

Frida Kristin Ulla og Ingrid Astrup

## VIP og aerogel - En mulighetsstudie

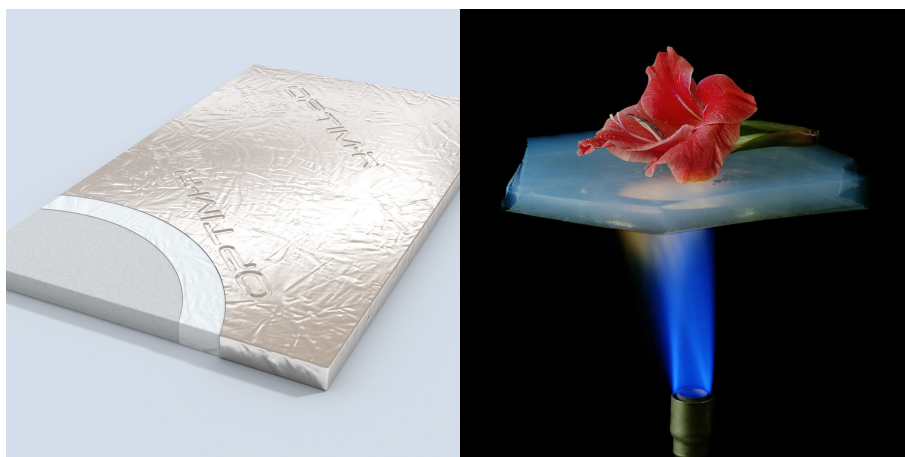
## VIP and Aerogel - A Feasibility Study

Prosjektnr.: 2019-21

Bacheloroppgave i ingeniørfag bygg

Veileder: Laurina C. Felius, Bjørn Gunnar Foss, Ferry Smits

Mai 2019



VIP [Illustrasjon: Kingspan] og aerogel [Illustrasjon: Wikipedia/offentlig eiendom]





Frida Kristin Ulla og Ingrid Astrup

## **VIP og aerogel - En mulighetsstudie**

## **VIP and Aerogel - A Feasibility Study**

Prosjektnr.: 2019-21

Bacheloroppgave i ingeniørfag bygg

Veileder: Laurina C. Felius, Bjørn Gunnar Foss, Ferry Smits

Mai 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk



Norwegian University of  
Science and Technology



# RAPPORT

**Tittel/Title:**

VIP og aerogel – En mulighetsstudie  
VIP and Aerogel – A Feasibility Study

**Intern veileder:**

Laurina C. Felius

**Ekstern veileder:**

Bjørn Gunnar Foss  
Ferry Smits

**Prosjektnr.:**

2019-21

**Gradering:**

ÅPEN

**Rapporten består av følgende del-rapporter:**

En rapport med 8 vedlegg

**Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål:**

Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Rambøll og omhandler isolasjonsmaterialene vakuumisolasjonspaneler (VIP) og aerogel i bygninger. VIP og aerogel er to isolasjonsmaterialer som har en termisk konduktivitet så lav som en tidel av konvensjonell isolasjon. Energikravene blir strengere og det fører til at isolasjonstykkelsene øker betydelig, noe som igjen resulterer i kraftigere konstruksjoner og kompliserte byggtekniske løsninger. På grunn av deres lave varmekonduktivitet har materialene muligheten til å gjøre konstruksjoner slankere og redusere materialforbruk.

Gjennom et litteraturstudium skal potensialet til isolasjonsmaterialene kartlegges og vurderes. Dette gjøres ved å studere tidligere skrevne forskningsartikler angående materialene og samle sammen informasjonen. Målet blir å finne ut hvilke bruksområder de egner seg best til.

Det skal også gjennomføres en analysedel med dataprogrammet WUFI® der tre ulike terrassekonstruksjoner vurderes. Analysen inkluderer to konstruksjoner med VIP og en med aerogel. Målet med analysen er å finne ut hvordan fukt- og varme opptrer i en bygningsdel med materialene og om de kan egne seg i et nordisk klima.

Basert på både litteraturstudiet og analysen skal materialenes egnethet vurderes slik byggebransjen er i dag og deres potensiale videre for fremtiden.

**Stikkord:**

Vakuumisolasjonspaneler (VIP)  
Aerogel  
WUFI®  
Bruksområder  
Fukt- og varmetransport

**Keywords:**

Vacuum insulation panels (VIP)  
Aerogel  
WUFI®  
Areas of application  
Moisture and heat transport



# Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet som det avsluttende arbeidet på studieretningen Husbyggingsteknikk, ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk (IBM) ved NTNU i Trondheim. Gjennom arbeidet med bacheloroppgaven har vi fått ny kunnskap om to innkommende isolasjonsmaterialer i byggebransjen, vakuumisolasjonspaneler og aerogel. Oppgaven har gitt oss kjennskap til mulighetene og utfordringene ved bruken av materialene og har gitt større interesse innenfor fagområdet bygningsfysikk.

Vi ønsker å takke våre veiledere Bjørn Gunnar Foss og Ferry Smits fra Rambøll i Trondheim, som introduserte oss for temaet superisolasjon og har bidratt med nyttig kunnskap innenfor bygningsfysikken og hjelp til bruk av analyseprogrammet WUFI<sup>®</sup>. I løpet av prosjektet har vi fått mye erfaring innen fagområdet, som ingen av oss hadde i noen særlig grad før oppgavestart. Læringsutbyttet ved oppgaven har vært høy, noe begge setter stor pris på. Vi ønsker også å takke veileder Laurina C. Felius ved NTNU for god veiledning om oppgavestruktur og støtte under skriveprosessen.

Til slutt vil vi også takke venner, familie og kjærester for deres støtte under arbeidet. Denne perioden har vært spesielt innholds- og lærerik, og vi håper oppgaven er til nytte for den som leser.

Frida Kristin Ulla og Ingrid Astrup

Trondheim, 19. mai 2019.

---

Frida Kristin Ulla

---

Ingrid Astrup

# Sammendrag

I takt med den globale oppvarmingen og et økt fokus på klima og miljø utvikler byggebransjen nye normer og krav for energieffektiv utbygging. Kvantitet og kvalitet på materialer som benyttes i byggebransjen er vesentlige faktorer i denne utviklingen. Vakuumisolasjonspaneler (VIP) og aerogel er isolasjonsmaterialer som sammenliknet med konvensjonelle varianter har overlegne termiske egenskaper. Materialene er nye på markedet og det eksisterer et behov for å kartlegge hvilke fremtidige muligheter de har for bruk i bygninger samt hvor godt de eventuelt vil fungere.

VIP og aerogel er begge materialer med svært høy porøsitet. Dette, kombinert med porestørrelser i nanoskala, gir en lav termisk konduktivitet. VIP benytter seg i tillegg av vakuum i porene som opprettholdes av en damp- og lufttett folie. Dette reduserer konduktiviteten ytterligere, på bekostning av at ulike foliematerialer resulterer i større eller mindre kuldebroeffekter langs kantene av panelene. Mens VIP kun kommer i form av innkapslede paneler, opptrer aerogel i form av både paneler, matter og granulater.

Gjennom et større litteratursøk i eksisterende studier av materialene er en rekke forutsetninger for bruk og dernest aktuelle bruksområder avdekket. Aerogel, særlig i form av matter, er mer fleksible og brukervennlige enn VIP som har en rekke forutsetninger for bruk. Panelenes folie er skjør og kan ikke perforeres. Derfor må de legges med beskyttende lag på hver side. Panelene vil i vertikale konstruksjoner måtte innfestes med skinnesystemer, lekter, vinkler eller lim. At panelene ikke kan perforeres innebærer også at de ikke kan kuttes og tilpasses på byggeplass, slik at både enkle og kompliserte geometrier i bygningsdeler forutsetter ferdig utarbeidede planer for legging.

Superisolasjonen, i form av både VIP og aerogel, har til sammen et stort omfang bruksområder. På grunn av materialenes foreløpige høye pris kan en del av dem trekkes ut som mer aktuelle. Ved rehabilitering av eksisterende bygninger er det i mange tilfeller av både estetiske, praktiske og lovpålagte årsaker liten plass for etterisolering. Med superisolasjens opptil ti ganger bedre varmemotstand enn konvensjonelle materialer er den i mange av disse tilfellene ikke bare attraktiv, men også nødvendig. For nybygg vil i områder med høy boligmarkedsverdi det innsparte arealet som følge av reduserte isolasjonstykkelser raskt

kunne lønne seg.

Videre er det ved hjelp av det endimensjonale beregningsprogrammet WUFI<sup>®</sup> Pro gjort simuleringer for fukt- og varmetransport i tre ulike konstruksjonsvarianter. Konstruksjonene er kompakte tak, der to varianter implementerer VIP og en variant implementerer aerogel. Bakgrunnen for utførelsen av beregningene er et ønske om å undersøke hvorvidt superisolasjon vil fungere sett fra et bygningsfysisk perspektiv i en bygningsdel i et nordisk klima. Her utgjør faktorer som temperatur, vanninnhold og relativ fuktighet vurderingsgrunnlaget.

Resultatene av disse analysene viser at en oppsamling av fukt i noen tilfeller vil oppstå. Da VIP-en er damptett vil denne fukten kunne hindres i å trenge ut av konstruksjonen, og i verste fall akkumulere. Den mengden fukt som oppstår er derimot liten, og da alle materialene er uorganiske anses ikke vanninnholdet som problematisk. Spørsmålet vil derimot være om den eksisterende fukten vil akselerere superisolasjonens aldringsprosess, og dermed øke konduktiviteten i materialene. Tester in situ bør gjennomføres for å verifisere simuleringsresultatene, samt se hvordan konstruksjonen fungerer.

På bakgrunn av resultater avdekket i litteratursøket samt resultatene av simuleringene kan det konkluderes med at superisolasjon, i form av både VIP og aerogel, er materialer for fremtiden. Forbedringspotensiale ligger i materialenes foreløpig høye pris og det bør legges arbeid i å forbedre VIP-ens levetid.

## Summary

As global warming has increased the focus on climate and environment, the building industry is updating rules and regulations to ensure an energy efficient building mass. The quality and quantity of materials applied in buildings are relevant factors in providing more environmental friendly structural envelopes. Vacuum insulation panels (VIP) and aerogels are insulation materials that compared to conventional insulators exhibit superior thermal properties. The materials are new to the market and a need to chart their possibilities and applicability thereby exists.

VIPs and aerogels are materials with high porosity. This property, combined with pore sizes at nanoscale, gives a low thermal conductivity. VIPs do in addition apply vacuum to the pores which is maintained by an air and vapor tight encompassing foil. This reduces the thermal conductivity further, at the expense of occurring thermal bridges along the edges of the panels. While VIPs are only available as encapsulated panels, aerogels appear as both panels, blankets and granules.

Through an extensive literature review of existing studies on the materials a number of prerequisites for use as well as possible areas of application have been unearthed. Where aerogels, especially in the form of blankets, are more flexible as to usability the use of VIP require some considerations. The foil encompassing the panels is fragile and should not be perforated. Hence protecting layers on each side is necessary. In vertical constructions the panels must be fixed using railing systems, laths, angel brackets or adhesive. The fact that the panels can not be perforated mean that they can not be cut or adjusted at the building site. Plans carefully detailing the laying pattern of the panels is thereby required, both for simple and more complex structural geometries.

Super insulators, in the shape of both VIP and aerogel, will together be applicable in a wide range of construction types. Due to the current steep price of the materials some may appear as more attractive. In retrofitting existing buildings, due to both esthetical, practical and statutory reasons, there is often limited space for insulation. With super insulator's up to ten times better heat resistance the materials are in many cases not only attractive but also necessary. In areas with a high property market value the additional



space available thanks to reduced insulation thicknesses may quickly pay off.

Further, simulations of heat and moisture transport in three different construction varieties are done using the one-dimensional software WUFI<sup>®</sup> Pro. The compact roof construction includes two varieties implementing VIP and one variety implementing aerogel. The objective of the simulations is to determine whether super insulation can be functional in terms of building physics in a construction in a northern climate. Factors such as temperature, water content and relative humidity constitute the basis for assessment.

The results of the simulations show an occurrence of moisture in some of the cases. As the VIP is vapor tight this moisture is prevented from escaping the construction, and at worst accumulate. However, the amount of moisture that occurs is small and seeing that all the materials are inorganic the water content is not considered as problematic. The question is on the other hand whether the moisture that exists will accelerate the aging process of the super insulation. Tests in situ should be performed to address this issue, as well as to verify the simulation results and to consider the functionality of the construction.

Based on the results uncovered through the literature review and the results of the simulations the conclusion is that super insulation, in the shape of both VIP and aerogel, are materials for the future. Possible areas of improvement lie in the current steep price of the products, and work should be done to extend the lifetime of VIP.

# Innhold

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Summary</b>	<b>iv</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemstilling . . . . .	2
1.3 Målsetting . . . . .	2
<b>2 Metode</b>	<b>3</b>
<b>3 Teori</b>	<b>4</b>
3.1 Vakuumisolasjonspaneler . . . . .	4
3.1.1 Kjernen . . . . .	4
3.1.2 Folien . . . . .	6
3.1.3 Desiccants, getters og opacifiers . . . . .	7
3.1.4 Termiske egenskaper . . . . .	7
3.1.5 Montering og håndtering . . . . .	10
3.1.6 Levetid . . . . .	11
3.1.7 Brann . . . . .	12
3.2 Aerogel . . . . .	12
3.2.1 Fremstilling . . . . .	13
3.2.2 Fysiske egenskaper . . . . .	14
3.2.3 Termiske egenskaper . . . . .	15
3.2.4 Monolittisk, granulert og fibrøs aerogel . . . . .	15
3.2.5 HMS, montering og håndtering . . . . .	17
3.2.6 Brann . . . . .	18
3.3 Varmetransport og fuktmechanikk . . . . .	18
3.3.1 Generelt . . . . .	18
3.3.2 Mekanismer . . . . .	19

<b>4 Bruksområder</b>	<b>22</b>
4.1 Gulv . . . . .	23
4.2 Etterisolering av vegg . . . . .	24
4.2.1 Utvendig etterisolering av vegg . . . . .	24
4.2.2 Innvendig etterisolering av vegg . . . . .	28
4.3 Sandwichelementer . . . . .	31
4.4 Aerogel i murpuss . . . . .	31
4.5 Vinduer og glassfasader . . . . .	33
4.6 Dører . . . . .	36
4.7 Kuldebroer . . . . .	37
4.8 Tak . . . . .	38
4.8.1 Takterrasser . . . . .	39
4.8.2 Skråtak . . . . .	41
<b>5 Analyse</b>	<b>43</b>
5.1 Beregningsgrunnlag . . . . .	43
5.1.1 Klima . . . . .	43
5.1.2 Orientering . . . . .	44
5.1.3 Overflaters overgangskoeffisienter . . . . .	45
5.1.4 Startbetingelser . . . . .	45
5.1.5 Begrensninger . . . . .	46
5.2 Prinsipiell oppbygning . . . . .	46
5.3 Terrassekonstruksjon med VIP . . . . .	48
5.3.1 Terrassekonstruksjon med betongdekke . . . . .	48
5.3.2 Terrassekonstruksjon uten betongdekke . . . . .	50
5.3.3 Monitorposisjoner . . . . .	51
5.4 Terrassekonstruksjon med aerogel . . . . .	52
5.4.1 Monitorposisjoner . . . . .	53
<b>6 Resultater</b>	<b>54</b>
6.1 Kvalitetssikring . . . . .	54
6.2 Terrassekonstruksjon med VIP . . . . .	54
6.2.1 Vanninnhold . . . . .	54
6.2.2 Relativ fuktighet og duggpunkt . . . . .	56

6.3	Terrassekonstruksjon med aerogel . . . . .	60
6.3.1	Vanninnhold . . . . .	60
6.3.2	Relativ fuktighet og duggpunkt . . . . .	61
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>64</b>
7.1	Bruksområder med VIP og aerogel . . . . .	64
7.2	Terrassekonstruksjoner . . . . .	67
7.2.1	Terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke . . . . .	69
7.2.2	Terrassekonstruksjon med VIP uten betongdekke . . . . .	71
7.2.3	Terrassekonstruksjon med aerogel . . . . .	72
7.2.4	Innsparing av høyder i terrassekonstruksjonene . . . . .	73
7.3	Videre arbeid . . . . .	75
7.4	Andre fremtidige muligheter . . . . .	77
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>80</b>
	<b>Referanser</b>	<b>82</b>
	<b>Figurer</b>	<b>91</b>
	<b>Tabeller</b>	<b>95</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>96</b>

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

I 2018 kom IPCCs rapport *Global Warming of 1.5 °C* [1] med det dystre budskapet om at verden i dag står overfor en klimautfordring som hittil er uten sidestykke. Dersom verden ikke greier å begrense den globale oppvarmingen til 1,5 °C over førindustrielt nivå, forventes irreversible klimaendringer som vil ramme de mest sårbare hardest. Drastiske endringer må skje - og de må skje raskt. Byggenæringen og bygninger, som per 2010 står for 40% av det totale energiforbruket i EU og er en sektor som stadig utvides [2], har et stort potensiale til å bidra med å nå 1,5-gradersmålet.

Parallelt med den negative klimautviklingen har energikravene i byggt teknisk forskrift blitt strengere og direktoratet for byggkvalitet, som forvalter forskriften, gjør store satsninger på energi og miljø. Hensikten er å redusere energiforbruket i den norske bygningsmassen. For å oppfylle dagens krav må isolasjonstykkelsene i bygningers klimaskall økes. Dette resulterer i kraftigere konstruksjoner som kompliserer arkitektoniske og byggt tekniske løsninger, opptar verdifullt bruksareal, øker material- og transportvolum, kostnader og utslipp.

Men nye teknologier og materialer er tilgjengelige, deriblant isolasjonsmaterialene aerogel og vakuumisolasjonspaneler. Disse har overlegne termiske egenskaper sammenliknet med tradisjonelle produkter som mineralull og plastisolasjon. Varmekonduktiviteten kan være så lav som en tidel av den til konvensjonelle varianter og gir dermed muligheter for slankere konstruksjoner og bedre løsninger i bygningsdetaljer [3]. Aerogel er også gjennomskinnelig og kan dermed plasseres i vinduer og glassflater for å øke varmemotstanden i det som er klimaskallets største svakhet.

Ettersom bruken av disse materialene er forholdsvis ny i bygningssammenheng, eksisterer det et behov for å samle informasjon om produktene og deres mulighet for anvendelse i diverse bygningskonstruksjoner. For å kunne optimalisere og opprettholde tette og godt isolerte bygg er det også nødvendig å forstå hvordan varme, luft og fukt opptrer i de forskjellige konstruksjonsdelene. Det blir dermed interessant å kunne undersøke hvordan disse bygningsfysiske prosessene utarter seg med bruk av aerogel og vakuumisolasjonspaneler i ulike bygningsdeler i et nordisk klima.

## 1.2 Problemstilling

Isolasjonsmaterialene vakuumisolasjonspaneler og aerogel sine muligheter i byggebransjen skal kartlegges ved å se på bruksområder som har størst potensiale på bakgrunn av materialenes egenskaper og dagens løsnings utfordringer. Det er også ønskelig å undersøke hvordan varme og fukt oppfører seg i en aktuell bygningsdel med materialene i et nordisk klima.

Det er valgt å dele opp problemstillingen i følgende spørsmål:

1. I hvilke byggtekniske løsninger har materialene størst potensiale?
2. Hvordan opptrer fukt og varme i konstruksjoner med materialene?
3. Egner de seg bedre enn konvensjonelle isolasjonsmaterialer sett i sammenheng med spørsmålene ovenfor?

## 1.3 Målsetting

Målet med denne oppgaven er å kunne skape forståelse for og informere om hvilke muligheter aerogel og vakuumisolasjonspaneler har i byggebransjen gjennom en kartlegging av aktuelle egenskaper og bruksområder. Ved hjelp av simuleringer er det også ønskelig å oppnå bedre forståelse for hvordan fukt og varme opptrer i ulike bygningsdeler som isolasjonsmaterialene inngår i, for slik å kunne vurdere materialenes egnethet i et nordisk klima. De samlede resultatene vil danne grunnlaget for å kunne gjøre en vurdering på om aerogel og vakuumisolasjonspaneler vil være aktuelle isolasjonsmaterialer for fremtiden.

## 2 Metode

I arbeidet med å undersøke oppgavens problemstilling er flere metoder benyttet. En stor del baserer seg på litteraturstudier. Litteraturen inkluderer både forskningsartikler, prosjektrapporter og fagstoff. Disse er anvendt for å skaffe informasjon om og forståelse for oppbygging og egenskaper til aerogel og vakuumisolasjonspaneler. Litteraturen er hentet fra både inn- og utland og er i all hovedsak publisert etter årtusenskiftet. Der informasjonen har vært utydelig eller usikker er det forsøkt å finne flere kilder som hevder det samme. Bruken av isolasjonsmaterialene i bygningssammenheng er imidlertid relativt ny og det er derfor begrenset med forskning og litteratur på området. Det som er benyttet er vurdert som pålitelig, da det kommer fra anerkjente forskere og institusjoner.

Litteraturen er også benyttet for å kartlegge bruksområder for materialene og for å finne relevante byggetekniske løsninger. Her er enkelte kilder produktmanualer og dokumentasjon supplert av leverandører av produkter. For å vurdere den hygrotermiske oppførselen i en bygningsdel i et nordisk klima analyseres tre ulike varianter av en terrassekonstruksjon. Det er laget snittegninger av løsningene i ARCHICAD fra Graphisoft for å kunne presentere informasjonen ryddig og enkelt. Analysen er utført i beregningsprogrammet WUFI<sup>®</sup> Pro fra Fraunhofer Institute of Building Physics. Programvaren utfører endimensjonale beregninger av fukt- og varmetransport i bygningsdeler i reelle klimaer, og beskrives nærmere senere. Resultatene i WUFI<sup>®</sup> er eksportert og fremstilt grafisk ved hjelp av Microsoft Excel.

