingsoppførsel. Forskjellene i uttørkingsforløpet til veggen mellom de ulike varmeledningsevnene er små. Dersom veggen er fuktsikker, vil det være tilstrekkelig å utføre en hygrotermisk beregning hvor grunnen har konservativ varmeledningsevne. Varmeledningsevnen er vist å ikke påvirke veggens uttørkingsforløp i stor grad, og dersom konstruksjonen er fuktsikker vil ulik varmeledningsevne ikke føre til store endringer i konstruksjonens uttørkingsforløp. Dersom det skal dimensjoneres for en veldig fuktsensitiv vegg bør grunnforholdene undersøkes nøyere. En fuktsensitiv vegg vil bli mer påvirket av utvendige forhold, samtidig som risikoen for fuktskader vil være større. Da vil det ikke være tilstrekkelig med en konservativ løsning for varmeledningsevnen.

6.1 Videre arbeid

Det kan være interessant å undersøke om resultatene som er funnet i denne oppgaven vil gjelde for konstruksjoner med mer isolasjon på utvendig/innvendig side. Påvirkningen dampsperre har på innvendig side vil også være en interessant problemstilling ettersom dette er anbefalt av flere leverandører av kombinerte isolasjons- og forskalingssystemer. Hvordan ulike fukttilskudd på innvendig side påvirker retningen på damptrykkgradienten og uttørkingen av veggen ville og vært interessant og undersøkt nærmere.

Det vil også være interessant å sammenligne resultatene fra en simulering i WUFI som benytter en 2- stegs metode med et mer komplisert simuleringsverktøy hvor grunn kan inkluderes i fuktsimuleringene. Dette vil gi en indikasjon på hvor god tilnærming 2- stegs metoden er for hygrotermiske simuleringer av yttervegger mot terreng.

7 Referanser

Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2017) *Håndbok 5 Trehus.* Oslo: SINTEF Byggforsk.

Geving, S. & Thue, J. V. (2002) *Fukt i bygninger.* Oslo: Norsk byggforskningsinstitutt.

Jackon (2018) *Liming av Jackon fibersementplater på EPS/XPS.* Tilgjengelig fra: https://www.jackon.no/assets/FileUploads/2018-06-Notat-Liming-av-fibersement.pdf (Hentet: 05 mai 2021).

Janssen, H., Carmeliet, J. & Hens, H. (2004) The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground*, Building and Environment*, 39, s. 825-836.

Künzel, H. M. (1995) *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components- One- and two-dimensional calculations using simple parameters.* Doktorgrad. Fraunhofer IBP. Tilgjengelig fra: https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%201995%20-%20Simultaneous%20Heat%20and%20Moisture%20Transport.pdf (Hentet: 09 juni 2021)

Lisø, K. R., Kvande, T. & Thue, J. V. (2006) Learning from experience- an analysis of process induced building defects in Norway, *Research in Building Physics and Building Engineering,* s. 425-432.

Lund, S. D. (2017) *Fuktsikre bygningsdeler mot terreng.* Masteroppgave. NTNU.

Martinsen, E. (2010) *Utbedring av fuktskadede kjellerytterveggер.* Masteroppgave. NTNU.

Norges Geologiske Undersøkelse (2015) *Grunnvarme.* Tilgjengelig fra: https://www.ngu.no/emne/grunnvarme (Hentet: 10. juni 2021)

Pallin, S. & Kehrer, M. (2012) Hygrothermal simulations of foundations: Part 1: Soil material properties. *Journal Of Building Physics*, 37(2), s. 130-152. Tilgjengelig fra: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1744259112467526 (Hentet: 02 februar 2021)

SINTEF Byggforsk (2006a) *520.029 Herdetiltak for betongkonstruksjoner.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/287/herdetiltak_for_betongkonstruksjoner# (Hentet: 09 juni 2021).

SINTEF Byggforsk (2006b) *727.121 Fukt i kjellere. Årsaker og utbedring.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/698/fukt_i_kjellere_aarsaker_og_utbedring (Hentet: 05 juni 2021).

SINTEF Byggforsk (2015) *523.111 Yttervegger mot terreng. Varmeisolering og tetting.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3304/523111_yttervegger_mot_terreng_varmeisolering_og_tetting#fig4b (Hentet: 18 februar 2021).

SINTEF Byggforsk (2018a) *421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag (Hentet: 15 mai 2021).

SINTEF Byggforsk (2018b) *520.706 Sikring mot radon ved nybygging.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/326/sikring_mot_radon_ved_nybygging# (Hentet: 01 mai 2021).

SINTEF Byggforsk (2020) *514.221 Fuktsikring av konstruksjoner mot grunnen.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/248/utvendig_fuktsikring_av_bygninger (Hentet: 04 april 2021).