## 3 Teori

### 3.1 Vakuumisolasjonspaneler

Vaakumisolasjonspaneler, forkortet VIP, er et forholdsvis nytt isolasjonsmateriale i byggebransjen. Panelene består av en porøs kjerne som har som funksjon å opprettholde vakuum og integritet. Folien som omslutter kjernen skal beskytte mot inntrengning av vann og gasser, samtidig som den fungerer som en mekanisk beskyttelse mot det atmosfæriske trykket og påkjenninger under transport og installasjon. I tillegg tilsettes mange VIP substanser som kalles *opacifiers*, *getters* og *desiccants*, for å forlenge deres levetid. Avhengig av materialet folien og kjernen består av, kan VIP i ny tilstand bestrebe en varmekonduktivitet en faktor 5-10 ganger lavere enn konvensjonell varmeisolasjon [3]. I Tabell 1 er noen nøkkelegenskaper for VIP som presenteres fortløpende i teksten samlet.

**Tabell 1:** Veiledende materialegenskaper for VIP.

Egenskap	Verdi
Termisk konduktivitet [W/(mK)]	0,006
Porøsitet [%]	> 90
Porediameter [nm]	30 - 100
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	150 - 220

#### 3.1.1 Kjernen

Størsteparten av VIP består av det som kan benevnes som kjernen, og det er denne som utgjør materialets isolerende del. Kjernematerialer som egner seg i VIP har åpne porestrukturer der porene er små. Den åpne strukturen er vesentlig da den gjør det mulig å evakuere luften fra porene for å skape vakuum. Strukturen må også være slik at elementet kan motstå det atmosfæriske trykket uten å kollapse. De små porene gir materialet lav termisk konduktivitet under høyere trykk enn det som ville vært mulig med større porer. Materialet må i tillegg være så lite permeabelt som mulig for infrarød stråling.

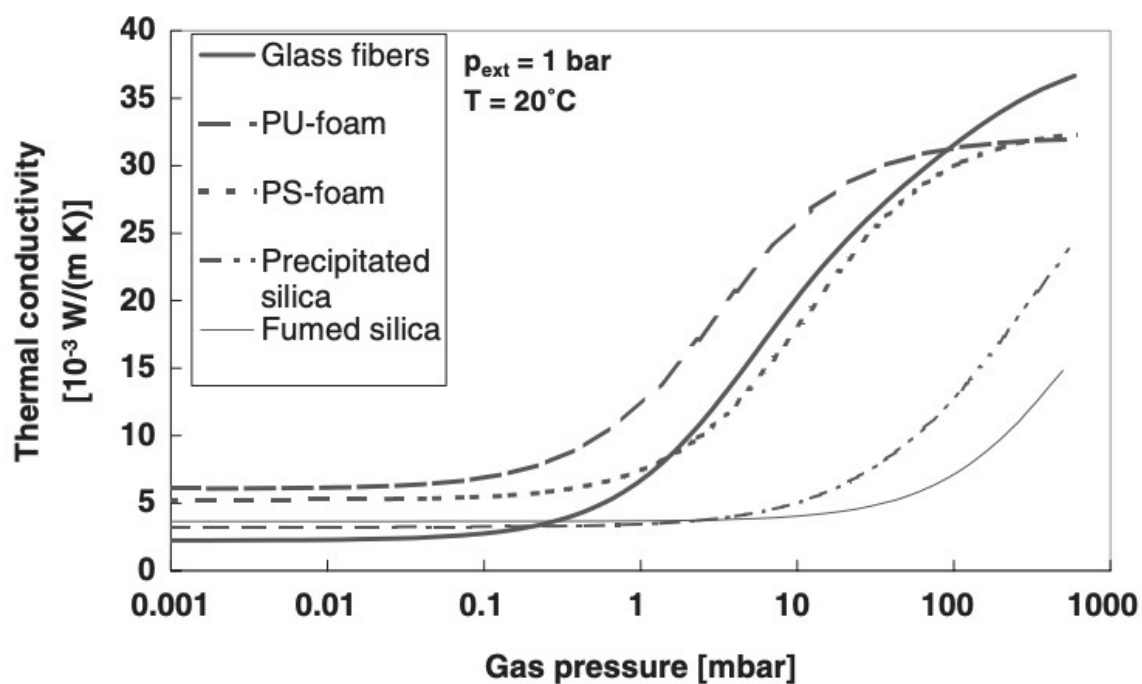
Kjernematerialer som i dag anvendes i VIP kan deles opp i tre kategorier: glassfiber, skum og pulver. Glassfiber har lav tetthet, er ubrennbar, motstandsdyktig mot korrosjon og kjemisk stabilt. Skum, som polystyren og polyuretan, er støtsikkert, lydabsorberende, billig og



enkelt å produsere. Av pulvere som benyttes kan blant annet *precipitated silica* og aerogel nevnes. Det mest utbredte kjernematerialet er imidlertid pulveret *fumed silica*, som er det materialet hovedfokuset i denne oppgaven vil ligge på videre.

Fumed silica er en ren form for silisiumdioksid som produseres ved at silisiumtetraklorid reagerer i en flamme av knallgass. Silisiumdioksidet danner et hvitt pulver som presses sammen til plateelementer for anvendelse i VIP. Som regel tilsettes også fibre for å styrke den strukturelle integriteten. De ferdig pressede panelene har en porøsitet på over 90% som gir materialet et stort spesifikt overflateareal. Porene er svært små, med en diameter som varierer mellom 30 og 100 nm [4].

De ovennevnte spesifikasjonene gjør at fumed silica kan bevare en termisk konduktivitet så lav som 0,006 W/(mK) ved 0,1 bar [5]. I Figur 1 er samtlige av de tidligere nevnte kjernematerialenes konduktivitet oppgitt som en funksjon av internt gasstrykk. Her synliggjøres også fumed silicas overlegne evner uten vakuum og ved 1 bar, som tilsvarer atmosfærisk trykk. Varmeledningsevnen er her nærmest halvert sammenliknet med tradisjonelle materialer.



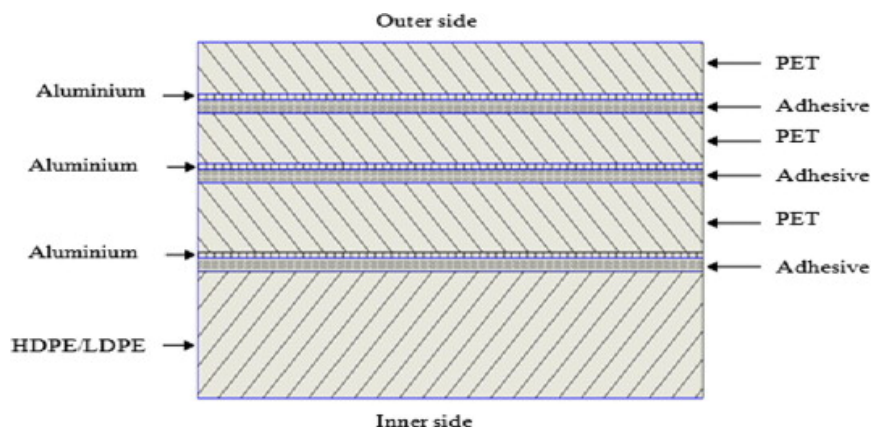
**Figur 1:** Spesifikk varmekonduktivitet som funksjon av indre gasstrykk for forskjellige isolasjonsmaterialer ved 20 °C og atmosfærisk trykk i omgivelsene [6].

### 3.1.2 Folien

VIP-ens kjerne må omsluttet av en folie, primært for å opprettholde vakuum. Materiale- ne som utgjør denne folien må ha lav permeabilitet for å forhindre diffusjon av gass og vanndamp inn i kjernen, som vil øke panelenes konduktivitet. Folien må i tillegg ha en lav varmeledningsevne for å minimere kuldebroer. Det er vanlig å dele opp folien i tre lag: et forseglende indre, en mellomliggende barriere og et ytre beskyttelseslag [7].

Det indre laget har som funksjon å forsegle kjernematerialet og å opprettholde vakuu- met. Det består som regel av polyetylen med lav eller høy tetthet, som er har særdeles lav gjen- nomtrengelighet for vann. Polyetylenfilmen forsegles rundt kjernen under press og ved høye temperaturer.

Den mellomliggende barrieren limes om det forseglende laget med polyuretan. Barrierens hovedoppgave er å hindre inntrengning av luft og vanndamp og den er derfor basert på aluminium i de fleste tilfeller. Aluminium har høy korrosjonsfasthet [8]. Enten benyt- tes et enkelt, tykt lag med aluminiumsfolie (AF) eller flere lag polymersubstrater som pådampes tynne aluminiumssjikt (MF). Substratene, som oftest polypropylen eller poly- tylentereftalat, limes sammen med polyuretan. Aluminiumens høye varmeledningsevne gir opphav til kuldebrotap i randsonene av elementene og MF er ofte å foretrekke ettersom den samlede tykkelsen på metallet blir vesentlig mindre. Figur 2 viser den totale oppbygningen av en folie med et MF-barrierelag.



**Figur 2:** Oppbygning av VIPs omhyllende folie med MF [7]. HDPE/LDPE betegner polyetylen med henholdsvis høy/lav densitet. PET betegner polyetylentereftalat (som er et polymer som brukes som substrat). Adhesive betegner polyuretanen som limer sammen lagene i folien.

Det ytre beskyttelseslaget skal gjøre hele elementet mer robust. VIP må tåle påkjenninger både fra miljøet og under transport og installasjon uten å ta skade. For tiden brukes mye polyetylentereftalat, som er billig i produksjon. I kombinasjon med MF-barrierelag fungerer det også som et substrat.

### 3.1.3 Desiccants, getters og opacifiers

Såkalte *desiccants* og *getters* er stoffer som plasseres i kjernen av VIP og som tilsettes for å forlenge levetiden på elementene. Dette gjør de ved å opprettholde produkttegenskapene til VIP-en, og de fungerer helt til de “fylles”. Desiccants består av materialer som absorberer vanndamp som trenger seg inn i panelene og øker det indre trykket og dermed varmeledningsevnen. For paneler av fumed silica er desiccants overflødig ettersom silisumoksid er et hygroskopisk materiale. Getters er materialer som absorberer gasser som trenger inn i kjernen og dermed opprettholder vakuemet.

*Opacifiers* tilsettes for å gjøre kjernematerialet ugjennomsiktig. Da vil varmestrålingstapet i materialet reduseres. Dette er særlig viktig for VIP med fumed silica, der varme-transporten gjennom konduktivitet er så lav at strålingsoverføringen vil ha en betydelig effekt på panelets totale varmeledningsevne [4].

### 3.1.4 Termiske egenskaper

Den termiske konduktiviteten  $[W/(mK)]$  beskriver et materiale sin evne til å lede varme. For en struktur som består av flere lag kan den totale motstanden mot varmeovergang finnes ved å summere de forskjellige lagenes tykkelse, dividert med deres respektive termiske konduktivitet. Denne summen betegnes som den termiske resistansen  $R [(m^2K)/W]$ . Den inverse verdien kalles gjerne U-verdi ( $U = 1/R$ ) og angir spesifikt varmetap per arealenhet og grad temperaturdifferens over strukturen  $[W/(m^2K)]$ .

Den totale varmekonduktiviteten til et materiale,  $\lambda_{tot} [W/(mK)]$ , kan med en standard, forenklet metode beskrives som en sum av flere bidrag [9]:

$$\lambda_{tot} = \lambda_{solid} + \lambda_{gas} + \lambda_{rad} + \lambda_{conv} + \lambda_{coup} \quad (1)$$

$\lambda_{solid}$  er konduktivitet gjennom faststoff,  $\lambda_{gas}$  er konduktivitet gjennom gass,  $\lambda_{rad}$  er over-

føring av strålingsenergi,  $\lambda_{\text{conv}}$  er varmeoverføring ved konveksjon,  $\lambda_{\text{coup}}$  er varmeoverføring som følge av interaksjonen mellom materialene i panelene (*coupling effect*).

Det er relevant å forsøke å minimere alle leddene i likning 1 slik at den totale varmelednings-  
evnen blir så liten som mulig. Hvert ledd påvirkes av en rekke faktorer, og sammenhengene  
mellom disse kan være svært komplekse. Vakuomet i isolasjonspanelene er en faktor som  
reduserer flere av konduktivitetsbidragene - både  $\lambda_{\text{gas}}$ ,  $\lambda_{\text{conv}}$  og  $\lambda_{\text{coup}}$ . Den mest stabile  
bidragsyteren, som det er vanskelig å endre på, er  $\lambda_{\text{solid}}$  [7]. Konduktiviteten i faststoff  
avhenger blant annet av tettheten på stoffet, der tettheten på fumed silica befinner seg i  
området 150 - 220 kg/m<sup>3</sup> [3].

Det som gjør VIP unikt er at vakuomet svært effektivt reduserer  $\lambda_{\text{gas}}$ . Denne verdien kan  
for fumed silica VIP også være avhengig av det som kalles Knudsen-effekten. Når varme  
overføres i gasser skjer det via kollisjoner mellom molekylene i gassen. Den avstanden mo-  
lekylene i gjennomsnitt beveger seg fritt før de kolliderer med hverandre kalles midlere fri  
veilengde. Når porene i et materiale som fumed silica blir mindre enn den midlere frie vei-  
lengden er sannsynligheten for at molekylene treffer poreveggen større enn sannsynligheten  
for å treffe et annet molekyl. Effekten blir redusert konduktivitet som beskrevet i likning 2  
og 3 [9, 10]:

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_0}{1 + 2\beta K_n} \quad (2)$$

der

$$K_n = \frac{\sigma_{\text{mean}}}{\delta} = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi d^2 p \delta} \quad (3)$$

$\lambda_0$  er den termiske konduktiviteten til luft ved atmosfærisk trykk,  $\beta$  er en koeffisient mel-  
lom 1,5 og 2 som karakteriserer effektiviteten i energioverføringen når molekylene kollide-  
rer med porevegger,  $K_n$  er det dimensjonsløse Knudsentallet,  $k_B$  er Boltzmanns konstant  
 $\approx 1,38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  er temperatur [K],  $d$  er diameter på gassmolekylene [m],  $p$  er gass-  
trykk i porene [Pa],  $\delta$  er karakteristisk porediameter [m].

Takket være denne effekten påvirkes fumed silica paneler vesentlig mindre enn andre isola-

sjonsmaterialer av trykkøkning som følge av punksjon eller annet i panelet, som ble illustrert i Figur 1.

$\lambda_{\text{rad}}$  er også en vesentlig faktor for fumed silica paneler. På grunn av vakuemet, som gjør at den termiske konduktiviteten allerede er svært lav, kan bidraget fra infrarød stråling bli relativt stort [4]. Strålingen emitteres fra materialene i panelene. Som tidligere nevnt tilsettes opacifiers for å minimere dette bidraget.

$\lambda_{\text{conv}}$  er en relativt liten bidragsyter når vakuemet i kjernen er opprettholdt. Ved punktering av folien vil derimot luft- og vanddamp kunne trenge inn og skape strømninger som følge av temperatur- og trykkforskjeller i panelet. Unngår man punktering vil det over tid allikevel oppstå inntrengning av fluider i VIP-kjernen og effekten må derfor tas med i betraktningen av den totale konduktiviteten på panelene gjennom hele levetiden.

$\lambda_{\text{coup}}$  er en effekt som teller for interaksjonen mellom materialene i panelene. Denne er svært komplisert og neglisjeres i de fleste teoretiske tilnærminger til VIPs termiske egenskaper [9].

Den ekvivalente konduktiviteten på VIP,  $\lambda_{\text{eff}}$ , vil derimot være høyere, på grunn av folien som forårsaker en kuldebroeffekt langs kantene av panelene. Dette kan beskrives som i likning 4 [3, 11].

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cop}} + \psi_{\text{edge}} \cdot d \cdot \frac{P}{A} \quad (4)$$

der  $\lambda_{\text{eff}}$  er ekvivalent varmekonduktivitet for hele panelet,  $\lambda_{\text{cop}}$  er konduktivitet for senterdelen av panelet,  $\psi_{\text{edge}}$  er lineær kuldebroverdi [W/(mK)],  $d$  [m] er tykkelsen på panelet og  $P$  [m] er omkretsen av arealet  $A$  [m<sup>2</sup>] til panelet.

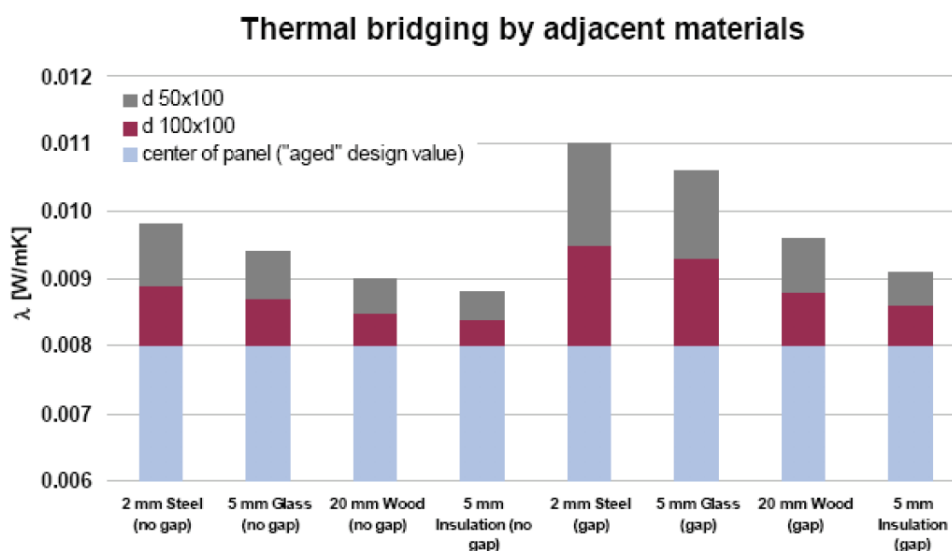
For å minimere effekten av kuldebroer bør panelene være så store og kvadratiske som mulig [12]. Det viser seg riktignok at det er viktigere å velge store paneler fremfor kvadratiske. Ved bruk av AF-folier er  $\psi_{\text{edge}}$ -verdier på 0,07 rapportert, mens ved bruk av MF-folier ligger  $\psi_{\text{edge}}$ -verdier på rundt 0,01 [13]. Sistnevnte er derfor å foretrekke fordi kuldebroeffekten er mindre.

Ved beregninger med VIP og i produktdokumentasjon benyttes en dimensjonerende ekvivalent varmekonduktivitet for hele panelet. Denne tar i tillegg til den ekvivalente konduktiviteten hensyn til aldring av panelet som følge av diffusjon av luft og vanndamp inn i panelets kjerne. Denne verdien ligger typisk rundt 0,008 W/(mK) [3].

### 3.1.5 Montering og håndtering

Når vakuumisolasjonspanelene ankommer byggeplass er det viktig å sikre at de holdes tørre. De bør også beskyttes mot overdreven varme. Det kan være en fordel å la panelene forbli liggende i pakken de leveres i, inntil de er klare for montering. Panelene må ikke tråkkes på og bør heller ikke mistes i bakken. Ellers er det viktig å følge anvisninger fra den aktuelle produsenten av panelene.

Flere av utfordringene med vakuumisolasjonspaneler er knyttet til folien som gir kuldebroer langs kantene av materialet. Denne effekten påvirkes av omkringliggende materialer i større grad enn hos konvensjonell isolasjon [3]. Avhengig av de tilstøtende konstruksjonenes varmeledningsevne vil kuldebroeffekten langs kantene av panelene påvirkes i mindre eller større grad, og gi panelene en høyere samlet varmekonduktivitet, som presentert i Figur 3.



**Figur 3:** Økning i vakuumpanelers totale varmeledningkoeffisient  $\lambda$  som følge av kuldebrovirkning fra tilstøtende materialer [14], der d angir dimensjonene på vakuumisolasjonspanelene.

Foliematerialet er i tillegg skjørt og vakuumisolasjonspaneler krever derfor mekanisk beskyttelse [12] da skade på folien vil resultere i redusert varmemotstand og levetid. I de fleste tilfeller innebærer dette å plassere VIP mellom beskyttende lag i konstruksjonen de skal anvendes i. Panelene bør i tillegg bygges inn så raskt så mulig for å unngå unødvendig oppfukting.

Folien rundt panelene kan ikke perforeres da dette vil ødelegge de termiske egenskapene til panelene. Dette innebærer utfordringer med innfestning av panelene i vertikale konstruksjoner. Elementene kan heller ikke kuttes og tilpasses på byggeplass og nøyaktige planer på hvordan panelene skal legges må derfor være utarbeidet før montering. De bør plasseres slik at det er mulig å inspisere om de fungerer som de skal, eksempelvis med termografering. Det kan også være en fordel å sørge for at panelene er lett tilgjengelige for utskiftning.

### 3.1.6 Levetid

Levetiden til vakuumisolasjonspaneler er en av de store utfordringene med bruken av dem i bygninger. I ny tilstand har VIP-ene som regel en konduktivitet på  $0,004 \text{ W}/(\text{mK})$ , mens verdiene typisk har steget til  $0,008 \text{ W}/(\text{mK})$  etter 25 år [3, 15]. Avhengig av foliematerialets effektivitet vil konduktiviteten etter 50 og 100 år stige ytterligere.

Gasstrykket og fuktforhold inne i panelene er styrende faktorer for levetiden. Mengden gass og vanndamp som trenger inn i panelene styres av foliematerialenes egenskaper samt ytre klimapåkjenninger, og vil være avgjørende for hvor lenge panelene opprettholder kravene som er stilt for konduktivitet og samlet U-verdi i bygningsdelen [3]. Etersom materialenes bruk i bygninger er relativt ny, finnes det få faktiske resultater som kan konkludere med hvor lenge panelene vil opprettholde sin integritet. Effekten av relativ fuktighet på damp- og lufttettheten til foliematerialer er ukjent, da det fortsatt er usikkert hvordan disse parametrene avhenger av hverandre [16].

For å legge til rette for en så lang levetid som mulig for panelene er det derfor ønskelig at fukt- og temperaturforhold i materialsjiktene som ligger inntil VIP har en viss standard. Høye temperaturer og høy relativ luftfuktighet vil kun øke permeabiliteten i folien [17]. Kondens og oppsamling av vann rundt panelene vil være ugunstig, da dette etterhvert vil kunne trenge inn i panelene.

### 3.1.7 Brann

Fumed silica er et ubrennbart materiale. Folien som omslutter kjernematerialet er derimot bestående av polymerer, som vil begynne å smelte rundt 150 °C, før de selvantenner rundt 350 °C [18]. Underveis i prosessen vil det produseres karbonmonoksid og formaldehyd som er giftige gasser. VIP som er tilgjengelige kommersielt kan plasseres i klasse B2 for brennbarhet etter DIN 4102, som er en tysk standard [19]. Dette tilsvarer klasse D og E for brennbar isolasjon i eurokoden EN 13501-1 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 1: Klassifisering ved bruk av resultater fra prøving av materialers egenskaper ved brannpåvirkning [20]. Bruk av materialer i denne klassen må ofte avklares med brannteknisk rådgiver.

## 3.2 Aerogel

Aerogel er et av de mest lovende materialene når det kommer til varmeisolerende evner etter vakuumisolasjonspaneler. Med en varmeledningsevne som går helt ned til 0,013 W/(mK) viser aerogel svært gode egenskaper sammenliknet med konvensjonelle isolasjonsmaterialer, som har en varmeledningsevne på rundt 0,034 W/(mK) [21, 22]. Aerogel er et syntetisk, porøst materiale som har mange ekstraordinære fysiske, termiske og optiske egenskaper. På grunn av den høye porøsiteten er det det letteste faste materialet man kjenner til i dag, men dette resulterer også i lav mekanisk styrke. Det finnes tre typer aerogel: silica, carbon og alumina aerogel [23]. Blant de tre typene er det silica som er den mest brukte og den som heretter blir i fokus. Tabell 2 gir en oversikt over noen nøkkelverdier hos aerogel som presenteres fortløpende i teksten.

**Tabell 2:** Veiledende materialeegenskaper for silica aerogel.

Egenskap	Verdi
Termisk konduktivitet [W/(mK)]	0,013
Porøsitet [%]	> 90
Porediameter [nm]	5 - 70
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	100
Smeltepunkt [°C]	1200



### 3.2.1 Fremstilling

Fremstillingen av silica aerogel skjer ved hjelp av en syntese som deles opp i tre steg; forberedelse av gelen, aldring og tørking. Prosessen er forklart i større detalj av Baetens, Jelle og Gustavsen [23] og beskrives videre i korte trekk.

Aerogel er et allsidig materiale som fremstilles i en kjemisk prosess kalt sol-gel, som går ut på å lage fast materiale fra partikler i en løsning. Når gelen forberedes blir partikler av silisium alkoksider dispergert i en såkalt sol, som er en kolloidal løsning [24]. Det er deretter nødvendig med en katalysator for å sette i gang og vedlikeholde prosessen (hydrolysen) der partiklene påvirkes for å danne en polymer i form av et sammenhengende tredimensjonalt nettverk.

Hydrolyse av silisium alkoksider gjennomføres katalytisk, vanligvis ved hjelp av syre- eller basekatalysatorer, eller en to-trinns katalysator. Solen omdannes til en gel i forbindelse med den katalytiske polymeriseringen av alkoksidene. Dersom det benyttes en syrehydrolyse i forbindelse med kondensasjon vil det oppstå lineære og svake kjeder, og en mikroporet struktur. Med en basisk katalysator vil det dannes mer uniforme partikler som fører til større porer med større avstand. Denne strukturen er lite ønskelig for aerogel som isolasjonsmateriale.

I aldringsprosessen forsterkes materialet for å unngå krymping, og det forberedes for den endelige tørkeprosessen. Aldringsprosessen innebærer normalt bruk av etanol-siloksanblandinger som legger til flere monomerer i den etablerte silisiumpolymeren. Alt vann som ligger igjen i porene må fjernes før tørkeprosessen. Dette gjøres enkelt ved å vaske gelen med etanol og heptan. Vannet som eventuelt ligger igjen vil ikke bli fjernet i tørkeprosessen og resulterer i en ikke-transparent og veldig tett aerogel.

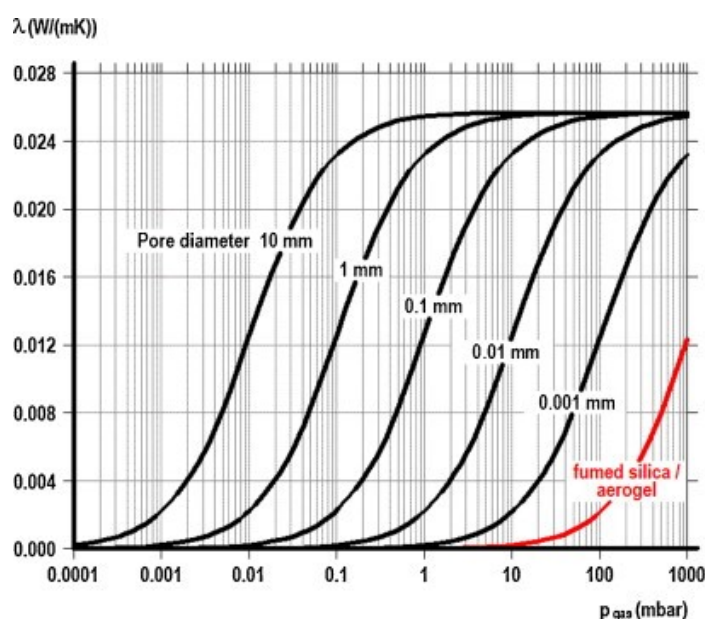
Tørkeprosessen er det siste og mest kritiske steget i oppbyggingen av aerogeler. To typer tørkeprosesser kan benyttes; ambient pressure drying (APD), der kapillærspenning ikke kan unngås, og supercritical drying (SCD), hvor væske fjernes over kritisk temperatur og trykk, for å unngå kappilærspenning. APD er mer anvendelig når det kommer til kostnader, da SCD har begrensninger i et økonomisk perspektiv, prosesskontinuitet og HMS, på grunn av høy temperatur og trykk for å nå det kritiske punktet [25]. SCD er derimot den mest

utbredte metoden for silica aerogels. Det finnes to ulike typer SCD: high temperature supercritical drying (HTSCD) og low temperature supercritical drying (LTSCD). Metoden HTSCD er ikke relevant for aerogel som skal benyttes til bygningsformål.

### 3.2.2 Fysiske egenskaper

Potensialet til silica aerogel kommer av dens uvanlige egenskaper som et fast materiale. Strukturen består av kryssbundne  $\text{SiO}_2$ -kjeder med en stor andel luftfylte porer, som normalt er svært små. Ren aerogel har en standard porediameter mellom 10 og 100 nm, men silica aerogel har en porediameter på mellom 5 og 70 nm, avhengig av produksjonsmetode og hvor lite forurenset materialet er [23].

Figur 4 viser en oversikt over spesifikk varmekonduktivitet som funksjon av indre gasstrykk for ulike porediametere. Her kommer det frem at ved høyere trykk vil små porestørrelser i mediet gi lavere varmekonduktivitet. Fra 10 mbar og opp vil aerogel ha langt bedre varmeisolerende egenskaper enn medier med større porestørrelser.



**Figur 4:** Spesifikk varmekonduktivitet som funksjon av indre gasstrykk og standardisert porediameter i forskjellige medier [23].

Aerogelen kan ha en korndensitet på  $2200 \text{ kg/m}^3$ , men på grunn av den høye porøsiteten vil den ha en lav tørrdensitet på  $3 \text{ kg/m}^3$  [21]. Det er ønskelig at aerogeler til byggeformål har en total densitet på rundt  $100 \text{ kg/m}^3$  [21, 23].

Silica aerogel er lastbærende med en høy kompresjonsstyrke opptil 3 bar, men på grunn av lav strekkfasthet er materialet skjørt. Dersom aerogelen ikke er tilstrekkelig hydrofob og kommer i kontakt med vann, vil overflatespenningen i porene bli for høy og være ødeleggende for strukturen. Dette er en av grunnene til at aerogel ofte benyttes i VIP, der et ytre lag vil hindre inntrengende vann og opprettholde vakuu som vil senke varmekonduktiviteten til materialet enda mer. [23]

### 3.2.3 Termiske egenskaper

På grunn av aerogelens komplekse nanoporestruktur, blir varmetransporten gjennom det faste skjelettet ( $\lambda_{\text{solid}}$ ) lang og krøket. Aerogel har også lav varmekonduktivitet i gass ( $\lambda_{\text{gas}}$ ) og lav infrarød strålingsoverføring  $T_{\text{IR}}$  [25, 21]. Å komme fram til en total varmekonduktivitet ved å summere alle delene er komplisert da de henger nøye sammen og påvirker hverandre. En forandring i den infrarøde strålingsoverføringen vil for eksempel medføre endringer i skjelettets varmekonduktivitet.

Gassens lave varmekonduktivitet kan forklares med Knudsen-effekten, som uttrykker gassens konduktivitet i et porøst medium som funksjon av luftrykket og en karakteristisk porestørrelse. Knudsen-effekten er beskrevet i likning 2 og 3.

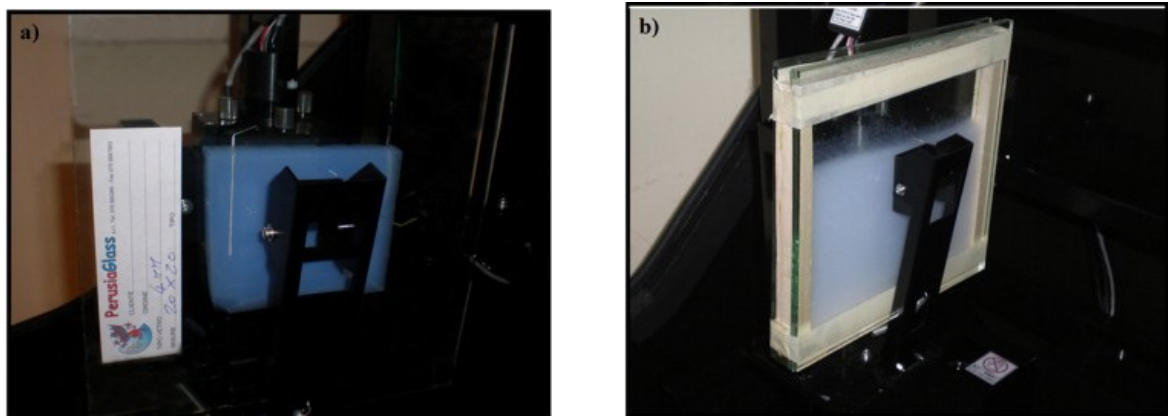
Gassens varmekonduktivitet vil ha stor innvirkning på den totale varmekonduktiviteten til aerogelen, på grunn av materialets høye porøsitet og andel luft. For å kunne redusere konduktiviteten i gassen enda mer er det mulig å redusere størrelsen på porene i materialet, benytte vakuu eller ulike gastyper med lav konduktivitet [23].

### 3.2.4 Monolittisk, granulert og fibrøs aerogel

Sluttproduktet fra sol-gel prosessen kan opptre i fast form (monolittisk aerogel) eller i pulverform (granulert aerogel) [26]. Det er også mulig å tilsette fiber som forsterkning, slik at aerogelen opptre i form av en matte eller et panel.

Den monolittiske aerogelen lages primært ved hjelp av superkritisk tørking, som er en både kostbar og tidkrevende prosess [27]. Den har lav varmekonduktivitet og kan vise til en lyst-ransmittans som kan sammenlignes med glass [26]. Den er derfor best egnet i glassfasader og vinduer, der transparent isolasjon er ønskelig.

Da monolittisk aerogel er skjørt er det vanskelig å lage uten å ødelegge strukturen. Derfor er aerogel som isolasjon ofte benyttet i form av granulater [28]. Den granulerte silicaen kan også benyttes mellom glasslag, slik som den monolittiske, men er mindre gjennomskinnelig. Siden luft har høyere varmekonduktivitet enn den faste aerogelen, kan konduktiviteten til den granulerte aerogelen reduseres ved å fjerne luftvolum i hulrommene mellom granulaten. Figur 5 illustrerer både monolittisk og granulert aerogel.



**Figur 5:** Ovenfor illustreres aerogel mellom glasslag i form av a) monolittisk aerogel og b) granulert aerogel [21].

Både monolittisk og granulert aerogel har mekaniske begrensninger som forhindrer dem i å oppnå fleksibilitet. Dette er grunnen til at det nylig er utviklet varianter av aerogel både i form av rullprodukter og paneler, som illustrert i Figur 6. Aerogelmatter/paneler er kompositter av silica aerogel med fibrøs forsterkning som gir et produkt som er mer fleksibelt, solid og hydrofobisk [29]. Det bør nevnes at disse produktene er opake og altså verken gjennomsiktige eller gjennomskinnelige.



**Figur 6:** Aerogeler med fiberforsterkning. a) Aerogelmatte b) Aerogelpanel c) Aerogelmatte på tørris som illustrerer de gode isolerende egenskapene [29].

### 3.2.5 HMS, montering og håndtering

Det er ingen studier som viser at amorft silisiumdioksid kan klassifiseres som kreftfremkallende for mennesker [30], men inhalering av støvpartikler som inneholder krystallinsk silisiumdioksid kan føre til silikose og andre typer lungesykdommer [21]. Sol-gel prosessen frembringer stort sett amorfe materialer [27] og aerogel som benyttes som isolasjon inneholder derfor ikke kreftfremkallende stoffer.

Utenom at amorft silisiumdioksid kan klassifiseres som trygt i forhold til kreft, er toksisiteten til silica aerogel ganske uvisst. Det også viktig å påpeke at toksisiteten av nanopartikler avhenger av størrelse, form, sammensetning og overflate. Det er nødvendig med videre utforskning av toksisiteten til silica aerogel [31]. På grunn av manglende kunnskap angående helse, miljø og sikkerhet når det gjelder silica aerogel, kan det være problematisk å håndtere avfall i etterkant. Figur 7 illustrerer hva som skjer dersom et vindu ødelegges og aerogelgranulater spres.



**Figur 7:** Et ødelagt vindu der aerogelgranulater er spredt utover et område [31].

Flere tiltak kan iverksettes for å unngå reaksjoner med støvpartiklene under montering, deriblant bruk av støvmaske. Dette er et enkelt og effektivt tiltak, som også er vanlig å bruke ved montering av andre konvensjonelle isolasjonstyper. Andre tiltak kan bestå i å pakke inn aerogelen i plast-, gummi- eller aluminiumkledning for å unngå direkte kontakt med huden [21]. Ellers vil både briller og hansker være effektivt for å redusere faren for øye- og hudskader. Generelt bør arbeidere med allergi frarådes å være tilstede på installasjonsområdet over lenger tid [21].

Aerogelmatter burde beskyttes mot menneskelig trafikk under installasjonstiden for å unngå å skade de termiske egenskapene. Det er også viktig å benytte riktig verktøy for kutting og tilpassing av mattene, da uegnede kutteredskaper eller tøff behandling kan forårsake

frigjøring av støvpartikler [32]. Densiteten til støvpartiklene er svært lav og da dette kan være farlig, er det en av grunnene til at materialet ikke har blitt mer brukt i byggebransjen fram til nå [21].

### **3.2.6 Brann**

På grunn av aerogelens kjemiske struktur er den generelt ikke brennbar og har et svært høyt smeltepunkt på 1200 °C [21]. Den kan derfor benyttes i bygninger for å forhindre spredning av brann.

## **3.3 Varmetransport og fuktmekanikk**

### **3.3.1 Generelt**

Fukt- og varmetransport er fysiske og sammenkoblede prosesser som det er vesentlig å ta i betraktning når bygninger prosjekteres. Fagene går inn under disiplinen bygningsfysikk, som ble etablert så sent som på 70-80-tallet [33]. Utviklingen av bygningsfysikken skjer blant annet som en respons på økt kompleksitet i bygningskonstruksjoner, innføring av nye materialer og byggemåter, samt strengere krav til kvalitet og miljø. Et godt prosjektert bygg vil ha mindre risiko for byggskader, lengre levetid og bedre energieffektivitet.

Et høyt fuktnivå i konstruksjoner kan i stor grad påvirke bygningsdelers oppførsel og anslagsvis 75% av alle byggskader har en sammenheng med fukt eller virkningen av fukt [34]. Det er derfor ønskelig å holde fuktnivået i konstruksjonsdeler under et visst kritisk nivå. De mest problematiske virkningene som oppstår dersom dette ikke gjennomføres inkluderer korrosjon, råte, muggvekst og frostsprengning. Korrosjon og råte vil i verste fall kunne svekke den strukturelle integriteten i bygningen. Muggvekst kan gi betydelige helseproblemer for beboere, særlig hos allergikere og astmatikere. Frostsprengning, en gjentakende syklus som er aktuelt i det kjølige nordiske klimaet, kan forårsake sprekker og avskalling.

I oppvarmede bygg er det vesentlig å holde varmetransporten gjennom ytterkonstruksjonene, og dermed varmetapet til omgivelsene, så lav som mulig for å spare energi. Dette oppnås ved å bryte kuldebroer, bruke materialer med lav varmeledningsevne, fylle igjen luftrom og å unngå utettheter og lekkasjer i sperresjikt. Konsekvensene av for dårlig prosjekterte eller utførte løsninger medfører ikke bare varmetap, men i tilfeller også redusert termisk

komfort, kondens og temperaturspenninger [35]. Et høyt fuktnivå i konstruksjonen vil også gi større varmetap.

Veiledning til Byggteknisk forskrift (TEK17) trekker opp grensene for det minimum av egenskaper et byggverk må ha for lovlig å kunne oppføres i Norge [36]. Forskriftskravene i § 14-2 angir energitiltak i form av maksimal tillatt varmegjennomgang (U-verdi) gjennom de ulike ytterkonstruksjonene i bygninger. Kravene kan fravikes, forutsatt at bygningens varmetapstall ikke øker og at minstekravene i § 14-3 er oppfylt. Energitiltakene og minstekravene som gjelder for tak og yttervegger er presentert i Tabell 3.

**Tabell 3:** Energitiltak og minstekrav fra § 14 i TEK17 [37].

Bygningsdel	Energitiltak [W/(m <sup>2</sup> K)]	Minstekrav [W/(m <sup>2</sup> K)]
Tak	≤ 0,13	≤ 0,18
Yttervegg	≤ 0,18	≤ 0,22

Forskriften krever i § 13-13 at varmeisolerte yttervegger og tak skal ha et damp- og lufttett sperresjikt for å unngå fuktskader på varm side av isolasjonen, med en Sd-verdi, eller vanddampmotstand, større enn 10 m. Utover dette er kravene som stilles til fuktsikkerhet i TEK17 løst formulert. Dette har en sammenheng med at hvilke fuktforhold som er skadelige i en konstruksjon er avhengig av flere faktorer, som blant annet materialvalg, konstruksjonsoppbygging, klima og uttørkingsevne. Derfor må fuktforhold vurderes i hvert enkelt tilfelle.

### 3.3.2 Mekanismer

Både fukt- og varmetransport er kompliserte prosesser som drives av flere mekanismer. Varmetransport omfatter ledning, stråling og konveksjon, som sammen fører til temperaturvariasjoner gjennom konstruksjonsdeler og i tillegg gir grunnlag for fukttransport. Termisk konduksjon, eller varmeledning, er når varme overføres fra et molekyl til et annet i form av kinetisk energi. Substanser med lavere molekyltetthet, som luft og andre gasser, leder dermed varme dårligere enn materialer med høyere tetthet, som stål og tre. Varmeledning følger termodynamikkens andre lov om at varme alltid overføres fra et sted med høy temperatur til lav.

Kuldebroer er eksempler på varmeoverføring gjennom konduksjon. Varmen vil følge minste motstands vei og en kuldebro er definert som en del av en konstruksjon der varmemotstanden er betydelig redusert. Ved bruk av vakuumisolasjon og aerogel, som har svært lav konduktivitet, kan temperaturforskjellene i bygningsdeler og mellom materialkomponentene som utgjør dem bli stor. Jo større temperaturforskjellen er, desto større blir varmestransporten, som følger av Fourierloven for varmeledning i likning 5:

$$Q = U \cdot A \cdot dT \quad (5)$$

$Q$  er varmestrøm [W],  $U$  er varmeovergangstall [W/(m<sup>2</sup>K)],  $A$  er areal [m<sup>2</sup>] og  $dT$  er temperaturforskjell [K].

I nybygg kan disse problemene planlegges rundt og minimeres, men ved innvendig etterisolering er dette et aktuelt problem. Kuldebroer kan forverres og bli større enn de var i byggets originaltilstand som følge av en økning i temperaturforskjeller og varmemotstand.

Kuldebroene og temperaturforandringene kan gi kalde overflater i bygningsdelene. Når fuktig luft nedkjøles lokalt ved slike overflater øker den relative fuktigheten (RF). Avhengig av overflatetemperaturen vil luften når RF når 100%, altså luftens duggpunkt, avgi fukt i form av kondens. Hvis vanndamp kondenserer på overflater som er kaldere enn 0 °C vil kondensen bli til rim eller is. Oppsamlet kondens rundt VIP som ikke får tørket ut vil kunne trenge inn gjennom folien og påvirke produktets levealder i stor grad [38]. Aerogel bør heller ikke utsettes for fukt til tross for at materialet er hydrofobisk, da gjentatt eller kontinuerlig utsettelse for fukt vil kunne øke materialets varmeledningsevne [39].

Luftens relative fuktighet er et mål på hvor mye vanndamp luften inneholder ved en viss temperatur. RF oppgis i prosent av vanndampmengden luften maksimalt kan inneholde ved samme temperatur. Ved en hver temperatur eksisterer det en øvre grense for hvor mye vanndamp luften kan inneholde, med andre ord hvor høyt damptrykk luften kan ha. Denne grensen er det som kalles duggpunktet. Mengden vanndamp luften kan holde på før den når duggpunktet øker med temperaturen i luften. Dette vil si at luft med RF under 100% vil kunne nå 100% og skille ut fukt dersom temperaturen synker. Sammenhengen mellom temperatur, RF, vanndamptrykk og vanndampinnhold i luft kan vurderes ved hjelp av



Mollier-diagrammer [34].

Fukt kan transporteres i både damp- og væskeform ved hjelp av forskjellige mekanismer. Diffusjon er vanndamptransport som følge av trykkforskjeller i vanndampen. Vanndampen vil alltid bevege seg mot steder med lavere damptrykk inntil likevekt er oppnådd. Fenomenet kan over tid forårsake høy RF i konstruksjoner [34]. Vanndamp kan også transporteres ved konveksjon, som innebærer at vanndampen fraktes med luftstrømmer fra områder med høyt lufttrykk til lavt lufttrykk. Selv små luftlekkasjer kan gi vesentlig større fukttransport sammenliknet med diffusjon og er av grunnene til at TEK17 krever egnede tettesjikt i konstruksjoner.