SINTEF Byggforsk (2021) *474.533 Uttørking og forebygging av byggfukt.* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/227/byggfukt_uttoerking_og_forebyggende_tiltak?gclid=Cj0KCQjwweyFBhDvARIsAA67M725VvGdN71fbwcemyKLCPDDWLZiUtMlcP4XjgPVv-UZq7IeDgY_qjUaAo_nEALw_wcB_(Hentet: 23 mai 2021).

SINTEF Certification (2016) T*eknisk Godkjenning Thermomur.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/150 (Hentet: 28 april 2021).

SINTEF Certification (2018a) *Teknisk Godkjenning KOMPAKTMUR TEK 17.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/2217 (Hentet: 08 april 2021).

SINTEF Certification (2018b) *Teknisk Godkjenning Vartdal Veggsystem.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/2122 (Hentet: 04 mai 2021).

SINTEF Certification (2018c) *Teknisk Godkjenning BEWI Byggesystem.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/1314 (Hentet: 24 april 2021).

SINTEF Certification (2018d) *Teknisk Godkjenning System Platon Xtra fuktsperre.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/251 (Hentet: 14 mai 2021).

SINTEF Certification (2018e) *Teknisk Godkjenning Jackon Radon Barrier B.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/9052 (Hentet: 02 mai 2021).

SINTEF Certification (2019a) *Teknisk Godkjenning Sundolitt Kub veggsystem.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/209 (Hentet: 01 mai 2021).

SINTEF Certification (2019b) *Teknisk Godkjenning Nordic Grunnmurssystem.* Tilgjengelig fra: https://www.sintefcertification.no/Product/Index/118 (Hentet: 05 april 2021).

Standard Norge (2007) *NS-EN 15026 Bygningskomponenter og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper- Bedømmelse av fukttransport ved numerisk simulering.* Tilgjengelig fra: https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=271232 (Hentet: 02 mars 2021).

Standard Norge (2012) *NS-EN 13788 Bygningskomponenter og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper- Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom- Beregningsmetoder.* Tilgjengelig fra: https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=626361 (Hentet: 10 mars 2021).

Standard Norge (2017a) *NS-EN 13370 Bygningers termiske egenskaper- Varmeoverføring via grunnen- Beregningsmetoder.* Tilgjengelig fra: https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=941553 (Hentet: 21 mars 2021).

Standard Norge (2017b) *NS-EN 10211 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner- Varmestrømmer og overflatetemperaturer- Detaljerte beregninger.* Tilgjengelig fra: https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=941552 (Hentet: 07 april 2021).

TEK17 (2017a) *13-10 Fukt fra grunnen.* Tilgjengelig fra: https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/13/vi/13-10/ (Hentet: 15 februar 2021).

TEK17 (2017b) *11-9 Materialer og produkters egenskaper ved brann.* Tilgjengelig fra: https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/11/iii/11-9/ (Hentet: 18 februar 2021).

TEK17 (2017c) *13-13 Fukt fra inneluft.* Tilgjengelig fra: https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/13/vi/13-13/ (Hentet: 08 juni 2021).

TEK17 (2017d) *13-14 Byggfukt.* Tilgjengelig fra: https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/13/vi/13-14/ (Hentet: 04 mars 2021).

Thue, J. V. (2016) *Bygningsfysikk.* Trondheim: Fagbokforlaget.

USDA (2019) *ROSETTA model.* Tilgjengelig fra: https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/model/rosetta-model/#Abstract (Hentet: 03 mars 2021).

WUFI2D (2008) *Main page WUFI 2D.* Tilgjengelig fra: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Wufi_2D (Hentet: 06 februar 2020).