I væskeform transporteres fukt ved hjelp av tyngdekraft (for eksempel ved lekkasje gjennom tak), som følge av vannovertrykk eller vindtrykk (for eksempel ved slagregn) og ved kapillærsuging [34]. Væskestrømning ved kapillærsuging kan forekomme når den relative fuktigheten i porene i et materiale kommer over 98%, og fukten opptrer i det som kalles det kapillære området. I dette området kan materialer i tillegg oppta vesentlig mer fukt enn det kan i det hygroskopiske området, der RF i porene er under 98%. Når RF i porøse materialers omgivende luft har en gitt verdi, vil fuktinnholdet i materialene gradvis nærme seg en verdi som benevnes likevektsfuktigheten [34, 40].

## 4 Bruksområder

Den store fordelen med både aerogel og vakuumisolasjonspaneler er at deres overlegne termiske egenskaper og isolerende evner gir mulighet for slankere konstruksjoner. Dette gjør materialene attraktive i rehabilitering av eldre bygninger, der det kan være en utfordring å etterisolere uten å miste mye areal. Boliger i tette byer blir også mer og mer vanlig, der det kan være mangel på både plass og dagslys. Da materialene er dyrere enn konvensjonelle isolasjonsmaterialer, som illustrert i Figur 8, må bruken av materialene vise til effekter som kan rettferdiggjøre det store prisgapet mellom superisolasjon og konvensjonelle materialer. I områder med høy boligmarkedsverdi vil plassbesparelsen raskt kunne betale seg inn. Prisene oppgitt i Figur 8 er også noe utdatert da studien [27] er fra 2012, men den illustrerer prisgapet isolasjonsmaterialene seg i mellom.

Isolasjonstykkelse som kreves for å oppnå en U-verdi på $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	Pris per $\text{m}^2$
Konvensjonell isolasjon 16 cm $\lambda = 0,032 \text{ W}/(\text{mK})$	15 US \$
Aerogel 7,5 cm $\lambda = 0,015 \text{ W}/(\text{mK})$	280 US \$
VIP 4 cm $\lambda = 0,008 \text{ W}/(\text{mK})$	220 US \$

**Figur 8:** Oversikt over kostnader for aerogel, VIP og konvensjonell isolasjon. Enheten for den termiske konduktiviteten  $\lambda$  er  $[\text{W}/(\text{mK})]$  og prisen oppgis i amerikanske dollar per  $\text{m}^2$  og disse tallene er hentet fra [27].

Studier [3, 19] hevder også at VIP vil ha fordeler i et nordisk klima fordi lavere brukstemperaturer vil gi bedre termiske egenskaper og lenger levetid. Den lave gjennomsnittstemperaturen gjennom året kan bidra til at hastigheten på luft- og fuktinntrengningen i VIP-ene senkes, sammenliknet med bruk ved høyere gjennomsnittstemperatur [3]. Aerogel har et stort fortrinn sett i sammenheng med klimaskjermens svakeste punkt, vinduer. Materialets overlegne termiske egenskaper kombinert med en transparent struktur gjør det mulig å

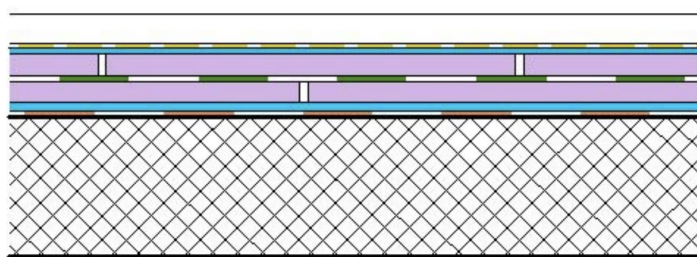
lage vinduer med langt bedre U-verdier enn tradisjonelle vinduer, og dermed trenger ikke energieffektiviteten å gå på bekostning av dagslysinnsippet.

Videre presenteres en rekke bruksområder og løsninger der superisolasjon er implementert. Områdene som tas i betraktning er blant de mest utbredte i litteraturen og representerer dermed ikke alle mulighetene for bruk av aerogel og VIP. Løsningene som gjengis er hentet fra tidligere utførte prosjekter og studier.

## 4.1 Gulv

På grunn av at aerogel tåler kompresjon og dens gode termiske egenskaper [41, 23], er det et svært attraktivt materiale å benytte som undergulvisolasjon. Dette gjelder spesielt i tilfeller der høyde er en restriksjon eller i bygg der stor romhøyde er ønskelig. Isolasjonen er et raskt og kostnadseffektivt alternativ ved rehabilitering av kjellere og vil ikke forstyrre innsetting av dører da materialet er såpass tynt [41]. Å isolere gulv med VIP er dyrt, men produktet har mulighet til å kunne gjøre varmesystemer som vannbåren gulvvarme og elektriske varmeenheter mer effektive. Elementene vil også kunne redusere energiforbruket ved anvendelse i kjølerom [4].

I et bloddonorsenter i Bern måtte et dypfrysrom på 50 m<sup>2</sup> installeres [42]. Gulvets oppbygning illustreres i Figur 9.



### *Structure of the floor*

- Plaster
- Polyethylene-foil
- Protection mat of 6 mm
- 2<sup>nd</sup> layer of vacuum insulation panels of 25 mm
- 1<sup>st</sup> layer of vacuum insulation panels of 25 mm
- Protection mat of 6 mm
- Vapor barrier
- Concrete

**Figur 9:** Vertikalsnitt av gulvkonstruksjon i fryserom i Bern [42]. Vakuumisolasjonspanelene er farget fiolette.

Den tilgjengelige plassen å isolere på var 10 cm etter at gamle påstøpet ble fjernet. For å følge lovene i Bern krevdes derimot et isolasjonslag tilsvarende 25 cm polyuretan. Problemet ble løst med et dobbelt lag VIP. Bruken av doble lag gir økt sikkerhet og det ble i tillegg installert temperatursensorer under panelene for å forsikre deres funksjon. Paneler legges også i doble lag for å minimere kuldebroer langs kantene av panelene. Det øverste laget forskyves i forhold til det nedre, slik at de stedene der hjørnekantene av panelene møtes ligger under senteret av panelet i det øvrige laget. Gulvets oppbygning illustreres i Figur 9.

## 4.2 Etterisolering av vegg

En stor del av den norske bygningsmassen består av eldre hus som med fordel kan rehabiliteres eller oppgraderes for å bli mer energieffektive. Etterisolering med tradisjonelle materialer kan være problematisk med tanke på plass; ofte går verdifullt bruksareal innvendig tapt, mens det utvendig kan bli behov for å forlenge takutstikk. Dette kan enkelt løses med implementering av vakuumisolasjonspaneler eller aerogel.

### 4.2.1 Utvendig etterisolering av vegg

Ved rehabilitering av eldre bygg er ønsket om å beholde byggets opprinnelige uttrykk ofte stort. Dette krever som regel svært tynne lag med isolasjon. En type aerogel kalt Spaceloft<sup>®</sup> fra Aspen aerogel kommer som rullprodukt i tykkelsene 5 og 10 mm og har en varmekonduktivitet på 0,013 W/(mK) ved 0 °C [23, 32]. Mattene kan kuttet og tilpasses, som er et av fortrinnene til aerogel fremfor VIP. Produktet er også hydrofobt og dampåpent [32], slik at vanndamp slipper gjennom materialet uten at det tar opp fuktigheten.

Dette produktet ble benyttet til å oppgradere en bolig i Zürich, Sveits, som beskrives i Koebel, Rigacci og Achard [27] og illustreres i Figur 10. Under rehabiliteringen ble den opprinnelige murpussen fjernet og to 10 mm tykke aerogelmatter ble limt på bygget. Deretter ble standard isolerende murpuss på 30 mm anvendt på fasaden. Denne fungerer som en klimabeskyttelse ved å holde vann ute. Det rehabiliterte veggelementet endte med en U-verdi på under 0,4 W/(m<sup>2</sup>K).

EFFESUS er et forskningsprosjekt som studerer energieffektiviteten til bygg i historiske og urbane områder i Europa og utvikler løsninger for å kunne oppgradere bygningskroppen [43]. En av løsningene EFFESUS studerer er aerogel som hulromsisolasjon. Med bruk av



**Figur 10:** Boligen i Zürich. De to øverste bildene illustrerer boligen før og etter rehabilitering, mens de to nederste illustrerer ytterveggen under renoveringen med aerogelmattene [27].

denne metoden vil hulrommet bak eksisterende kledning fylles igjen og det utføres på samme måte som med konvensjonell isolasjon, som for eksempel mineralull [44].

I et av EFFESUS sine rehabiliteringsprosjekter ble et hulromsisolasjonsprodukt utviklet fra aerogeltepper benyttet. Figur 11 illustrerer aerogelen blåst inn i veggen i prosjektet. Produktet kan lages av både resirkulerte tepper eller avfall ved produksjon [44], noe som medfører lavere kostnader og er bra for miljøet. Det er også enkelt å gjennomføre da eksisterende installasjonsmetoder kan benyttes og sist men ikke minst er det en stor fordel at metoden medfører minimal renovering. Testobjektet i prosjektet ligger plassert i Glasgow og målet var å fylle hulrommet bak gipsplatene/lektene, for deretter å sammenligne den termiske ytelsen i det isolerte og det uisolerte rommet. Prosjektet ble gjennomført i mars 2015 og var vellykket [45].



**Figur 11:** Aerogel som hulromsisolasjon blåst inn i veggen [45].

En liknende metode ble benyttet i et rehabiliteringsprosjekt i Biel, Sveits. Granulert aerogel sprøytes inn i hulrommet til veggen, som vist i Figur 12. På grunn av dens gode flytegenskaper vil innblåsningen være effektiv og rask. Hullene der isolasjonen blåses inn kan normalt ha en diameter på 30-50 mm. Etter rehabiliteringen falt U-verdien til en 9 cm hul veggkonstruksjon fra 1,1 til 0,18 W/(m<sup>2</sup>K). [27]



**Figur 12:** Til venstre illustreres veggen som skal etterisolereres og til høyre et nærbilde av innblåsningshullet [27].

Ved rehabilitering av bygg er problemet med bruk av vakuumisolasjonspaneler at det er krevende å tilpasse dem til eksisterende bygningsmål og få festet dem til veggen. En løsning på sistnevnte problem, som er benyttet i flere tilfeller, innebærer å legge PVC-skinner horisontalt mellom panelene. Denne løsningen vil også redusere kuldebroer mellom panelene [18]. To leilighetskomplekser fra 1950 i Karlsruhe i Tyskland ble rehabilitert med denne løsningen, se Figur 13. I tillegg til et beskyttelseslag lagt på begge sider av panelene ble et dobbelt lag EPS plassert som utvendig beskyttelse, samt der panelene ikke kunne tilpasses veggen. Den samlede tykkelsen på isolasjonssystemet ble 10 cm, og veggens U-verdi ble beregnet til 0,13 W/(m<sup>2</sup>K) [18].



**Figur 13:** Skinnesystem brukt mellom VIP [18].



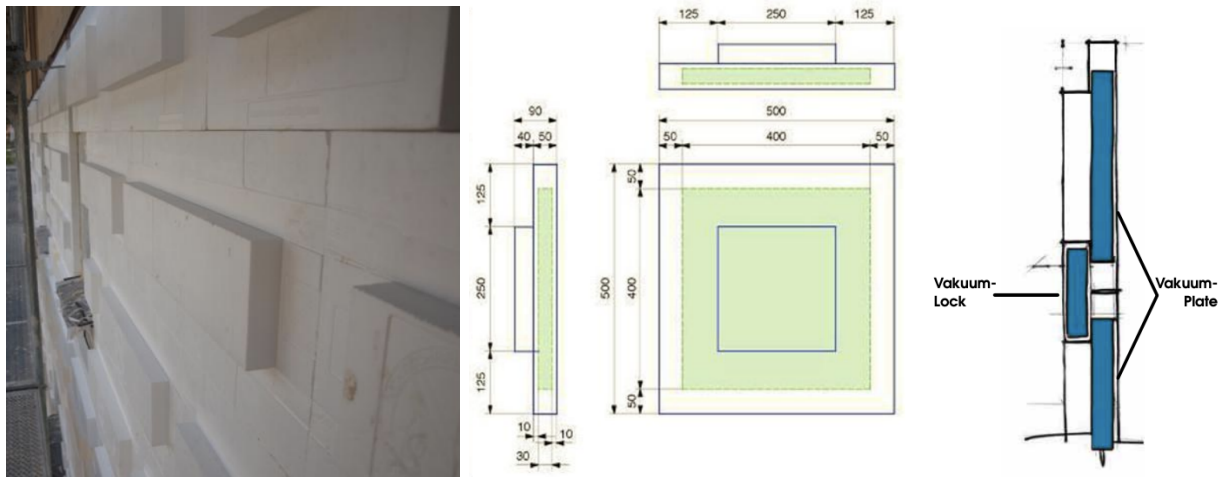
Andre løsninger på innfestningsproblemet inkluderer trelekter [18, 46, 47], lim/tape [14, 48] og stålvinkler [49]. I noen tilfeller vil elementene kunne forårsake økte kuldebroeffekter langs kantene av vakuumpanelene. I et eksperiment utført på en bindingsverksvegg ble spesiallagde stålvinkler festet til stenderne. Vinklene ble utformet slik at de kunne holde lektene som kledningen skulle festes til, utenpå isolasjonen, og er avbildet i Figur 14.



**Figur 14:** Stålvinkler med innfestede lekter utenpå vakuumisolasjonspaneler [49].

Vinklene tillot vakuumpanelene å kunne plasseres tett inntil hverandre, med en avstand lik tykkelsen på vinkelen. For å unngå mekanisk skade på panelene ble vinklene surret med tape. Beregninger i THERM og etter EN ISO 10211 viste at den gjennomsnittlige lineære U-verdien til vinklene var 69 % lavere og dermed bedre enn den for en tradisjonell feste metode med lekter mellom panelene [49].

Det er også utviklet flere interessante løsninger som innkapsler VIP i polystyren. Ved rehabilitering er ofte materialene som bevares gamle og ujevne [50]. Innkapslingen gir panelene mekanisk beskyttelse og løser dette problemet i tillegg til å gi flere innfestningsmuligheter. En av disse variantene er LockPlate™ System fra Weber [51]. De kommer i flere størrelser for å kunne tilpasses geometrien på veggen og kan i noen grad kappes til. Systemet fungerer slik at elementene limes på vegg, som avbildet til venstre i Figur 15. Kanten av EPS rundt vakuumelementene tillater også andre festemidler. Til høyre i figuren illustreres “vakuumlåsene”, som plasseres i mellomrommene som oppstår mellom panelene for å gjøre systemet komplett.



**Figur 15:** Illustrasjoner av elementer fra LockPlate™ System hentet fra [18, 51].

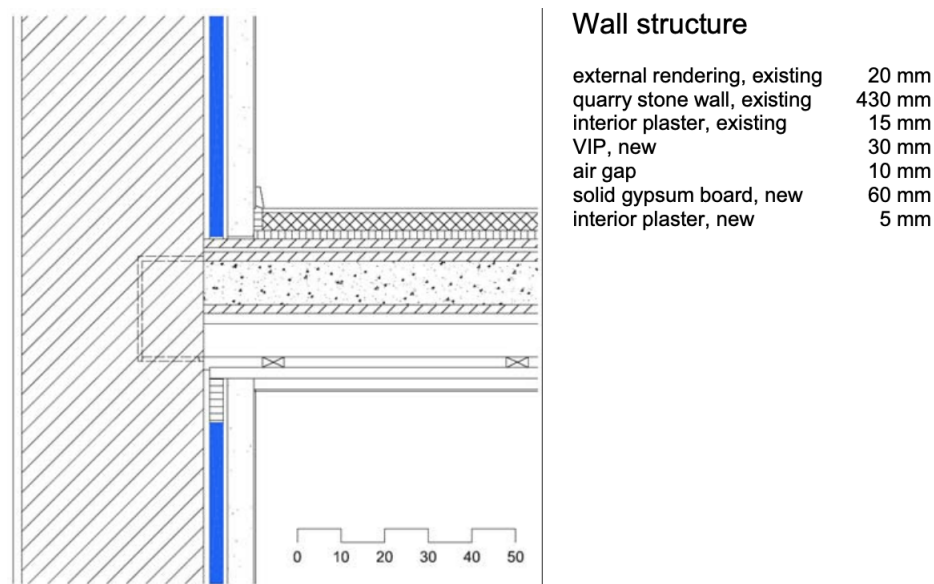
#### 4.2.2 Innvendig etterisolering av vegg

Da vakuumisolasjonspanelene er sårbare på byggeplass, kan det lønne seg å etterisolere innvendig. Her er miljøet tørt og fagarbeidere må fra før av behandle flere materialer og elementer med varsomhet. Det blir kritisk å beskytte konstruksjonen mot brukerpåførte skader, som spiker og skruer. Innvendig etterisolering endrer fukt- og temperaturforholdene i ytterveggskonstruksjonen og må derfor planlegges og vurderes nøye. Økende kuldebroer og muligheten for kondens ved overganger som gulv/vegg og vegg/tak fra fuktige innneklima må også tas i betraktning, da faren for dette kan være større med VIP og aerogel enn med tradisjonelle isolasjonsmaterialer [14].

En bygning i Zürich i Sveits ble i 2003 rehabilitert med VIP som illustrert i Figur 16. I dette tilfellet har randsonen av veggelementet blitt fylt igjen med korkisolasjon mot etasjeskilleren. Korkisolasjon er motstandsdyktig mot fukt og råte og siden det isolerer dårligere enn VIP øker temperaturen noe langs overgangen. Dette gir en jevnere temperaturovergang mot etasjeskilleren og senker risikoen for kondens. Panelene er limt direkte på den eksisterende gipsen. For å forhindre skade på panelene, både ved festing av innvendig kledning og i løpet av bruksfasen, er en frittstående vegg av gipsplater satt opp med 1 cm mellomrom til isolasjonen. [48]

Når vegger etterisoleres endres fuktforholdene i veggen. En fordel med å isolere utvendig er at veggen forblir oppvarmet og tørr. I mange tilfeller er dette derimot ikke gjennomførbart da mange bygninger har både historisk og estetisk verdi og er verneverdige. En storskala





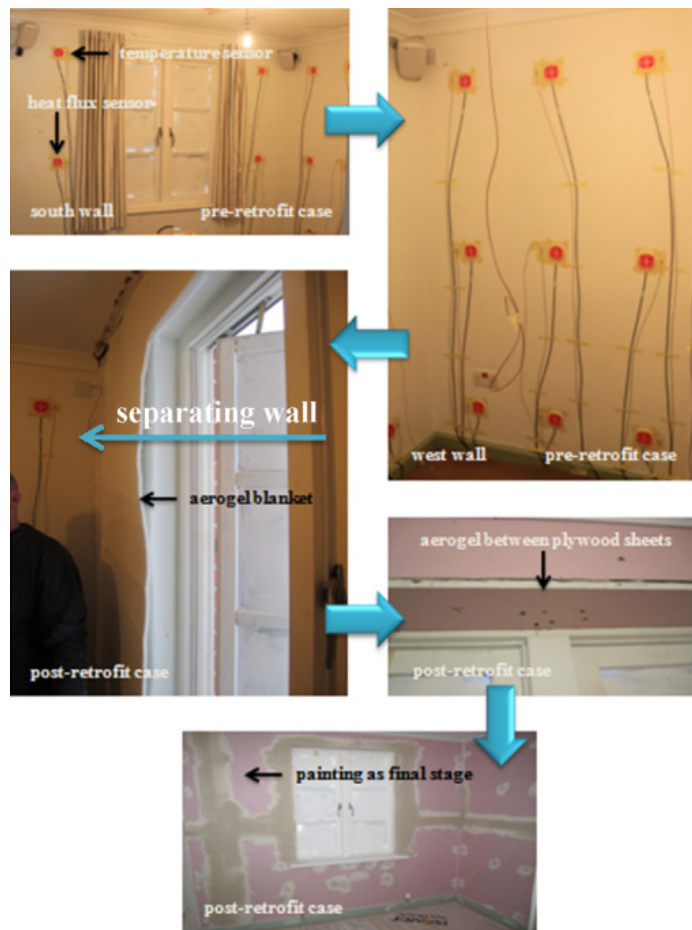
**Figur 16:** Vertikalsnitt av innervegg i Zurich med tilslutning til både gulv og himling [48].

laboratoriestudie gjennomført ved ZEB (The Research Centre on Zero Emission Buildings) i Trondheim tok for seg innvendig etterisolering av en murvegg med trebjelkelag. Veggen ble eksponert for slagregn og temperaturforskjeller. Målinger viste, mot forventning, at det ikke var noen markant forskjell på fuktnivået i veggen med og uten VIP [52].

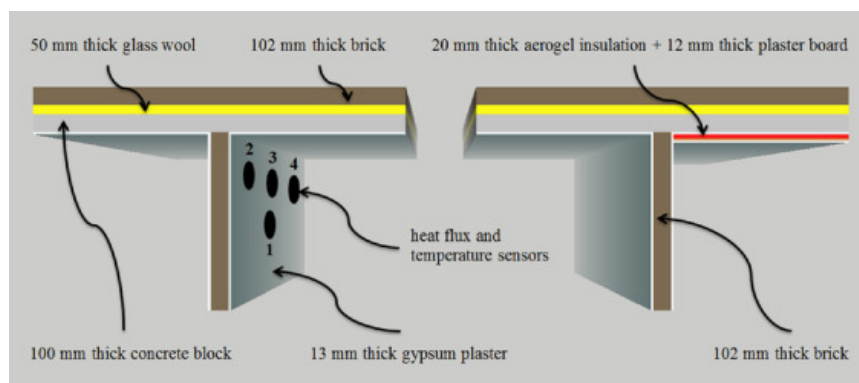
I annen studie [53] gjort ved vinterstid i England skal superisolasjon monteres innvendig i et eksisterende hus. Det som legges vekt på i undersøkelsen er de potensielle kuldebroeffektene som kan oppstå i en skillevegg inne i huset. Etterisolering innvendig vil gi liten eller ingen reduksjon av varmetap gjennom kuldebroer, noe som øker risikoen for fukt- og frostskafer i den ytre delen av veggen [54]. Figur 17 illustrerer renoveringen, der aerogelmatter på 20 mm benyttes for å isolere de innvendige veggene i kombinasjon med 12 mm tykke gipsplater lagt utenpå. De turkise pilene viser hvilken rekkefølge bildene er tatt i.

Varmetransporten gjennom de nylig renoverte veggene er tydelig redusert, noe som medfører at store deler av varmetapet går gjennom skilleveggen. Før renoveringen var varmetapet gjennom skilleveggen alene på  $0,66 \text{ W/m}^2$  og nesten ubetydelig. Etter renoveringen økte verdien helt opp til  $5,86 \text{ W/m}^2$ . Figur 18 illustrerer krysningen mellom skilleveggen og den utvendige veggen til testobjektet, sett ovenfra.

Studien konkluderer med at innvendig etterisolering alene ikke lønner seg for å redusere varmetap i eksisterende bygg dersom de ikke-isolerte bygningsdelene ikke tas nøye med i



**Figur 17:** Innvendig etterisolering av huset i England. De to øverste bildene viser før og de tre nederste bildene viser etter renoveringen [53].



**Figur 18:** Til venstre illustreres den originale veggen i huset i England, og til høyre den samme veggen med aerogel og gips (rød strek) plassert på innsiden av ytterveggen [53].

betraktning. Varmetapet øker drastisk i skilleveggen etter renoveringen på grunn av den økende kuldebroeffekten i krysningen mellom skilleveggen og den utvendige veggen. Dette kan som tidligere nevnt medføre kondensproblemer og ha innvirkning på den termiske komforten til brukerne av rommet.

### 4.3 Sandwichelementer

I et forsøk på å gjøre installering av aerogelmatter enklere har flere tyske firmaer produsert sine egne aerogelbaserte sandwichelementer. AEROCALCE er en kompositt produsert av Röfix, som bruker Aspen Aerogel Spaceloft® i kombinasjon med et limlag og kalkmørtellag. Et produkt produsert av STO har liknende oppbygging, men istedenfor å benytte aerogelmatter brukes granulert aerogel sammensatt med polymere bindemidler. Begge produktene har en enkel og rask installasjonsmetode. [27]

Produktet AEROCALCE ble brukt i et rehabiliteringsprosjekt i Biel, Sveits, der kjellerveggen skulle etterisolereres utvendig. Figur 19 viser rehabiliteringen av kjellerveggen med det aerogelbaserte sandwichelementet.



**Figur 19:** Rehabilitering av kjellerveggen med AEROCALCE. Bildet til venstre illustrerer den ferdig renoverte kjellerveggen, bildet i midten AEROCALCE systemet og bildet til høyre renoveringen av kjellerveggen [27].

Bruk av VIP i sandwichelementer er aktuelt av flere grunner; det forkorter og forenkler installasjonsprosessen og gir panelene beskyttelse helt fra elementene produseres. Dette er verdifullt, da panelene verken skades under frakt, på byggeplass eller under montering. Det finnes flere eksempler på bruk av VIP i sandwichelementer. Med sandwichelement menes alt fra ferdige bygningsdeler til paneler som er innkapslet i isolasjon, trevirke eller metall. [55, 56, 57, 58]

### 4.4 Aerogel i murpuss

I dag finnes det mange verneverdige murbygg i Norge, som det med dagens metoder er utfordrende å etterisolere samtidig som at antikvariske prinsipper ivaretas. I nyere tid har en innovativ metode for etterisolering blitt benyttet, der kalkpuss med aerogelgranulater

integrrert anvendes. Kalkmørtelen er egnet til å forme detaljer og spesielt nyttig i rehabiliteringsprosjekter der byggets opprinnelige uttrykk skal ivaretas.

Superisolerende kalkmørtel med aerogel kan benyttes både innvendig og utvendig, hovedsaklig på tegl- og betongvegger [59]. Det brukes ikke på trevegger. Aerogelmørtel som påføres med 40 mm tykkelse på utvendig fasade kan redusere varmetapet i en uisolert murvegg med ca. 25% [60].

Fordelen med å isolere fra utsiden med denne typen isolasjon, er blant annet at beboere i eksisterende bygg ikke berøres av arbeidene underveis i rehabiliteringen [59]. Isolasjonen blir også en del av murveggen og byggets uttrykk vil kunne bevares i stor grad. Slik kan verneverdige bygg etterisoleres uten å utfordre eller påvirke det opprinnelige arkitektoniske uttrykket. Da isolasjonen er lett å påføre og bearbeide, fungerer den godt på krumme vegger og ujevne flater med varierende materialer [59, 61].

Kalkpussen bygger omtrent halvparten så langt inn i rommet sammenliknet med tradisjonelle isolasjonsmaterialer med utlekting og isolerende matter, noe som medfører bedre utnyttelse av arealet [59]. Figur 20 viser hvordan murpussen fra Fixit [62] påføres en fasade, samt resultatet av rehabiliteringen.



**Figur 20:** Aerogel i murpuss. Til venstre påføres murpussen på en fasade og til høyre illustreres en nylig rehabilitert murbygning [63].

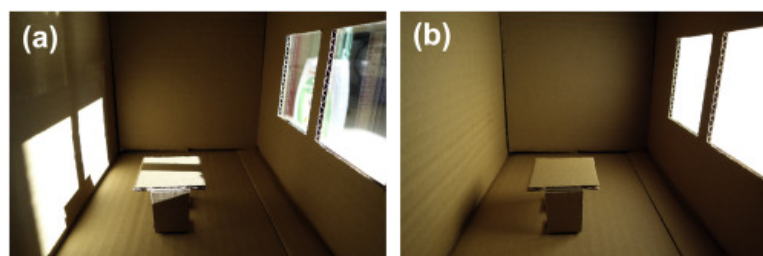
Når materialet påføres på utsiden av muren vil vanndamp fortsatt kunne slippe gjennom veggen, samtidig som at regnvann holdes ute. På grunn av at det er vannavstøtende unngår man at veggen absorberer vann, som kan føre til at den endelige termiske ytelsen forandres

[61]. Vann leder varme bedre enn luft, og derfor vil konstruksjoner med et større fuktinnhold isolere dårligere. Isolasjonen er også motstandsdyktig mot lav, sopp og insekter [62].

## 4.5 Vinduer og glassfasader

Vinduer er i dag den svakeste delen av klimaskjermen og har derfor et stort forbedringspotensiale. Både aerogel og VIP kan plasseres mellom glasslag, men det er bare aerogel, i monolittisk eller granulert form, som slipper gjennom lys. Vinduene gir generelt redusert behov for oppvarming, kjøling og kunstig belysning [64].

Aerogel har høy strålingstransmisjon innenfor bølgelengdene 380 og 780 nm [23], som ligger innenfor det visuelle spekteret. Dette gjør at lys har mulighet til å slippe gjennom materialet. Lyset vil spres fullkomment på innsiden, uansett vinkel på det innfallende utvendige lyset [31, 64], som illustreres i Figur 21. Dette, kombinert med materialets termiske egenskaper, gjør at det vil være mulig å produsere vinduer som har langt bedre U-verdier enn konvensjonelle varianter. Aerogel egner seg godt plassert mellom glasslag med sine kompresjonsegenskaper, samtidig som at glassene gir det skjøre materialet mekanisk beskyttelse.



**Figur 21:** a) Lysinnslipp gjennom et konvensjonelt vindu, b) lysinnslipp gjennom et aerogelvindu [31].

Fordelen med å benytte aerogelvinduer sammenliknet med andre høyisolerende vinduer er at de kan slippe gjennom mer solenergi [26]. Dette kan påvirke det årlige oppvarmingsbehovet i boliger i områder med kaldt klima positivt. På den annen side kan dette være et problem i varmere klimaer da det kan gi et større behov for nedkjøling innendørs. Et konvensjonelt vindu med flere lag glass, lavenergibelegg og gassfylling kan ha en U-verdi på  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  og en G-verdi på 0,50. Et vindu med to lag glass og aerogel, med tilsvarende U-verdi, har derimot en G-verdi på 0,75 [26].

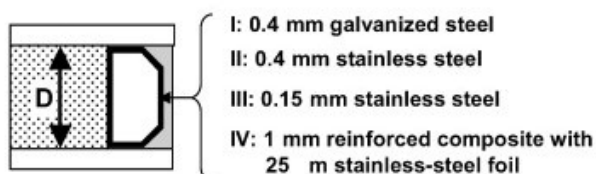


G-verdien er et uttrykk for hvor stor andel av solstrålingsvarmen som slipper inn gjennom en rute [65]. De ovennevnte vinduene har de samme isolerende egenskapene, men med en høy G-verdi slippes mer solstråling inn i boligen. Det bør også nevnes at glasslagene aerogelen plasseres mellom vil absorbere og reflektere deler av solinnstrålingen [66]. Figur 22 illustrerer bruken av aerogel i glassfasader i en villa i Holmenkollen, Oslo.



**Figur 22:** Aerogel i vinduer. Bildet til venstre ved dagtid [67] og til høyre om kvelden [Foto: Espen Grønli].

For å unngå kuldebroeffekter langs kantene av glasset er det viktig at kantforseglingen er så gass- og fukttett som overhodet mulig, i tillegg til at den bør ha den samme varmekonduktiviteten som aerogelen. En kommersiell kantforsegling er vist i Figur 23. Denne skal fungere som en gass- og fukttett barriere, samt opprettholde den ønskede avstanden,  $D$ , mellom glasslagene. Metall ( $> 0,1$  mm) og glass er de eneste materialene som er 100% gass- og fukttette, men da glass er et skjørt materiale benyttes det ikke som kantforsegling. [66]



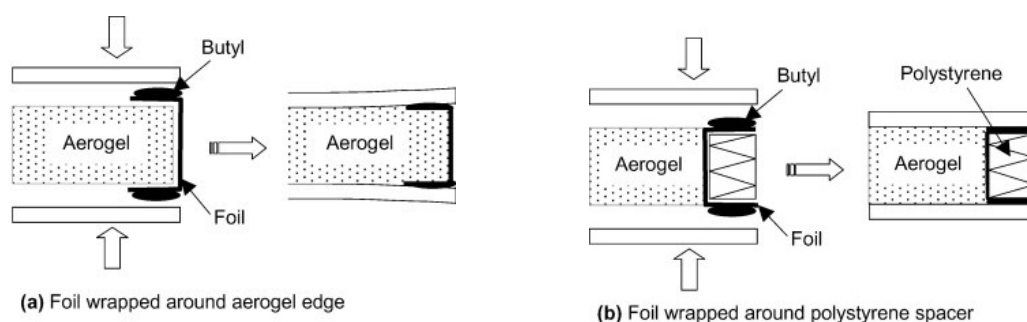
**Figur 23:** Kommersiell løsning for kantforsegling for aerogelvindu [66].

Som tidligere nevnt har aerogel gode egenskaper ved kompresjon og kan derfor selv opprettholde avstanden mellom glasslagene. Det er derfor ikke nødvendig at kantforseglinger har mekanisk styrke, noe som tillater bruken av folier. Metallfolier og laminerte plastfolier er de mest egnede materialene, men sistnevnte har kort levetid og er ikke hundre prosent damp-tett. Til tross for dette vil i følge Jensen, Schultz og Kristiansen [66] laminerte plastfolier,

særlig de som er utviklet for VIP-formål, være best egnet som kantforsegling i aerogelvinduer. Dette er på grunn av at rene metallfolier utgjør en stor kuldebro og den totale kantforseglingen bør derfor i alle tilfeller være så tynn som mulig. Den største utfordringen vil være å lage en helt tett kobling mellom folien og glassflatene.

Foliene kan festes på to ulike måter, som vist i Figur 24. Figur 24 a) illustrerer folie som trekkes rundt enden av aerogelen. Enden forsegles med butyl fugemasse før luften fjernes fra ruten. Ulempen med denne løsningen er at glasset ikke vil ligge rett langs hele vindusflaten på grunn av den økte tykkelsen langs kantene av ruten. Glasset får strekkspenninger når det bues og det gjør at det blir nødvendig med herdet glass for å unngå brudd. Dette medfører enda høyere kostnader for allerede kostbare vinduer med aerogel. Det kan også være problematisk å få folien rundt enden på aerogelen, da aerogel er skjørt. [66]

Figur 24 b) illustrerer en løsning der folien kles rundt en bit polystyren. Tykkelsen på polystyrenen er noen mm mindre enn aerogelen og slik at det blir mer plass for fugemassen. Med denne løsningen vil glasset ligge rett over hele vinduets flate, og påføring av folien og fugemassen kan gjøres uten å være nær aerogelen. Ulempen med denne løsningen er den økte kuldebroeffekten i kantforseglingen og mer kompliserte hjørneløsninger med økt risiko for lekkasje. [66]



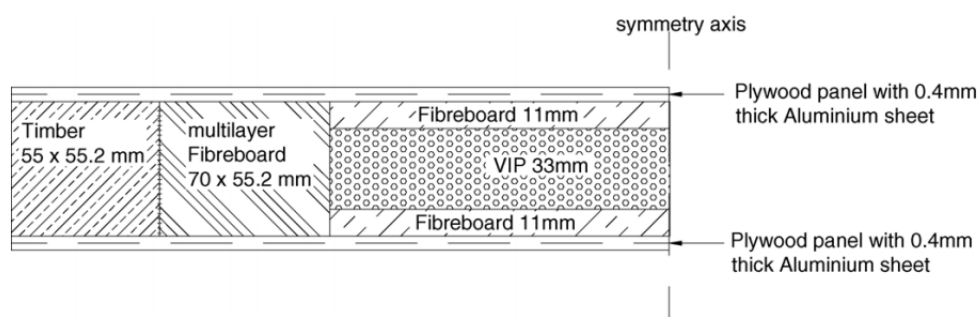
**Figur 24:** To ulike løsninger for forsegling av kanten av aerogelvinduer [66].

Aerogel er også effektivt i takvinduer, fordi isolasjonsevnen er den samme uavhengig om det er montert vertikalt eller horisontalt [64, 68]. Grunnen til dette er at det nærmest ikke oppstår konveksjon i disse glassene. Undersøkelser viser også at U-verdien holder seg stabil selvom temperaturforskjellen inne og ute overstiger 20 °C [64]. Aerogel i vinduer vil derfor i mange tilfeller egne seg godt i et nordisk klima.

Det er også gjort studier på bruk av VIP i glassfasader. Til fordel for panelene gir glassene god mekanisk beskyttelse, men siden panelene ikke er gjennomsiktige mister glassfasaden sin elementære funksjon som gjør lysinnslipp og utsyn mulig. I et prosjekt i München, Tyskland, var målet å bygge en lavenergibygning isolert med VIP. De delene av konstruksjonen som besto av VIP mellom glass var ikke mer enn 3 cm tykke, men oppnådde tysk passivhusstandard [69]. I den syv etasjer høye bygningen ble plassbesparelsen med bruk av VIP kontra tradisjonell isolasjon beregnet til  $50 \text{ m}^2$  og det endelige energiforbruket i konstruksjonen ble beregnet til  $20 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$  [70]. TEK17s energikrav for småhus begrenser tillatt årlig energibehov til  $100 \text{ kWh/m}^2$  [37].

## 4.6 Dører

Et sted som ofte er vanskelig å isolere godt nok på grunn av begrenset plass, er dører. Ved å bruke VIP i dører vil det totale varmetapet i bygningen kunne reduseres. Panelene vil kunne beskyttes mekanisk i døren, avhengig av det innkapslende materialet. Et dørsystem i tre med VIP integrert som illustrert i Figur 25 ble testet i en såkalt *Guarded Hot-Box* for å bestemme U-verdi [71].



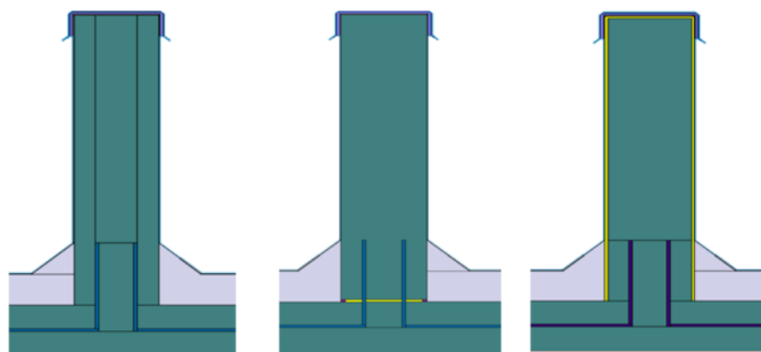
**Figur 25:** Horisontalsnitt av halve dørbladet, som er symmetrisk [71].

Studien fant at selv når begge de to VIP-ene som var integrert i døren var punkterte forble den samlede U-verdien, som inkluderte alle dørens deler, langt bedre enn den til ekvivalente dører med tradisjonell isolasjon. Det totale dørsystemet ble 25% forbedret med VIP hva angår energiforbruk. Det viste seg også mulig å kunne redusere forbruket til nesten 50% dersom dørkarmen ble utført annerledes. Måten døren må festes på i Hot-Boxen representerer et verste tilfelle da den gjør at dørkarmarealet maksimeres og utgjør omtrent 20% av det totale dørsystemet.



## 4.7 Kuldebroer

I en studie [72] vurderes isolering av en støpt armert betongvegg som er benyttet for å etablere en takhage. Armeringsjernene som fortsetter fra takelementet og opp i veggens danner en lineær kuldebro. Veggens skal isoleres med silica aerogelmatter og to ulike plasseringer av isolasjonen tas opp til vurdering. Aerogelmatten illustreres med gul strek i Figur 26. I alternativ 1 reduseres kuldebroen ved å plassere aerogelmatten mellom taket og veggens. I likhet med aerogel som plasseres i vinduer, har mattene gode egenskaper under kompresjon. Porene innkapslet i silicaen forhindrer luften i å trykkes ut under press [29, 72]. Derfor kan mattene fint plasseres under veggens. I alternativ 2 reduseres kuldebroen ved å trekke aerogelmatten rundt hele veggens elementet.



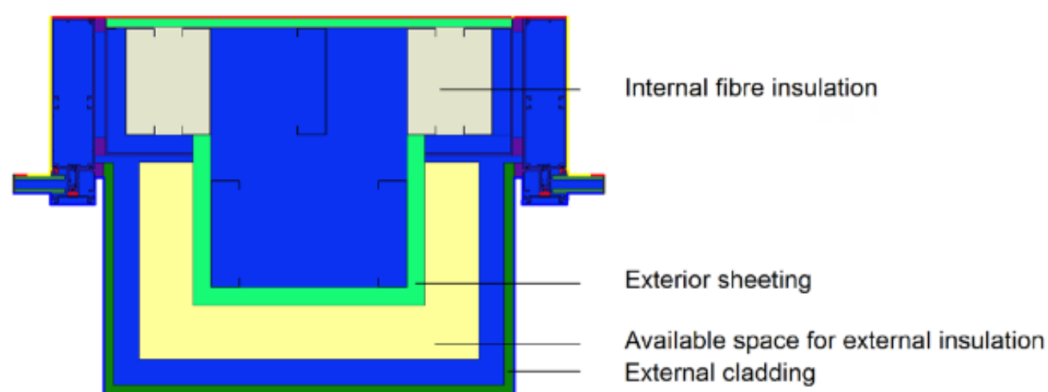
**Figur 26:** Til venstre vises den usiolerte veggens, midten er alternativ 1 med aerogel plassert under veggens og til høyre er alternativ 2 med aerogel trukket rundt hele veggens [72].

Den opprinnelige betongveggens har uisolert en kuldebroverdi på  $\Psi = 1,39 \text{ W}/(\text{mK})$ . Alternativ 1 gav en  $\Psi$ -verdi på  $1,05 \text{ W}/(\text{mK})$  og alternativ 2 reduserte  $\Psi$ -verdien ned til  $1,00 \text{ W}/(\text{mK})$ . Alternativ 2 oppnådde altså en lavere kuldebroverdi enn alternativ 1, og er basert på kun dette kriteriet det alternativet som kommer best ut. Differansen er derimot liten, og det kan argumenteres for at alternativ 1 vil være et mer fornuftig valg dersom kostnadene av aerogelen per  $\text{m}^2$  trekkes inn i vurderingen.

I den samme studien [72] er en vinduskarm med minimal plass til isolasjon tatt i betraktning. Dersom mengden isolasjon ikke tilfredsstillers dagens krav, kan det oppstå kuldebroer og andre problemer i bygningsskallet. I dette eksempelet har det skjedd en prosjekteringsfeil der utvendig kledning er designet uten nok rom til påkrevd isolasjon. Det krever både tid og ressurser å rette opp i feil i en slik situasjon. For å beholde den allerede planlagte kledningen måtte isolasjon med bedre termisk ytelse vurderes, da designet ikke tillot nok

konvensjonell isolasjon etter dagens energikrav. Bygningen har også en stor andel vindusflater og det kreves dermed mer isolasjon i veggene for å kompensere for energitapet gjennom vinduene.