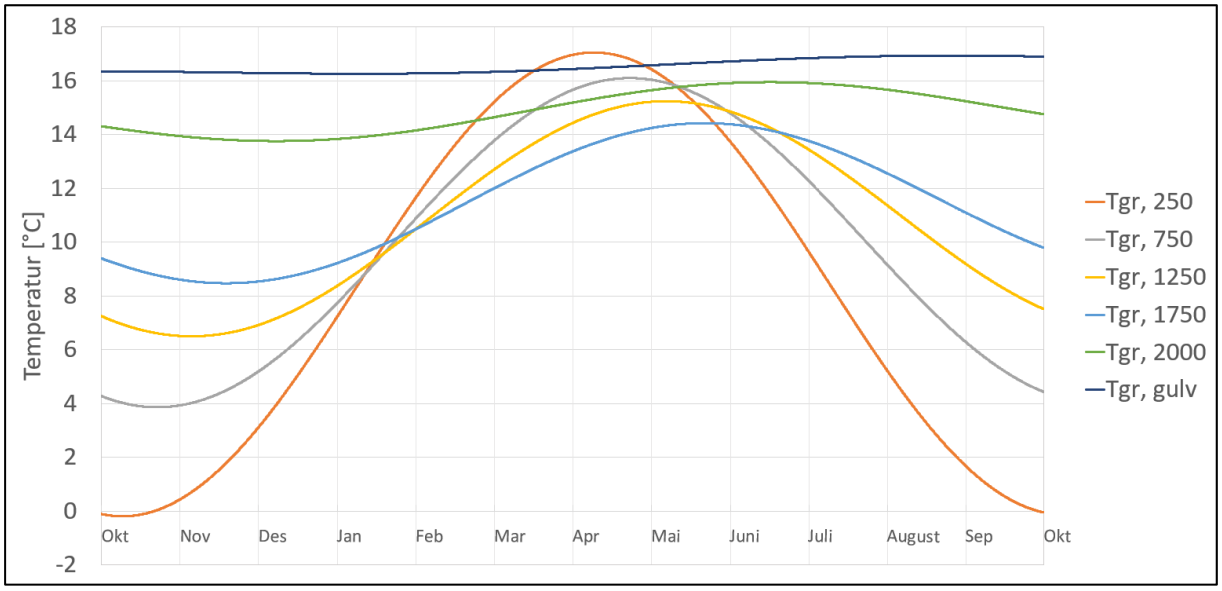
Vedlegg

Vedlegg A Innledende beregninger

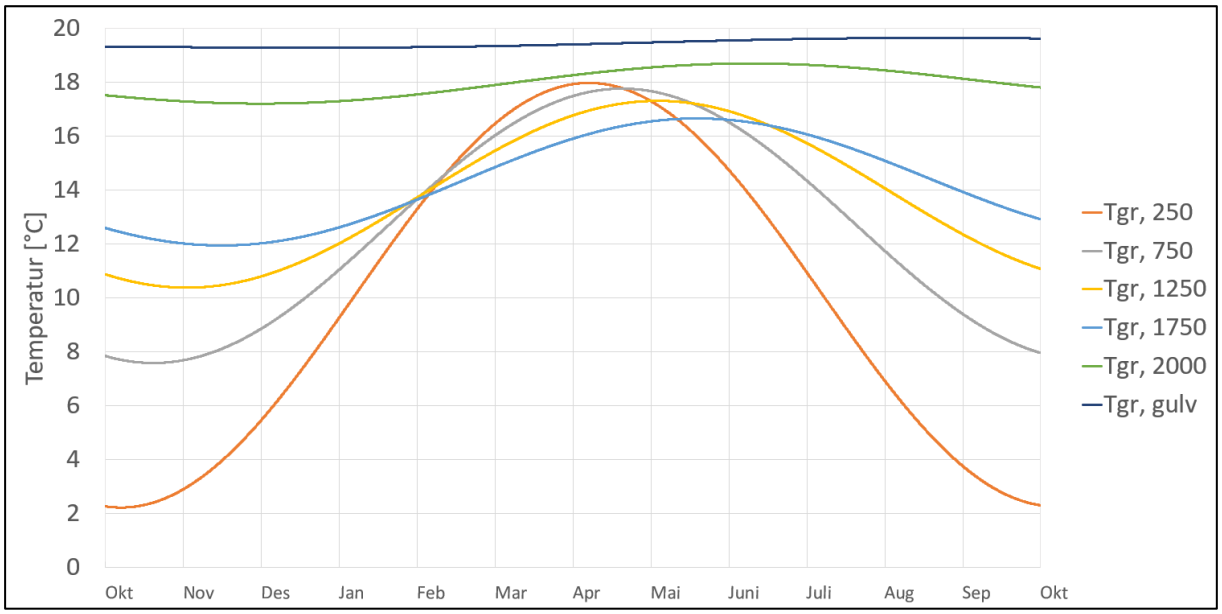
Vedlegg B Temperaturvariasjoner i ulike dybder langs kjellerveggen, benyttet til utvikling klimafiler

Vedlegg A: Innledende beregninger

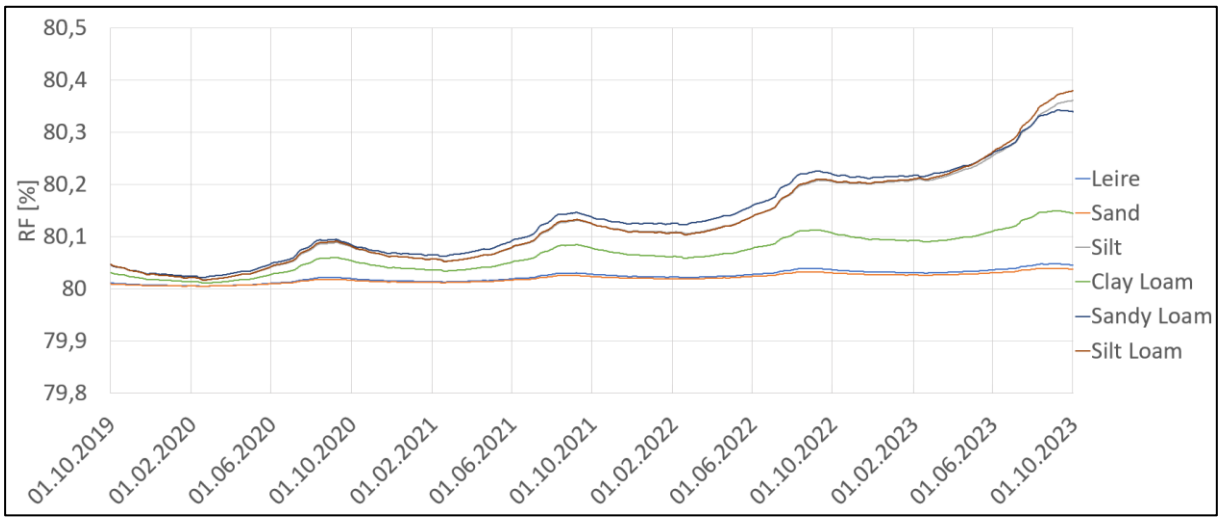
Undersøkelser av tidligere studier i beregningsprogrammet HEAT. Temperaturvariasjoner for jordtypen silt, i ulike seksjoner langs kjellervegg.