Figur 27 illustrerer vinduskarmdetaljen, der ledig rom for isolasjon er uthevet med gul farge. Det ledige rommet har en tykkelse på omtrent 40 mm. Det ble gjennom beregninger i studien konkludert med at det var nødvendig med fire aerogelmatter (en matte tilsvarer 10 mm) for å oppnå god nok termisk motstand. Studien sammenlikner deretter 40 mm superisolasjon med konvensjonell isolasjon, og finner at 40 mm mineralull med en varmekonduktivitet på  $0,04 \text{ W}/(\text{mK})$  gir vegg en U-verdi på  $0,56 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , mens vegg med aerogelmatter oppnår en U-verdi på  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



**Figur 27:** Det gule området viser ledig plass til utvendig isolasjon i vinduskarmen (omtrent 40mm) [72].

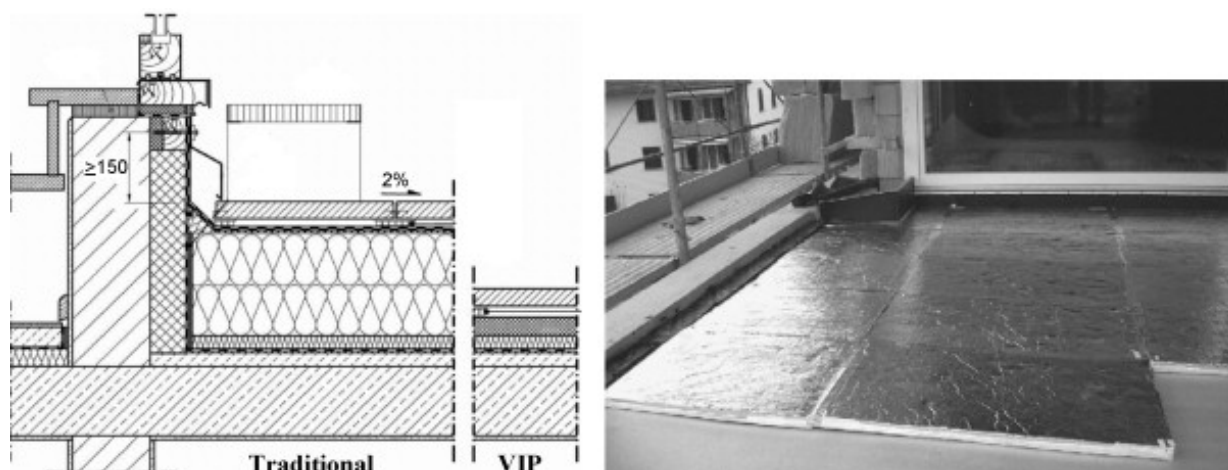
Fire lag med aerogel kan virke overdrevet da det er et dyrt materiale. Situasjonen tatt i betraktning vil det derimot være gunstig å benytte seg av dette alternativet. Løsningen krever verken at bygningsdeler endres eller fjernes, og potensielle risikoer knyttet til for lite isolasjon er minsket. Tatt i betraktning kostnadene dette kunne medført, vil prisen på aerogelen kunne forsvares. [72]

## 4.8 Tak

Det eksisterer generelt få studier på implementering av VIP og aerogel i tak. Hvorfor det er gjort lite forskning på denne bygningsdelen og årsaken til dette er uvisst. Det er flere eksempler på bruken av VIP i takterrasser og det er gjort noe forskning på bruken av aerogel i skråtak.

### 4.8.1 Takterrasser

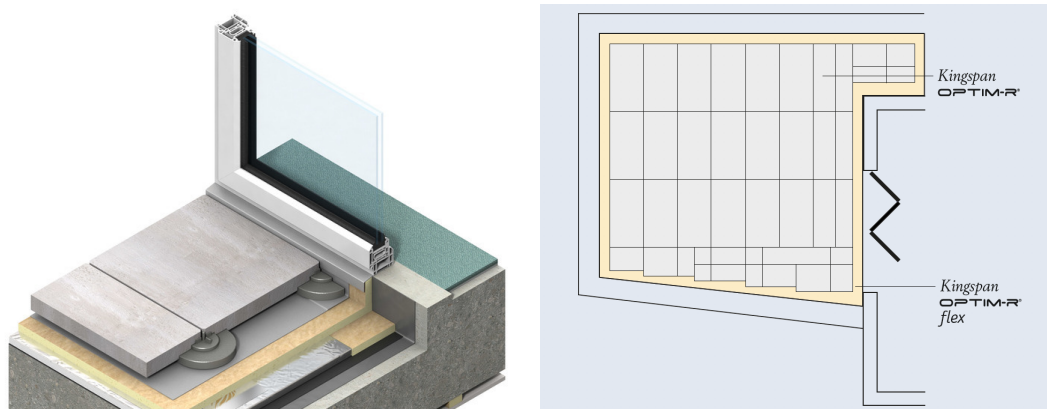
Det til nå mest utbredte bruksområdet for VIP er takterrasser [73]. For arkitekter og ingeniører er det en kjent problemstilling å skulle designe sømløse overganger mellom innvendig etasje og utvendig terrasse på tak. Det utvendige terrassedekket må isoleres for å oppfylle krav til U-verdi, noe som med tradisjonelle isolasjonsmaterialer tilsvarer en tykkelse på minst 100 mm, avhengig av bærekonstruksjon [74]. Denne tykkelsen vil kunne reduseres betraktelig med vakuumisolasjonspaneler, som illustreres i detaljtegningen i Figur 28.



**Figur 28:** Venstre bilde viser et tverrsnitt som sammenlikner en terrassekonstruksjon med tradisjonell isolasjon og en med VIP [19]. Bildet til høyre viser et eksempel der panelene legges på balkong [18].

Når VIP skal tas i bruk i disse konstruksjonene må visse hensyn tas. Det må legges beskyttende lag på både over- og underside av panelene for å unngå skade på folien. Det er også viktig å sørge for god fuktsikring av konstruksjonen da tidligere forskning har påvist at fuktinntrengning har ført til kondensering under panelene [75], og som et resultat en dårligere effektiv termisk konduktivitet [19].

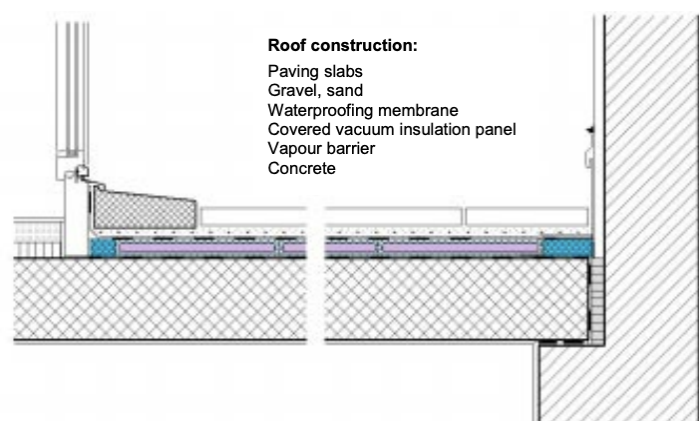
Som tidligere nevnt er en av utfordringene med VIP at elementene ikke kan kuttes og tilpasses på byggeplass. Spesielttilpassede paneler kan bestilles, men i de fleste tilfeller vil det bli nødvendig å fylle ut randsonen av konstruksjonen med annen isolasjon. Dette vil kunne øke U-verdien på bygningsdelen og bør begrenses til tross for at det ofte kan være utfordrende på grunn av geometri [14]. En designlayout fra Kingspan Group [76], som er en ledende produsent av VIP, illustrer i Figur 29 en typisk plan for arrangement av panelene i en terrasse.



**Figur 29:** Til venstre illustreres oppbygningen av løsningen OPTIM-R Balcony and Terrace System. Til høyre illustreres en typisk plan for legging av panelene [76].

Selskapet har utviklet løsninger for både gulv, tak og vegger med vakuumpanelene Kingspan OPTIM-R. Terrasseløsningen som illustreres består av en dampsperre heftet på underlaget, som skal være tørt, rent og uten fremspring. Deretter er det lagt et alternativt beskyttende lag under vakuumpanelene og fyllisolasjonen. Over panelene legges et lag trykkfast isolasjon, før en ny dampsperre forsegler konstruksjonen under dekket.

Et godt eksempel på anvendelse av VIP i en takterrassekonstruksjon ble utført i Leimbach i Sveits, som illustreres i Figur 30. Den gamle tekkingen og isolasjonen på taket var ødelagt og måtte skiftes ut. For å slippe å bytte ut alle vinduene og dørene langs terras-



**Figur 30:** Vertikalsnitt fra takterrassekonstruksjon i Leimbach [42].

sen, måtte den nye isolasjonstykkelsen begrenses til 4 cm. Vakuumpaneler forseglet med XPS ble installert over taket. Alminnelig XPS ble benyttet til å fylle ut områdene der vakuumpanelene ikke kunne tilpasses, slik at det til slutt dekket 10% av takoverflaten. Taket oppnådde en gjennomsnittlig U-verdi på  $0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . [42]

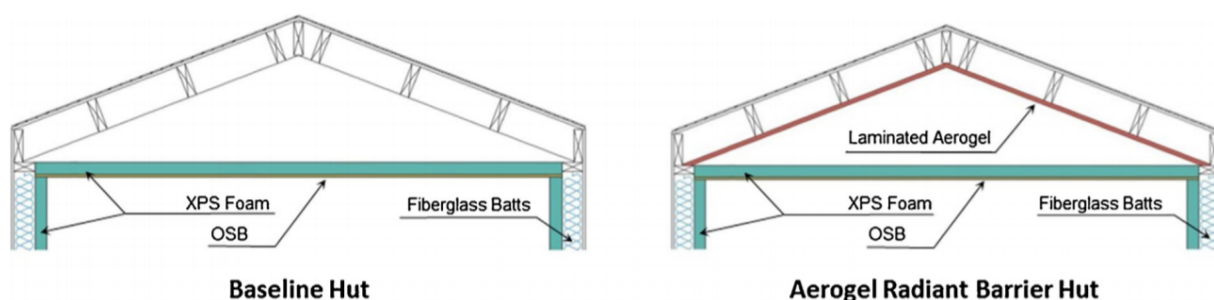
## 4.8.2 Skråtak

I en ny studie [77] fra 2018 skal et loft i en testhytte etterisoleres med aerogel kombinert med reflekterende folie. En reflekterende barriere er ofte laget av aluminium eller aluminiserte plastfolier og kan redusere varmetransporten ved stråling vesentlig [77, 78]. I kombinasjon med aerogel vil også varmetransporten ved ledning reduseres.

Studien benytter to testhytter, en med konvensjonell oppbygging av tak og en med 10 mm aerogelmatter fra Aspen Aerogel med aluminisert plastfolie på begge sider. Løsningen plasseres både på innsiden av takflaten og på gavlveggen. Aerogelen i testen har en varmeledningsevne på  $0,0145 \text{ W}/(\text{mK})$ . Figur 31 og 32 illustrerer testhyttene i undersøkelsen og Tabell 4 danner en oversikt over isolasjonsmaterialene benyttet i de ulike bygningsdelene til hyttene.



**Figur 31:** a) Testhytten fra utsiden, b) konvensjonell oppbygging av loftsrommet, c) laminert aerogel festet til takflaten på loftet [77].



**Figur 32:** Bildet til venstre viser hytte 1, den konvensjonelle testhytten, mens bildet til høyre viser hytte 2, testhytten med laminert aerogel (rød strek) [77].

Hytte 2 i studien, med laminert aerogel, viste at det var mulig å redusere varmetransporten og dermed lufttemperaturen i loftsrommet i områder med både varmt og blandet klima.

**Tabell 4:** Isolasjonsmaterialer benyttet i testhyttene i undersøkelsen [77].

	<b>Vegger</b>	<b>Tak</b>	<b>Gavl</b>	<b>Himling</b>
<b>Hytte 1</b>	Glassfiber i hulrom + 5 cm XPS skum	Ingen isolasjon	Ingen isolasjon	5 cm XPS skum + 1,1 cm OSB
<b>Hytte 2</b>	Glassfiber i hulrom + 5 cm XPS skum	1 cm laminert aerogel	1 cm laminert aerogel	5 cm XPS skum + 1,1 cm OSB

Testene på de to hyttene viste i gjennomsnitt at lufttemperaturen i loftsrommet i hytte 2 er 10-12 °C kaldere enn hytte 1 på dagtid. Ved nattestid var derimot loftsrommet i hytte 2 2-3 °C varmere enn i hytte 1. Dette viser med andre ord at hytten med laminert aerogel holder varmen ute om dagen, mens den i noen grad beholder den om natten. Testene viste også at behovet for kjøling i rommet under loftet var 36% lavere for hytte 2 enn hytte 1.

Selvom studiene viser til kaldere loftsrom med bruk av denne løsningen, er det ikke nødvendigvis slik at dette vil fungere på samme måte i alle klimaer. Om vinteren er det varmetransport ved konveksjon som er mest sentralt. Da stråling utgjør en liten del av den totale varmetransporten, vil den reflekterende barrieren muligens ikke være så effektiv ved vinterstid [79]. I Norge er det ofte et større behov for oppvarming enn nedkjøling grunnet en lang vintersesong, noe som gjør at det kan være lite ønskelig å blokkere strålingen.

Det er også verdt å nevne at testene i studien baseres på effekten av en kombinasjon av den reflekterende barrieren og aerogelen, altså som et system. Forfatterne mener det kan være nødvendig å se på varmetransport ved stråling og ledning hver for seg i framtidige studier.

## 5 Analyse

Analysen tar for seg simuleringer på tre forskjellige løsninger for kompakte tak; to med vakuumisolasjonspaneler og et med aerogel. Disse gjennomføres i dataprogrammet WUFI<sup>®</sup> Pro. Videre beskrives de ulike inputverdiene og innstillingene som utgjør grunnlaget for beregningene. Ytterligere informasjon er å finne i Vedlegg 3 til 8.

### 5.1 Beregningsgrunnlag

WUFI<sup>®</sup> er et dataprogram utviklet ved Fraunhofer Institute for Building Physics i Tyskland. De forskjellige versjonene som tilbys gir muligheter for realistiske beregninger av hygrotermiske forhold i bygningsdeler utsatt for naturlige klimapåkjenninger [80]. WUFI<sup>®</sup> er menystyrt og baserer seg på den nyeste kunnskapen om fuktransport ved vandampdiffusjon og kapillærledning i bygningsmaterialer. Programvaren er validert ved hjelp av detaljerte sammenlikninger med praktiske målinger gjort både utendørs og i laboratorier ved Fraunhofer IBP. I Norge distribueres programmet av NTNU og SINTEF Byggforsk.

I denne oppgaven er versjonen WUFI<sup>®</sup> Pro 6.2 benyttet. Denne versjonen er standard for vurdering av fuktforhold i ytterkonstruksjoner. Programmet utfører endimensjonale hygrotermiske beregninger på tverrsnitt av bygningskonstruksjoner. Programmet tar, i motsetning til andre programmer og tradisjonelle metoder, i betraktning innebygd fukt, slagregn, solstråling, langbølget stråling, kapillær transport og sommerkondens. Beregningsgrunnlaget som videre beskrives gjelder for samtlige av analyseobjektene.

#### 5.1.1 Klima

Før analyseringen kjøres i WUFI<sup>®</sup> Pro må en rekke innstillinger forhåndsbestemmes. Ut i fra spesifiserte betingelser beregner WUFI<sup>®</sup> temperatur- og fuktforandringer gjennom konstruksjonsdelen over tid. Disse forandringene er blant annet prisgitt forhold i omgivelsene, og det må derfor velges klimafilene som setter randvilkårene for disse forholdene. WUFI<sup>®</sup> tilbyr flere filer, for både Japan, Nord-Amerika og Europa, og det må velges klima for både innvendig og utvendig side av bygningsdelen.

Klimafilene som er valgt for utvendig side er gjeldende for Trondheim. I programmet oppgis det at filene baserer seg på timesverdier som er interpolert fra 3-4 målinger per dag, gjort

av Meteorologisk institutt. Timesverdiene er fordelt over et referanseår, slik at klimafilen gjentas automatisk dersom beregningsperioden settes utover dette ene året. Filene inkluderer parametre som relativ fuktighet, diverse vindforhold og forskjellig stråling.

Da filene er generert ut fra såkalte MDRY-filer (Moisture Design Reference Year) vil beregningsperioder på flere år gi en noe større fuktpåkjenning i konstruksjonene enn normalår. I analysene er beregningsperioden satt til fire år, fra 1. januar 2019 til 1. januar 2023. MDRY-filene skal representere en kritisk fuktbelastning med en returperiode på 10 år [81].

Innvendige klimabetingelser angis med utgangspunkt i ISO 13789. Denne internasjonale standarden omhandler bygningers termiske egenskaper og er godkjent i Norge [82]. I tillegg må middelverdi for innetemperatur og fukttilskuddsklasse defineres manuelt. Middelverdi for innetemperatur settes til 20 °C da det antas at bygningsdelene inngår i en privatbolig. Det eksisterer fem forskjellige fukttilskuddsklasser som hver baserer seg på forskjellig bruk av bygget. Basert på middelverdien for innetemperatur og antatt bygningstype blir det naturlig å velge klasse 3. Tabell 5, hentet fra SINTEF Byggforsk [83], viser de ulike fukttilskuddsklassene og deres tilhørende definisjoner.

**Tabell 5:** Beskrivelse av fukttilskuddsklasser [83].

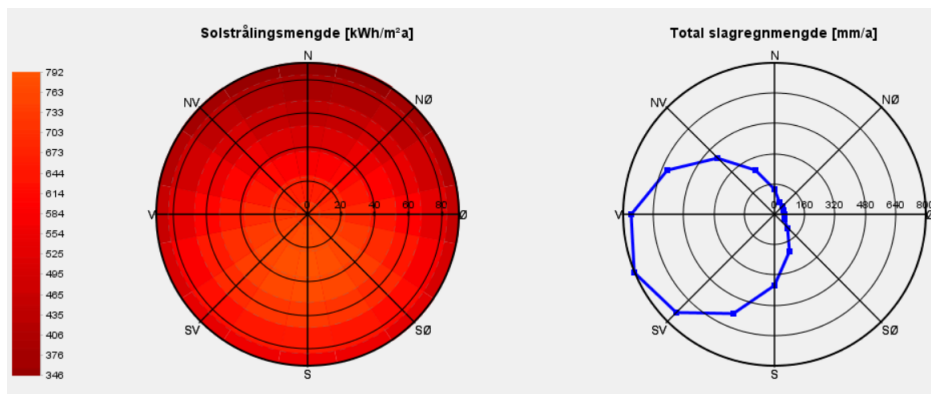
Fukttilskuddsklasse	Bygningstype
1	Lager
2	Kontor, butikk
3	Bolig med få beboere
4	Bolig med mange beboere, idrettshall, kjøkken, kantine
5	Spesielle bygninger: f.eks vaskeri, bryggeri, svømmehall

### 5.1.2 Orientering

Diagrammene i Figur 33 illustrerer både sol- og regnpåkjenningen som er definert i klimafilen for Trondheim. Den største solstrålingsmengden kommer fra sydlig retning og angis i diagrammet med den lyseste rødfargen. Det andre diagrammet illustrerer den totale slagregnmengden, som er mengden regn som av vinden drives inn mot en vertikal flate. Diagrammet viser at fasader rettet mot sør-vest/vest får størst slagregnpåkjenning i løpet av året i Trondheim. Denne informasjonen er avgjørende for valg av orientering til bygnings-



delene, da det er ønskelig å velge orientering slik at klimapåkjenningene på bygningsdelene blir så store som mulig. Dermed vil resultatene av analysene representere det mest kritiske scenarioet og være på den sikre siden. I Trondheim er vestlig retning den størst påkjente og denne vil benyttes som orientering for alle bygningsdeler videre i analysen. Orienteringen er ikke like viktig for horisontale konstruksjoner som for vertikale, da blant annet slagregn ikke oppstår her.



**Figur 33:** Klimaanalyse gjeldende for Trondheim. Til venstre vises solstrålingsmengde og til høyre vises total regnmengde.

### 5.1.3 Overflaters overgangskoeffisienter

Overgangskoeffisienter for indre og ytre overflate inkluderer  $s_d$ -verdier og varmemotstand, samt stråling- og regnvannsparmetre for den ytre overflaten. Alle verdiene kan innstilles manuelt, men WUFI<sup>®</sup> har forhåndsinnstilte alternativer som baserer seg på orientering og overflateegenskaper for vanlige bygningsmaterialer. De forhåndsinnstilte verdiene er benyttet i denne analysen og oppgis i hvert enkelt tilfelle i rapportene i Vedlegg 3 til 8.

### 5.1.4 Startbetingelser

Alle materialer har en større eller mindre startfuktighet. I beregningene angis startfuktighet manuelt for hvert materialsjikt, avhengig av materialenes egenskaper. Det vil gjennomføres simuleringer i flere varianter med ulik andel byggfukt for å se på fuktproblematikken i konstruksjonen. Eksakte verdier er hentet fra informasjon om fuktlagringsfunksjon som ligger inne i materialdataene i WUFI<sup>®</sup>. Her oppgis relativ fuktighet i porene i materialene og korresponderende vannmengde i  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Starttemperaturen angis som en middelværdi for konstruksjonen og settes til 10 °C. Programmet har som standardverdi på 20 °C, men fordi konstruksjonen ikke er oppvarmet ved start stilles den heller ned. For fukt- og varmetransport i bygningskonstruksjoner vil starttemperaturen vanligvis ha liten betydning fordi temperaturfordelingen jevner seg ut med utvendig og innvendig klima i løpet av få timer [81]. Det vil med andre ord derfor være tilstrekkelig å angi en middelværdi som ligger et sted mellom utvendig og innvendig temperatur.

### 5.1.5 Begrensninger

WUFI<sup>®</sup> Pro vil fordi det er et endimensjonalt beregningsprogram ikke kunne ta hensyn til at VIP ikke vil opptre som et gjennomgående sjikt i bygningsdeler. VIP er svært damp- og lufttett, men i realiteten vil både vann og luft kunne slippe gjennom skjøter mellom de enkelte panelene. I flere av skjøtene vil det i vertikale konstruksjoner i realiteten også være innfestningsmekanismer, som trelekter og metallprofiler, og i randsoner av bygningsdelene vil det der det ikke er mulig å tilpasse panelene være nødvendig å fylle igjen med annen isolasjon. Disse elementene har større varmeledningsevne enn VIP og vil kunne forårsake kuldebroer i tillegg til en høyere U-verdi for bygningsdelen enn den WUFI<sup>®</sup> beregner.

WUFI<sup>®</sup> har en innebygd materialdatabase. Å legge inn egne materialer er mulig, men krever inngående informasjon om blant annet fuktlagringsfunksjon, væsketransportskoeffisienter og entalpi med mer. For enkelhets skyld er materialene i de forskjellige analyseobjektene derfor hentet fra databasen. Det er lagt vekt på å velge ut materialer som vil egne seg i konstruksjonene.

Det er valgt å ikke legge inn noen varmekilder, fuktkilder, ventilasjonskilder eller sluk. Disse komponentene, enkelte eller samtlige, vil i virkeligheten være til stede i konstruksjonen som analyseres. Disse kildene kan gjøre resultatene annerledes.

## 5.2 Prinsipiell oppbygning

For å unngå skader i kompakte tak er det ofte en prinsipiell utforming som benyttes. Kompakte tak, også kalt varme tak, finnes i tre varianter. Av de tre er det rettventdt tak som er den mest utbredte [74], og den som blir i hovedfokus.

Bæresystemet er ofte av betong, men kan også være i tre eller stål. Over bærekonstruksjonen legges det alltid et dampsperrsjikt som skal unngå at fuktig inneluft trenger fra innsiden og opp i konstruksjonen. Det aller viktigste er at organiske materialer, som for eksempel tre, ikke bygges inn i konstruksjonen. Det er stor risiko for at disse materialene kan skades av innebygd fukt og kondens i konstruksjonen, noe som kan føre til råte og muggvekst. [84]

Kompakte tak som bygges prinsipielt riktig er sjeldent utsatt for skader. Dersom det først skjer er det hovedsaklig feil eller utettheter som gjør det mulig at regnvann kan trenge inn i konstruksjonen eller at det oppstår fuktskader på grunn av kondens. Problemer med inn-trengning av regnvann er oftest i overganger, rennepartier og ved utettheter i taktekningen. Dersom dampsperran ikke gjennomføres riktig kan det oppstå problemer i form av at fuktig inneluft trenger opp i konstruksjonen og øker risikoen for fuktproblematikk og kondens inni konstruksjonen. [84]

Nedenfor listes det opp en rekke hensyn som må tas ved oppbygging av kompakte tak for å unngå at skader oppstår, hentet fra [84]:

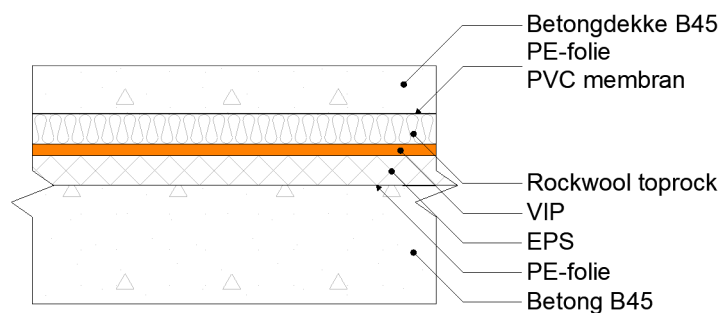
1. Nok fall på takflaten. Her skal det være minst 1:40 på takflaten og 1:60 i renner.
2. Unngå hindringer som kan samle opp vann. Dersom installasjoner eller takvinduer skal plasseres på takflaten må de plasseres i høybrekkene.
3. Unngå at smeltevann om vinteren fryser i nedløpene. Her burde nedløp ligge på innvendig side (isolert fra kulden) slik at smeltevann kan renne vekk fra takflaten før det får muligheten til å fryse.
4. Unngå utettheter i tekkingen rundt parapet eller andre kompliserte overganger. Oppkanter i tekkedetaljene bør være minst 150 mm høye.
5. Unngå utettheter fra innsiden som fører varm inneluft opp i konstruksjonen. Luftlekkasjer fra innvendig side kan føre til kondens på materialoverflatene. Er det kaldt nok i konstruksjonen kan kondensen bli til rim eller is. Her må dampsperran gjennomføres nøyaktig og med sveiste skjøter [74]. Dette problemet oppstår gjerne dersom bærekonstruksjonen er av stål, da det er vanskelig å oppnå tette skjøter i dampsperran dersom den ligger direkte på stålet [74].

### 5.3 Terrassekonstruksjon med VIP

Terrassekonstruksjoner er per i dag et av områdene VIP i størst grad er tatt i bruk. Fordelen med implementeringen av VIP i disse konstruksjonene er at det gir mulighet for en trinnfri overgang mellom innvendig og utvendig side. I rehabiliteringsprosjekter gjør også tilstøtende konstruksjoner, vinduer og dører at det er begrenset med plass for isolasjon.

#### 5.3.1 Terrassekonstruksjon med betongdekke

Oppbyggingen av den første terrassekonstruksjonen som vurderes er illustrert i Figur 34. I Tabell 6 er materialsjiktene med tilhørende tykkelser og konduktiviteter oppgitt. Takterrassen er bygget opp som et kompakt tak.



**Figur 34:** Detaljtegning av terrassekonstruksjonen med VIP og betongdekke.

**Tabell 6:** Oppbygning med materialtykkelser og konduktivitet i takterrasse med VIP og betongdekke.

Materialer	Tykkelse [mm]	Konduktivitet [W/(mK)]
Betong B45	80	1,6
PE-folie	0,2	1,65
PVC membrane	1,52	0,2
ROCKWOOL TOPROCK DD	50	0,036
VIP generic	20	0,007
EPS	50	0,04
PE-folie	0,2	1,65
Betong B45	200	1,6

Den bærende konstruksjonen i takterrassen, samt dekkematerialet, består av betong. Her benyttes betongtypen B45, da B15 er eneste andre alternativet i materialdatabasen. Her

ville det i realiteten vært optimalt å benytte en type midt mellom de to alternativene. For å være på den sikre siden velges B45, da denne typen betong er sterkere enn B15 [85]. Over den bærende konstruksjonen plasseres et lag med PE-folie under et lag med EPS. EPS er trykkfast isolasjon som egner seg godt i rettvendte kompakte tak [74].

Laget med VIP generic er det eneste tilgjengelige i materialdatabasen. Konduktiviteten som oppgis er dimensjonerende og tar hensyn til aldring og kantkuldebroeffekt. Over panelet er det valgt å benytte Rockwool Toprock DD som et beskyttende lag. Steinull er hydrofobisk og trekker ikke til seg vann [86, 87]. Deretter legges det et lag med PVC-membran som fungerer som et tettesjikt. Like under betongdekket plasseres en PE-folie.

Konstruksjonen oppnår en samlet tykkelse på 406 mm, en varmemotstand på  $5,7 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  og en U-verdi på  $0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Fuktinnholdet i de forskjellige materialsjiktene er ved start som oppgitt i Tabell 7. Fuktinnholdet er angitt etter hva som er typisk for hvert materiale. Betong har et svært høyt vanninnhold etter produksjon, mens folier, membraner og VIP ikke har noe vanninnhold i det hele tatt.

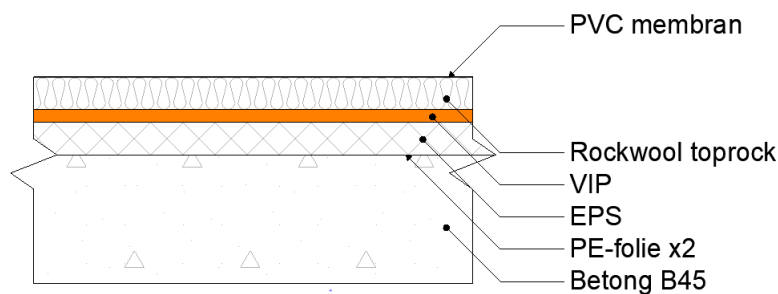
For å bedre kunne vurdere om det kan oppstå problemer med fukt i konstruksjonen er det valgt å se på to ulike varianter der fuktinnhold ved start varieres. I den ene varianten legges det inn mer byggfukt enn i det andre. Det er bare steinullen og EPS-en som som er relevante for å vurdere fuktproblematikken, fordi konstruksjonen er tett, og det er derfor bare i disse at fuktinnholdet forandres.

**Tabell 7:** Startfuktighet i hvert materialsjikt i terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke.

<b>Materiale</b>	<b>Lite byggfukt</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Mer byggfukt</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
Betong B45	147	147
PE-folie	0	0
PVC membrane	0	0
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,002	0,01
VIP generic	0	0
EPS	0,46	1,06
PE-folie	0	0
Betong B45	140	140

### 5.3.2 Terrassekonstruksjon uten betongdekke

Det er også valgt å se på en variant av konstruksjonen uten betongdekket. Terrassen vil da bygges opp som illustrert i Figur 35 og beskrevet i Tabell 8. Den nye samlede tykkelsen blir 326 mm, varmemotstanden kommer på 5,66 (m<sup>2</sup>K)/W og U-verdien blir 0,171 W/(m<sup>2</sup>K).



**Figur 35:** Detaljtegning av terrassedekket med VIP uten betongdekke.

**Tabell 8:** Oppbygning med materialtykkelser og konduktivitet i takterrasse med VIP og uten betongdekke.

Materialer	Tykkelse [mm]	Konduktivitet [W/(mK)]
PVC membrane	1,52	0,2
ROCKWOOL TOPROCK DD	50	0,036
VIP generic	20	0,007
EPS	50	0,04
PE-folie	0,2	1,65
PE-folie	0,2	1,65
Betong B45	200	1,6

I denne varianten er konstruksjonen åpen for lufting ved dekket, noe den med betongdekke ikke er. I stedet for å bruke betong er det mulig å benytte treplanker som dekke på terrassen. Treplankene vil derimot ikke ha noen innvirkning på fuktforholdene i konstruksjonen, og de er derfor neglisjert i beregningene. Over den bærende betongkonstruksjonen er det lagt et dobbelt lag PE-folie for å forsikre at fukt ikke trenger inn i konstruksjonen fra innvendig side. Utover dette er konstruksjonen identisk med varianten med betongdekke.

Også i denne konstruksjonen er det valgt å se på to tilfeller; ett med svært lite byggfukt i de konvensjonelle isolasjonsmaterialene, og ett der det er mer byggfukt ved start, som

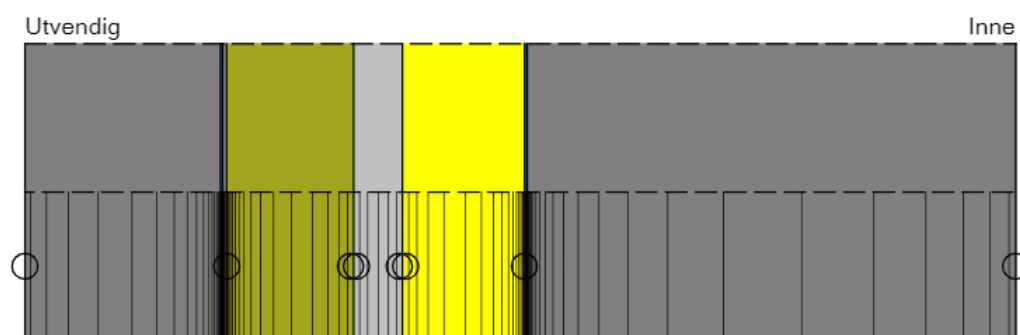
presentert i Tabell 9.

**Tabell 9:** Startfuktighet i hvert materialsjikt i terrassekonstruksjonen med VIP og uten betongdekke.

Materiale	Lite byggfukt [kg/m <sup>3</sup> ]	Mer byggfukt [kg/m <sup>3</sup> ]
PVC membrane	0	0
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,002	0,01
VIP generic	0	0
EPS	0,46	1,06
PE-folie	0	0
PE-folie	0	0
Betong B45	140	140

### 5.3.3 Monitorposisjoner

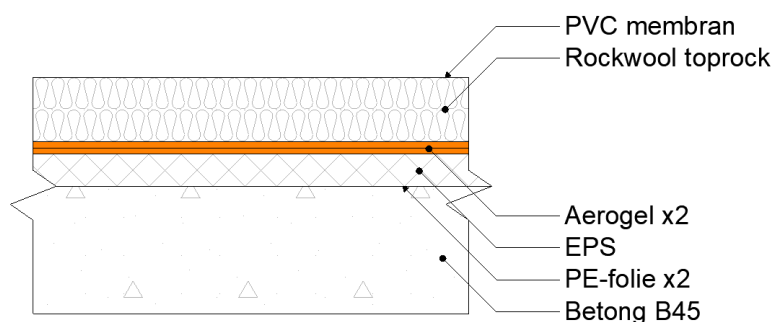
WUFI<sup>®</sup> legger automatisk inn en monitor på utvendig og innvendig overflate av konstruksjonsdelen. Monitorene overvåker utviklingen av fukt- og temperaturforholdene i den gitte plasseringen. Det plasseres i tillegg monitorer i de områdene det trolig vil være relevant å følge denne utviklingen. Dette gjelder i hovedsak isolasjonssjiktene. I analyseobjektene med VIP plasseres monitorer i ytterkantene av de tre isolasjonssjiktene; steinullen, VIP-en og EPS-en. Dette vil si at det er monitorerer både på utsiden og innsiden av folien på panelet. I Figur 36 illustreres monitorposisjonene i terrassekonstruksjonen med betongdekke. De samme plasseringene gjelder for varianten uten betongdekke, med unntak av at monitoren på utvendig side havner på PVC-membranen. Konkrete plasseringer for hver konstruksjonsvariant med VIP er illustrert i prosjektdataene i Vedlegg 3 til 6.



**Figur 36:** Monitorposisjoner i konstruksjonsvarianten med VIP og betongdekke. Disse illustreres med sirkler.

## 5.4 Terrassekonstruksjon med aerogel

I litteraturen er det lite eksempler på anvendelse av aerogel i flate tak. På bakgrunn av aerogelens egenskaper er det ingen åpenbare grunner for hvorfor den ikke skal kunne brukes her. Det vil derfor være interessant å undersøke denne muligheten, ikke minst for å kunne se hvordan forholdene i konstruksjonen endrer seg i forhold til med VIP. For å ha et best mulig sammenlikningsgrunnlag er det valgt å bygge opp konstruksjonen omtrent likt som med VIP uten betongdekke, se Figur 37 og Tabell 10.



**Figur 37:** Detaljtegning av terrassedekket med aerogel og uten betongdekke.

**Tabell 10:** Oppbygning med materialtykkelser og konduktivitet i takterrasse med aerogel og uten betongdekke.

Materialer	Tykkelse [mm]	Konduktivitet [W/(mK)]
PVC membrane	1,52	0,2
ROCKWOOL TOPROCK DD	100	0,036
Aspen Aerogel Spaceloft Grey	20	0,014
EPS	50	0,04
PE-folie	0,2	1,65
PE-folie	0,2	1,65
Betong B45	200	1,6

For å imøtekomme minstekrav til U-verdi er tykkelsen på Rockwoolsjiktet nå satt til 100 mm. I praksis vil det sannsynligvis ikke brukes både EPS og Rockwool i kombinasjon med aerogelen, men kun et enkelt, tykkere sjikt med en av delene. Konstruksjonen får en samlet tykkelse på 374 mm, en varmemotstand på 5,48 (m<sup>2</sup>K)/W og en U-verdi på 0,177 W/(m<sup>2</sup>K). Fuktinnehold ved start er angitt i Tabell 11.

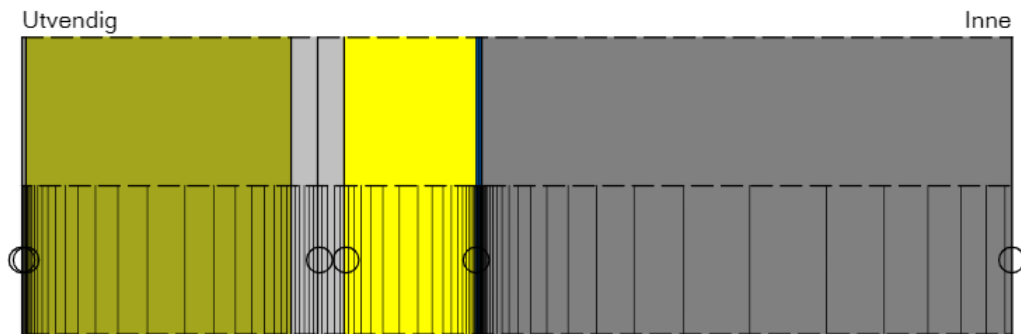


**Tabell 11:** Startfuktighet i hvert materialsjikt i terrassekonstruksjonen med aerogel.

Materiale	Lite byggfukt [kg/m <sup>3</sup> ]	Mer byggfukt [kg/m <sup>3</sup> ]
PVC membrane	0	0
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,002	0,01
Aspen Aerogel Spaceloft Grey	4,72	5,3
EPS	0,46	1,06
PE-folie	0	0
PE-folie	0	0
Betong B45	140	140

#### 5.4.1 Monitorposisjoner

I konstruksjonen med aerogel er det plassert monitorer i ytterkantene av steinullen og EPS-en, i tillegg til midt mellom de to aerogelmattene. I Figur 38 illustreres monitorposisjonene i terrassekonstruksjonen med aerogel uten betongdekke. Konkrete plasseringer for begge varianter illustrert i prosjektdataene i Vedlegg 7 og 8.



**Figur 38:** Monitorposisjoner i konstruksjonsvarianten med aerogel og uten betongdekke. Disse illustreres med sirkler.

## 6 Resultater

### 6.1 Kvalitetssikring

For at resultatene skal kunne brukes som et vurderingsgrunnlag for konstruksjonenes hygrottermiske forhold er det nødvendig å ta særlig to faktorer i betraktning; antall konvergensfeil og massebalanse [81]. Massebalansen avhenger av antall konvergensfeil og avrundinger, og vurderes ved å betrakte verdiene Balanse 1 og Balanse 2. Dersom antall konvergensfeil overstiger rundt 50 per år, med tidstrinn på en time, bør inngangsdataene revurderes. Balansene i samtlige av analysene er like og antall konvergensfeil er 13 eller mindre. Resultatene vurderes ut i fra dette som pålitelige.

### 6.2 Terrassekonstruksjon med VIP

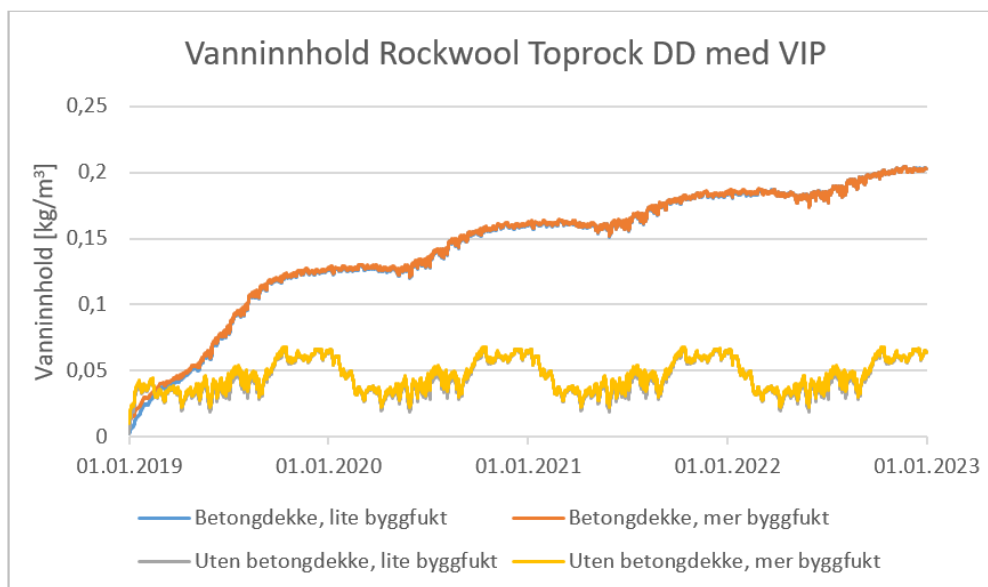
De samlede resultatene fra beregningene i konstruksjonene med VIP er å finne i Vedlegg 3 til 6. Videre vil de resultatene som er de mest relevante for diskusjonen presenteres.

#### 6.2.1 Vanninnhold

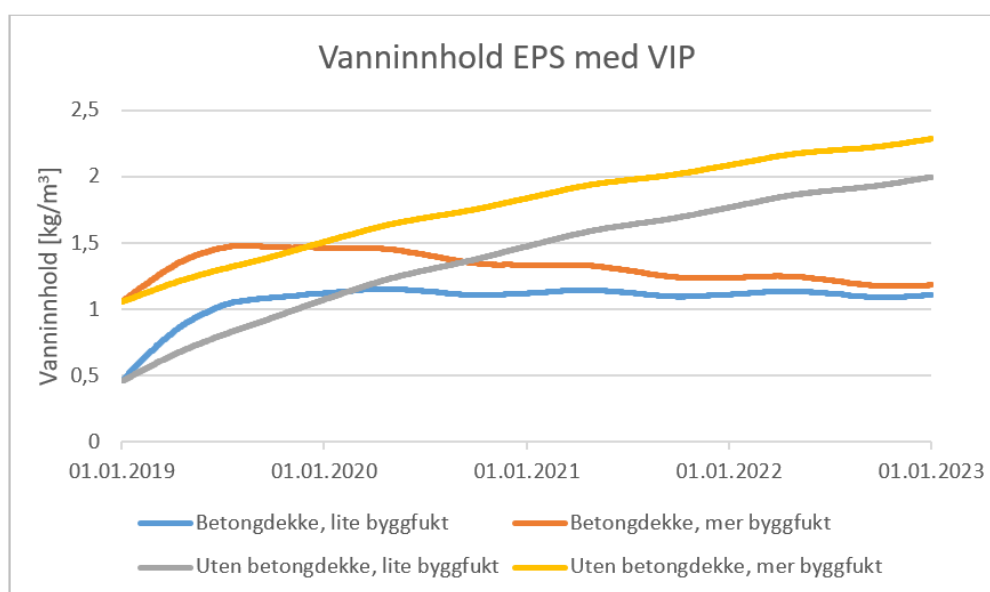
Vanninnholdet i konstruksjoner er relevant for å kunne vurdere faren for råte, mugg, frostskafer, økt varmetap og andre uakseptable forhold. Det totale vanninnholdet, som er den sammenlagte verdien av vanninnholdet i hvert enkelt sjikt, kan indikere hvorvidt fuktighet har akkumulert eller tørket ut gjennom simuleringsforløpet. Grafene er å finne i Vedlegg 3 til 6. Det viktigste er at det totale vanninnholdet i konstruksjonen enten synker eller stabiliserer seg og når fuktlikevekt, noe som er tilfelle for alle konstruksjonsvariantene med VIP. Videre er vanninnholdet i de enkelte materialsjiktene det mest interessante. I terrassekonstruksjonene er det vanninnholdet i steinullen og EPS-en det er relevant å ta i betraktning. Disse verdiene er presentert i Figur 39 og 40. Vertikalaksen angir vanninnhold i  $\text{kg/m}^3$  og horisontalaksen angir tid i alle grafene for vanninnhold.

Vanninnholdet i steinullen i konstruksjonene med betongdekke viser en økende trend og ser ikke ut til å stabilisere seg i løpet av det fireårige simuleringsforløpet. I variantene uten betongdekke nås derimot fuktlikevekt raskt. Det er liten forskjell på variantene med og uten byggfukt. Vanninnholdet i EPS-en oppfører seg motsatt; i variantene med betongdekke stabiliserer det seg, mens det i variantene uten betongdekke øker og ikke rekker å

stabilisere seg. I EPS-en er det også større forskjell på variantene med og uten byggfukt.