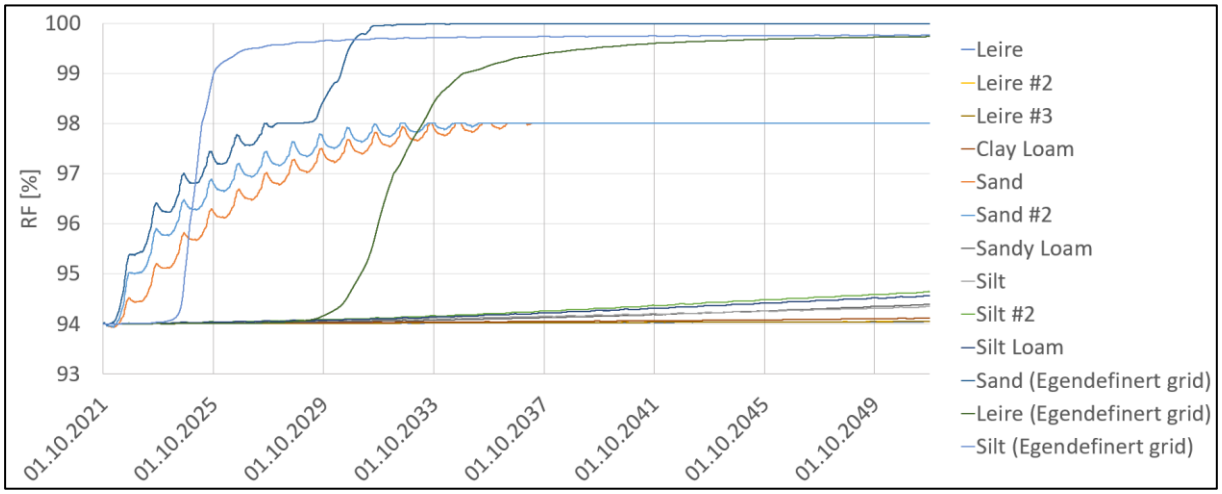
Undersøkelser av tidligere studier i beregningsprogrammet HEAT. Temperaturvariasjoner for jordtypen sand, i ulike seksjoner langs kjellervegg.



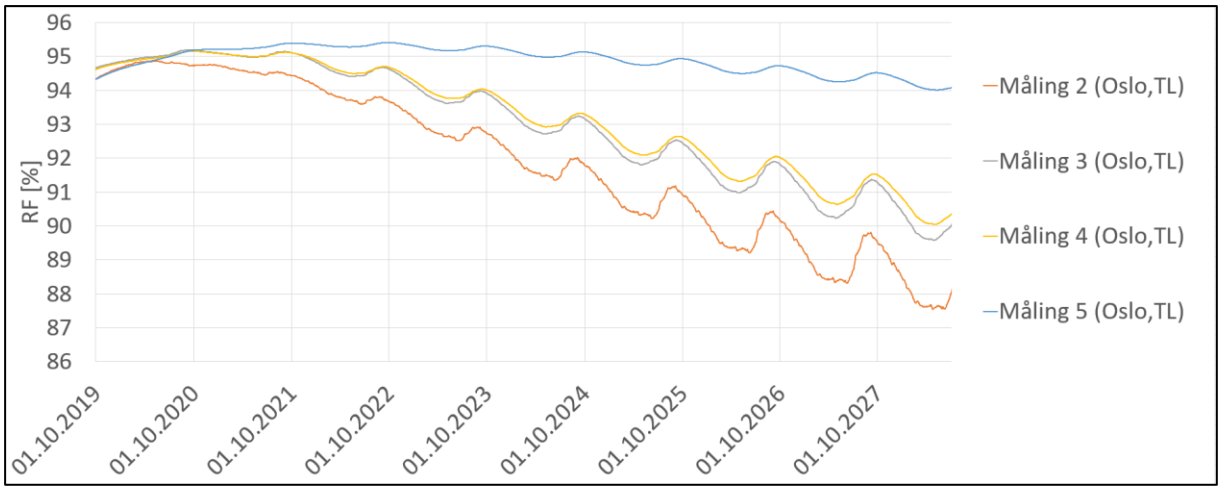
Variasjon i RF for 1D jordsøyle i WUFI2D for ulike jordtyper, beregning i 4 år



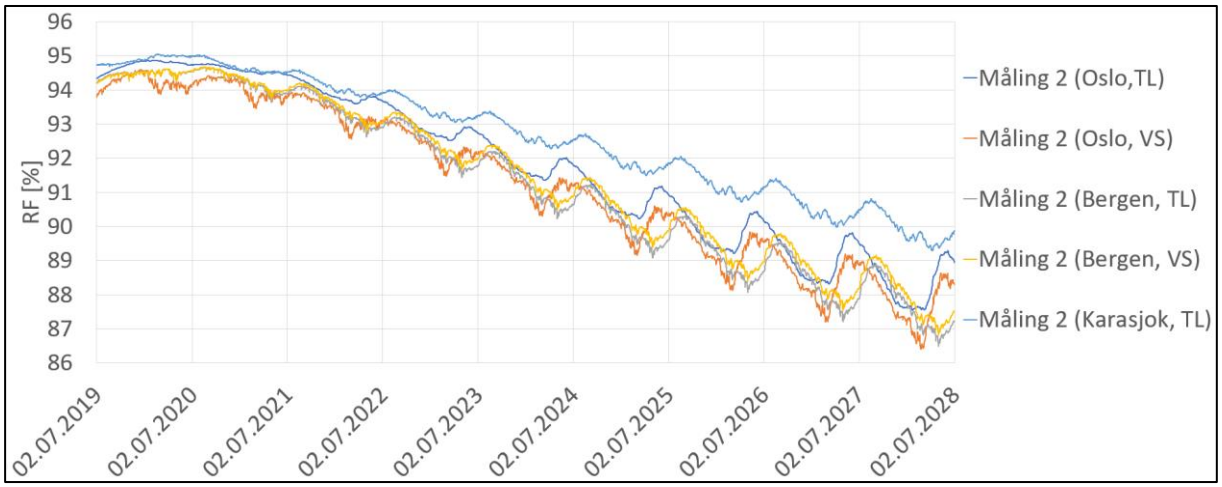
Variasjon i RF for 1D jordsøyle i WUFI Pro for ulike jordtyper, beregning i 30 år



Uttørkingsforløp for Oslo i 4 forskjellige dybder langs kjellerveggen. Grunnen på utvendig side har lav varmeledningsevne, simulert i 9 år

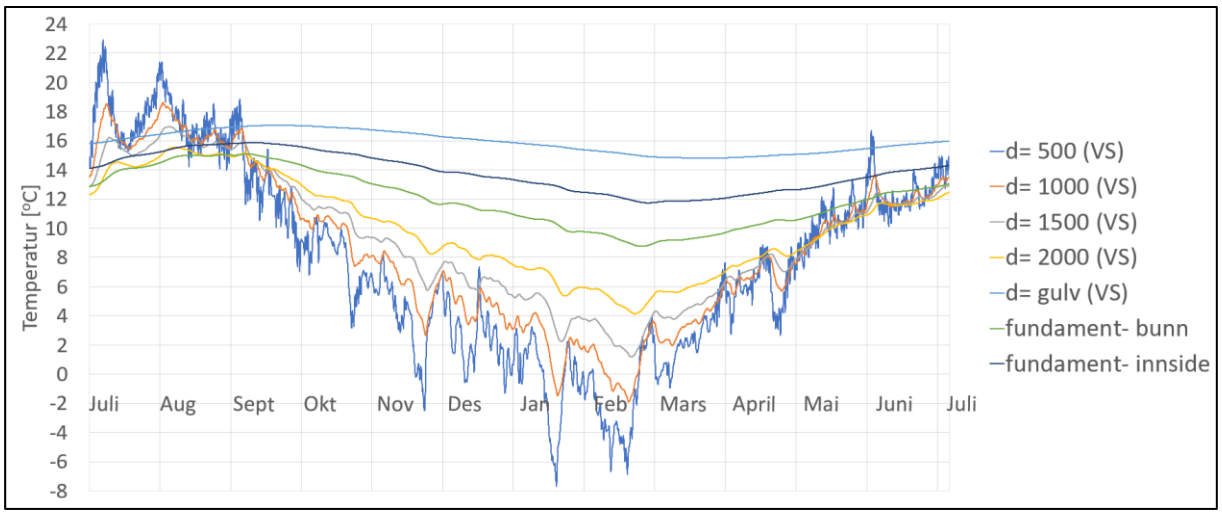


Uttørkingsforløpet for Oslo, Bergen og Karasjok. Grunnen på utvendig side har høy og lav varmeledningsevne utenom simuleringen av Karasjok, simulert i 9 år

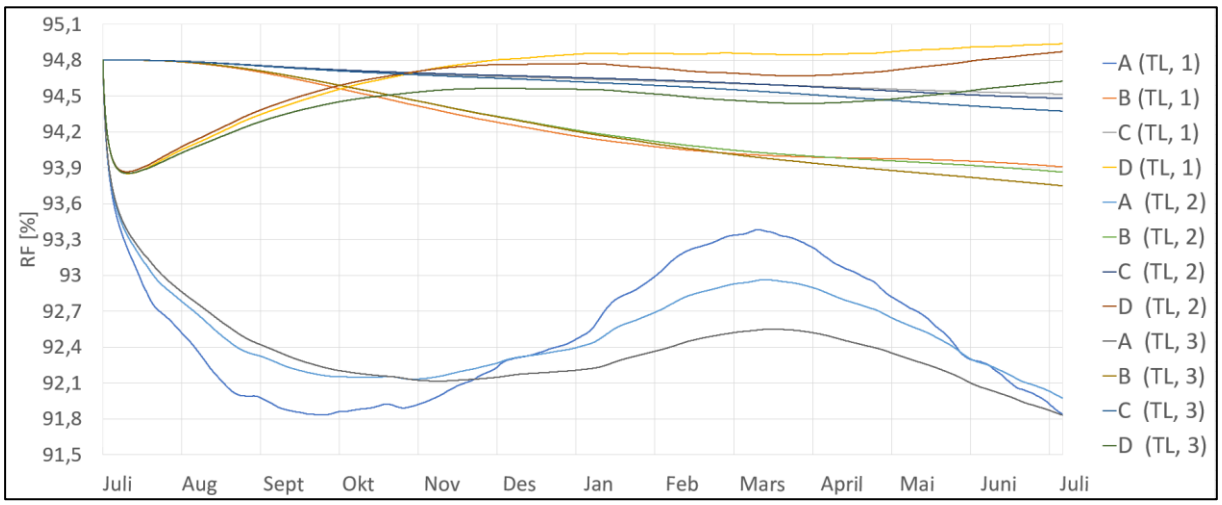


Temperaturprofil langs kjellerveggen for lav varmeledningsevne i grunnen, dimensjonert for baderom på innvendig side

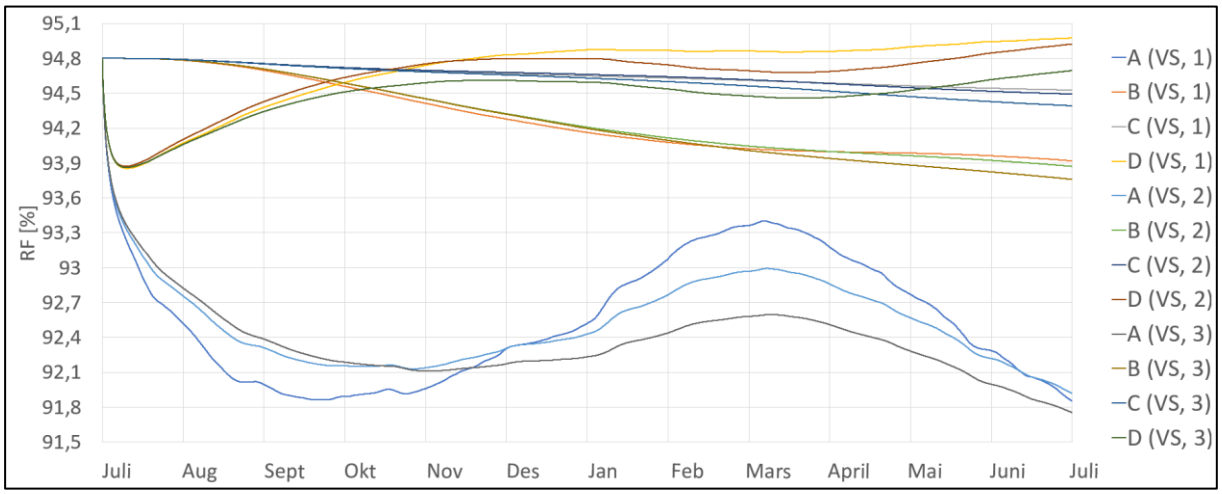
Temperaturprofil langs kjellerveggen for høy varmeledningsevne i grunnen, dimensjonert for baderom på innvendig side



Fukttransport i 3 forskjellige dybder under terreng, målt i 4 punkter innover veggen. Dimensjonert for baderom på innvendig side, grunn på utvendig side har lav varmekonduktivitet

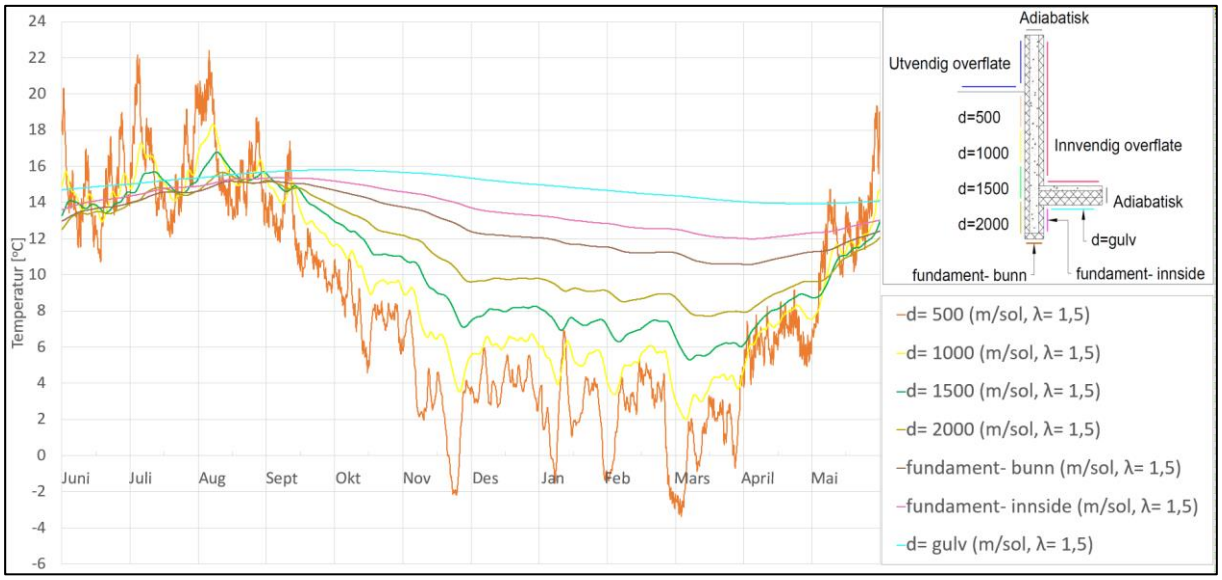


Fukttransport i 3 forskjellige dybder under terreng, målt i 4 punkter innover veggen. Dimensjonert for baderom på innvendig side, grunn på utvendig side har høy varmekonduktivitet

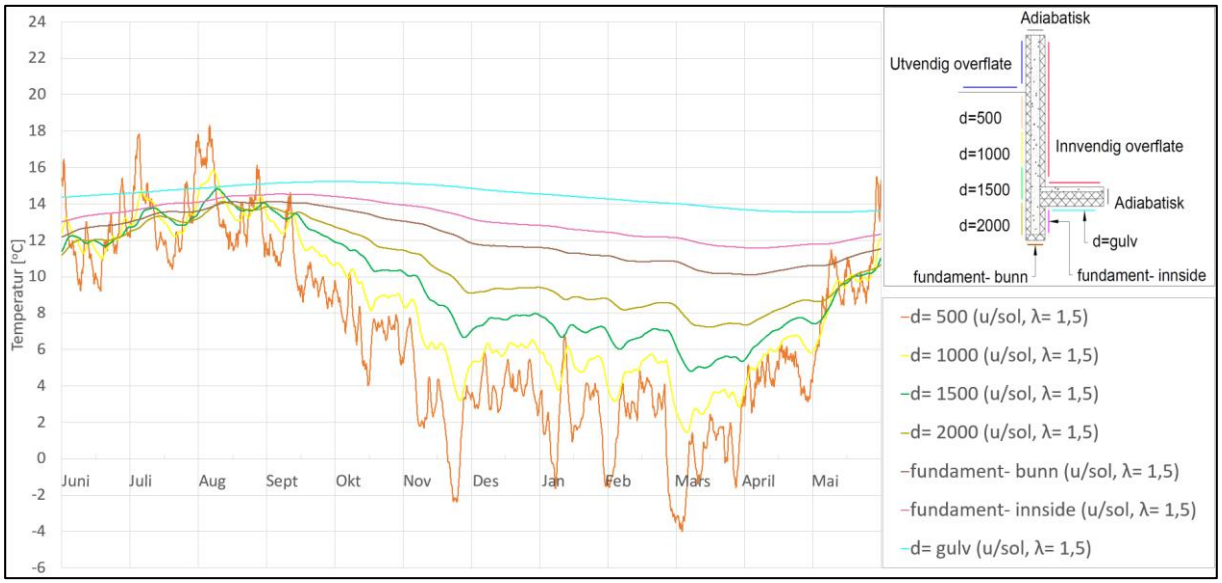


Vedlegg B: Temperaturvariasjoner i ulike dybder langs kjellerveggen, benyttet til utvikling klimafiler

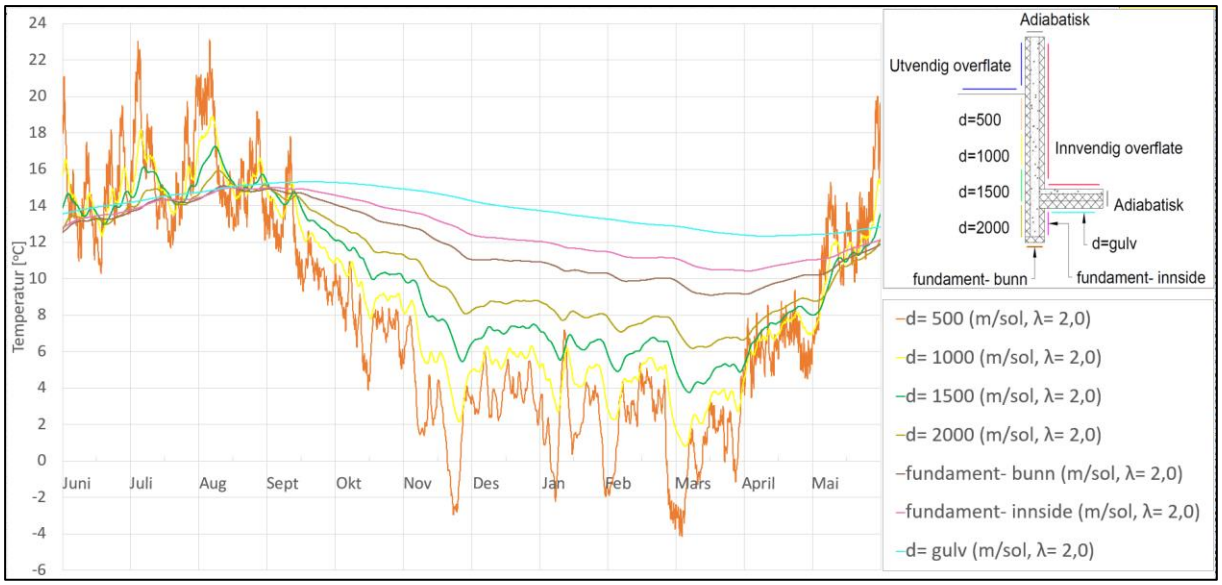
Temperaturvariasjon i ulike sjikt langs kjellerveggen, for varianten:
m/sol og λ= 1,5 W/mK



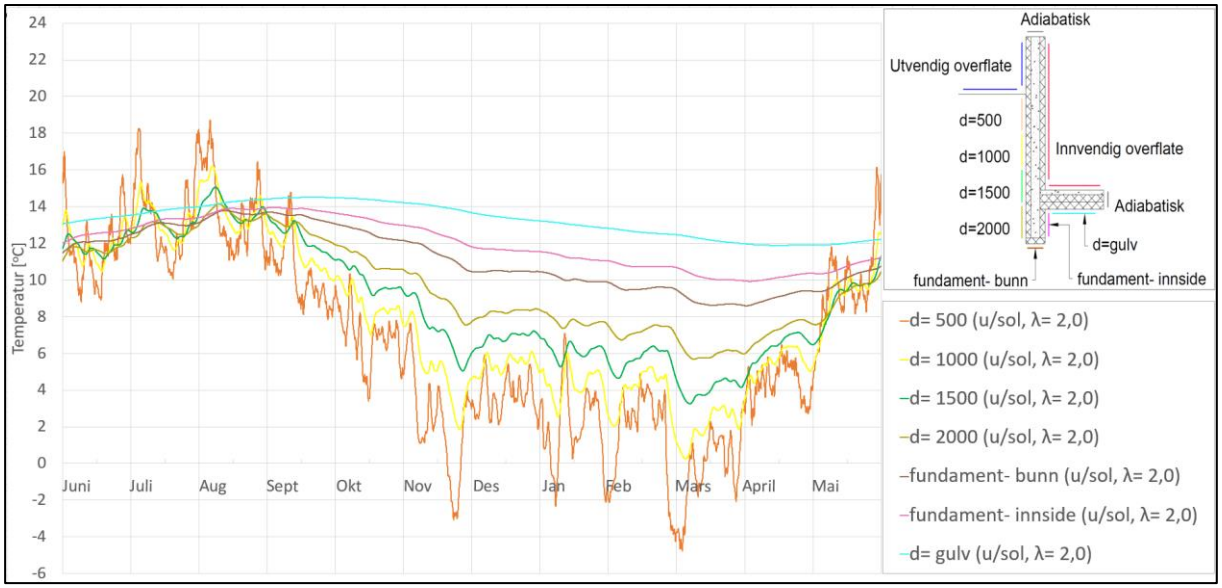
Temperaturvariasjon i ulike sjikt langs kjellerveggen, for varianten:
u/sol og λ= 1,5 W/mK



Temperaturvariasjon i ulike sjikt langs kjellerveggen, for varianten:
m/sol og λ= 2,0 W/mK



Temperaturvariasjon i ulike sjikt langs kjellerveggen, for varianten:
u/sol og λ= 2,0 W/mK



NTNU

Kunnskap for en bedre verden