**Figur 39:** Vanninnhold i steinullen i de forskjellige konstruksjonsvariantene med VIP. Innholdet i variantene med og uten betongdekke er så like at grafene overlapper hverandre og er vanskelige å skjelne.



**Figur 40:** Vanninnhold i EPS-en i de forskjellige konstruksjonsvariantene med VIP.

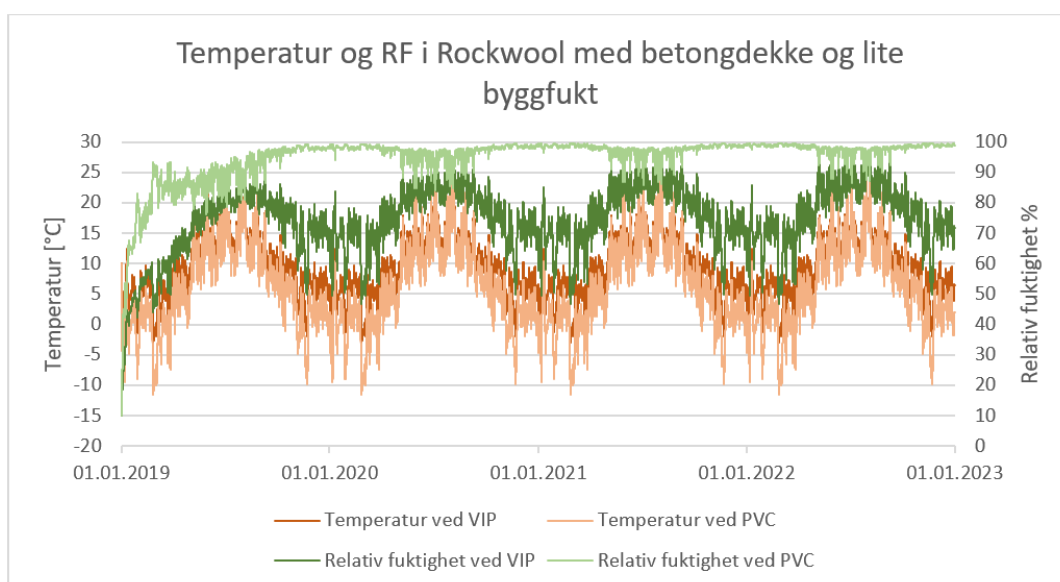
I Tabell 12 presenteres den relative fuktigheten i porene korresponderende med vanninnholdet i materialene. For konstruksjonen med betong er verdiene like både med lite og mer byggfukt. For konstruksjonen uten betong er kun verdiene for varianten med mer byggfukt inkludert.

**Tabell 12:** Relativ fuktighet i porer i Rockwool og EPS i konstruksjonene med VIP.

Isolasjonssjikt	Relativ fuktighet i porer [%]
VIP og betongdekke Rockwool	$\approx 95$
VIP og betongdekke EPS	$> 75$
VIP uten betongdekke Rockwool	80
VIP uten betongdekke EPS	85

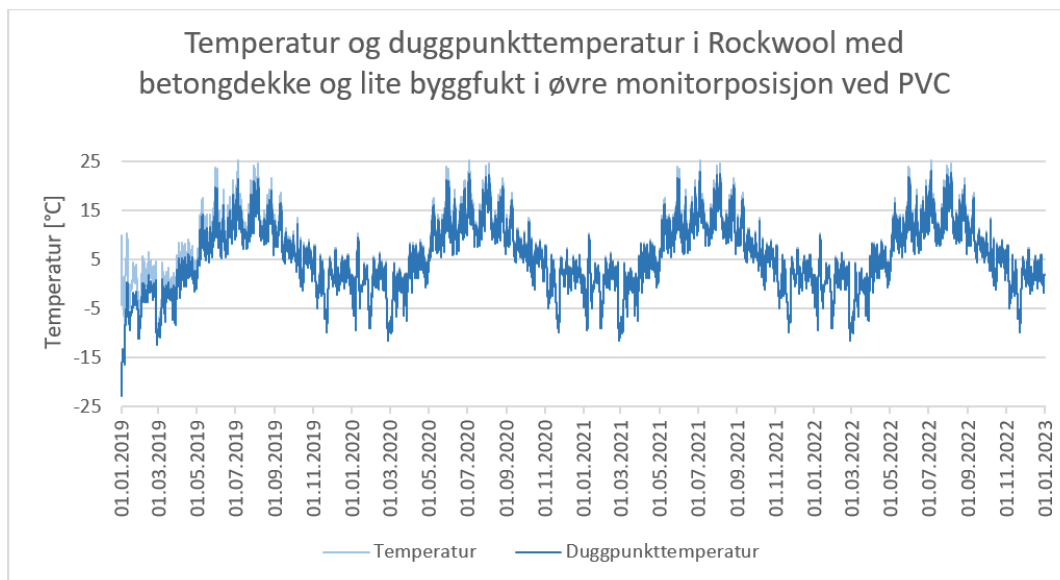
### 6.2.2 Relativ fuktighet og duggpunkt

Den relative fuktigheten i monitorposisjonene gir sammen med temperaturen og duggpunkttemperaturen en indikasjon på hvordan konstruksjonen fungerer. I steinullsjiktet i terrassevarianten med betongdekke er det lite variasjon i temperatur og RF med varierende byggfukt. Derfor presenteres kun varianten med lite byggfukt. Det er derimot en vesentlig forskjell mellom forholdene i steinullen rett over VIP-en og rett under PVC-membranen. Relativ fuktighet og temperatur i disse to monitorposisjonene er presentert i Figur 41. Vertikalaksen angir både temperatur i °C og relativ fuktighet i %, mens horisontalaksen angir tid i alle grafene for relativ fuktighet. Grafene som viser duggpunkt har vertikalakse som angir temperatur i °C og horisontalaksen angir tid. Dette gjelder for alle grafene for duggpunkt.



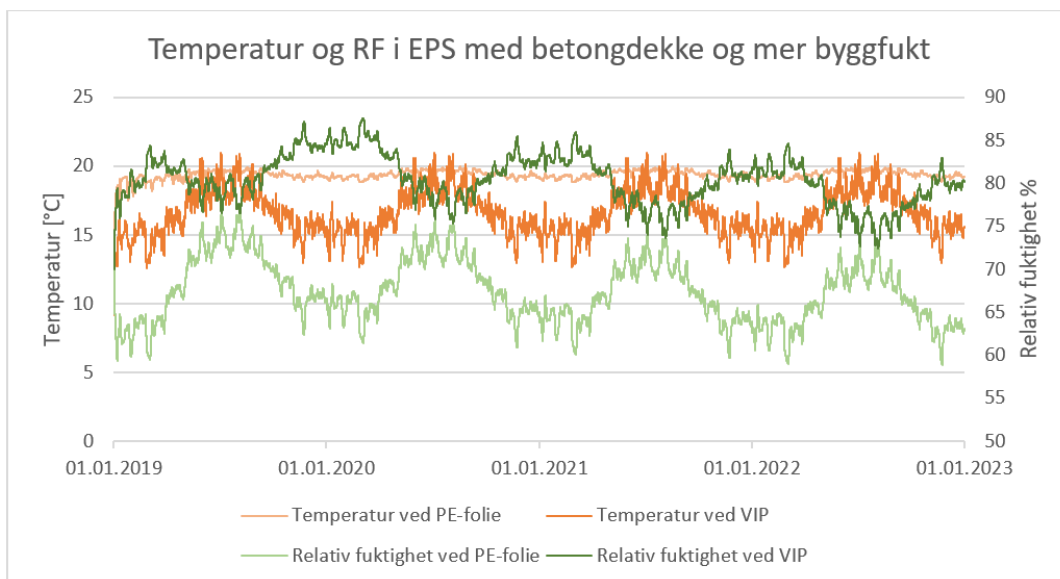
**Figur 41:** Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i Rockwoolsjiktet i konstruksjonsvarianten med betong og lite byggfukt.

WUFI<sup>®</sup> beregner også duggpunkttemperatur, som illustreres i Figur 42. Her er det kun valgt å presentere verdiene fra monitorposisjonen som ligger øverst i steinulls sjiktet, under PVC-membranen, da verdier for RF ligger høyere her enn lenger ned i sjiktet og anses som mest kritiske.



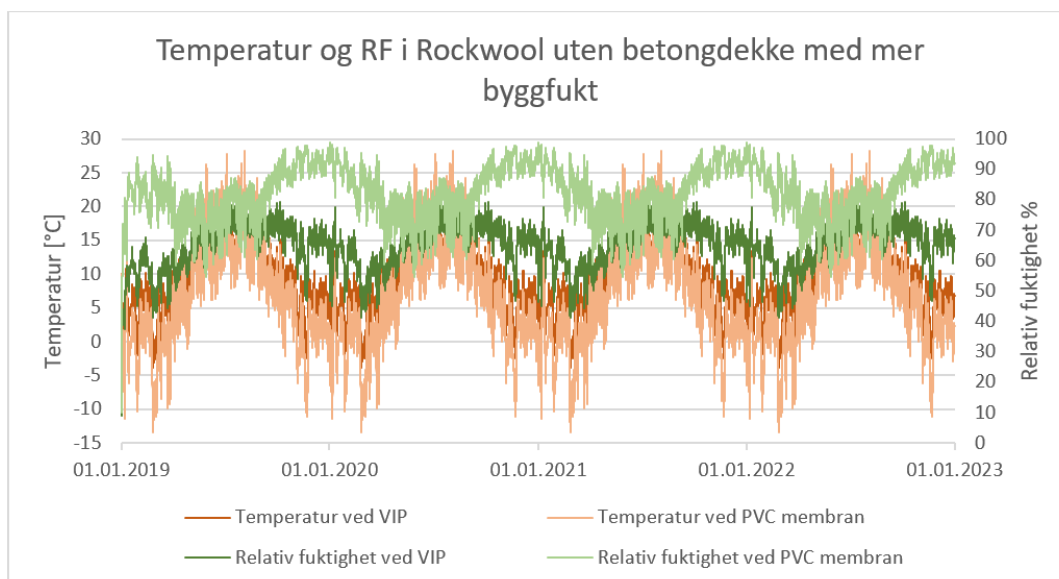
**Figur 42:** Temperatur og duggpunkttemperatur i Rockwoolsjiktet i øverste monitorposisjon i konstruksjonsvarianten med betongdekke og lite byggfukt.

I Figur 43 er relativ fuktighet og temperatur EPS-sjiktet i terrassevarianten med betongdekke og mer byggfukt presentert. Her er temperaturen generelt høyere og mindre variabel enn i steinulls sjiktet, noe som godt illustrerer VIPs isolerende egenskaper.



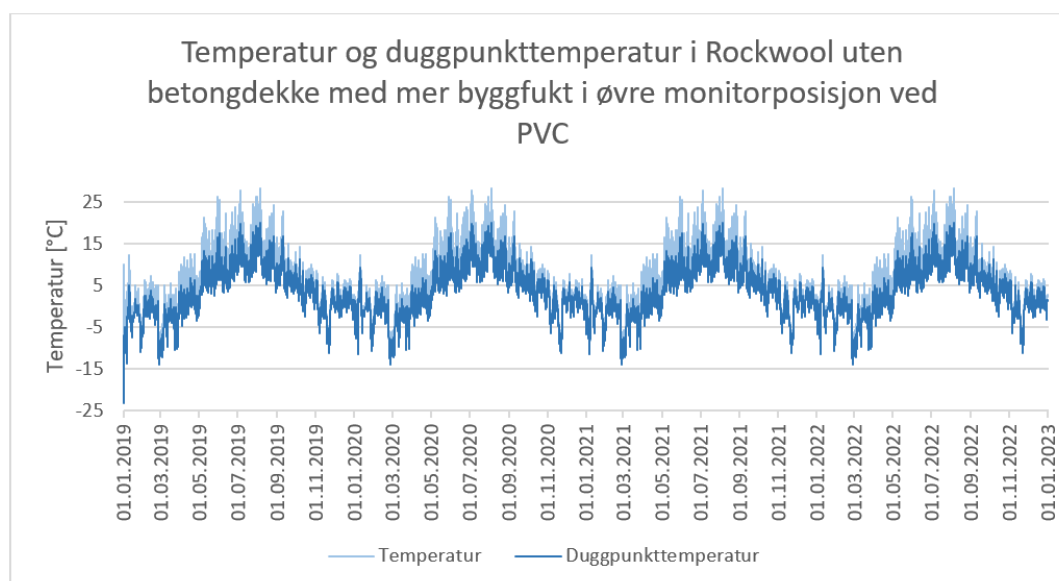
**Figur 43:** Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i EPS-sjiktet i konstruksjonsvarianten med betong og mer byggfukt.

Også i konstruksjonsvarianten uten betongdekke er det lite variasjon i temperatur og relativ fuktighet som følge av forskjellig mengde byggfukt i steinullsiktet. Figur 44 presenterer derfor tilfellet med mer byggfukt fra start. Sammenliknet med resultatene i Rockwoolen i konstruksjonen uten betong er forholdene relativt like nær VIP-en, med unntak av litt større variasjoner i både temperatur og relativ fuktighet.



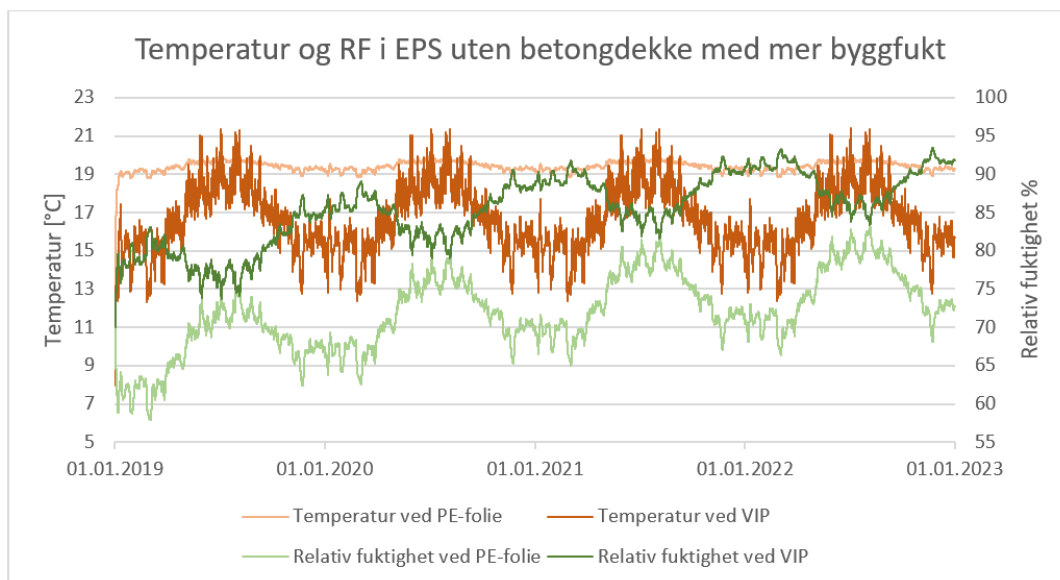
**Figur 44:** Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i Rockwoolsjiktet i konstruksjonsvarianten uten betong med mer byggfukt.

I Figur 45 er korresponderende duggpunkttemperatur i den øverste monitorposisjonen presentert. Her er duggpunkttemperaturen under temperaturen i konstruksjonen.

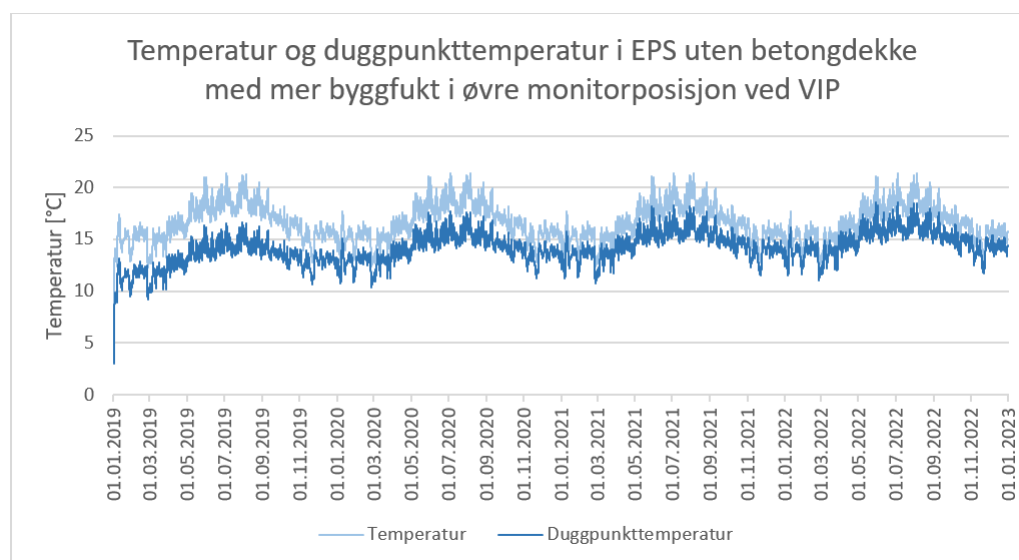


**Figur 45:** Temperatur og duggpunkttemperatur i Rockwoolsjiktet i øverste monitorposisjon i konstruksjonsvarianten uten betongdekke med mer byggfukt.

Figur 46 viser den relative fuktigheten og temperaturen i monitorposisjonene i EPS-sjiktet i konstruksjonsvarianten uten betong med mer byggfukt og Figur 47 viser temperaturen og duggpunkttemperaturen i monitorposisjonen øverst ved VIP-en, der forholdene er mest kritiske. Grafene viser en økning i relativ fuktighet og duggpunkttemperatur gjennom simuleringsforløpet.



**Figur 46:** Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i EPS-sjiktet i konstruksjonsvarianten uten betong med mer byggfukt.



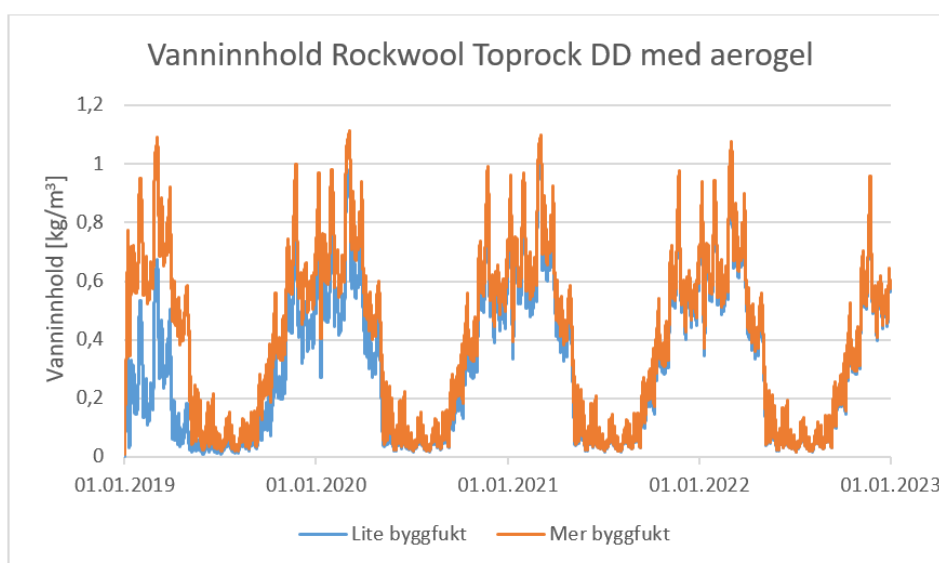
**Figur 47:** Temperatur og duggpunkttemperatur i EPS-sjiktet i øverste monitorposisjon i konstruksjonsvarianten uten betongdekke med mer byggfukt.

## 6.3 Terrassekonstruksjon med aerogel

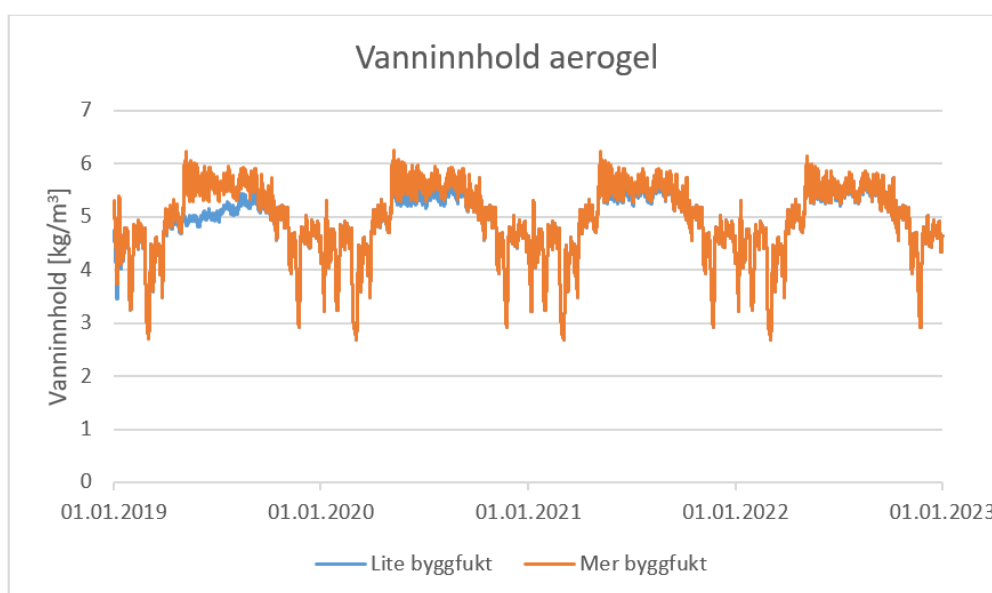
De samlede resultatene fra simuleringene i konstruksjonen med aerogel er å finne i Vedlegg 7 og 8. Videre er de mest relevante resultatene presentert.

### 6.3.1 Vanninnhold

I konstruksjonen med aerogel er det interessant å se på vanninnholdet i både Rockwoolen, aerogelen og EPS-en. Grafene med utviklingen av vanninnholdet er presentert i henholdsvis Figur 48, 49 og 50.



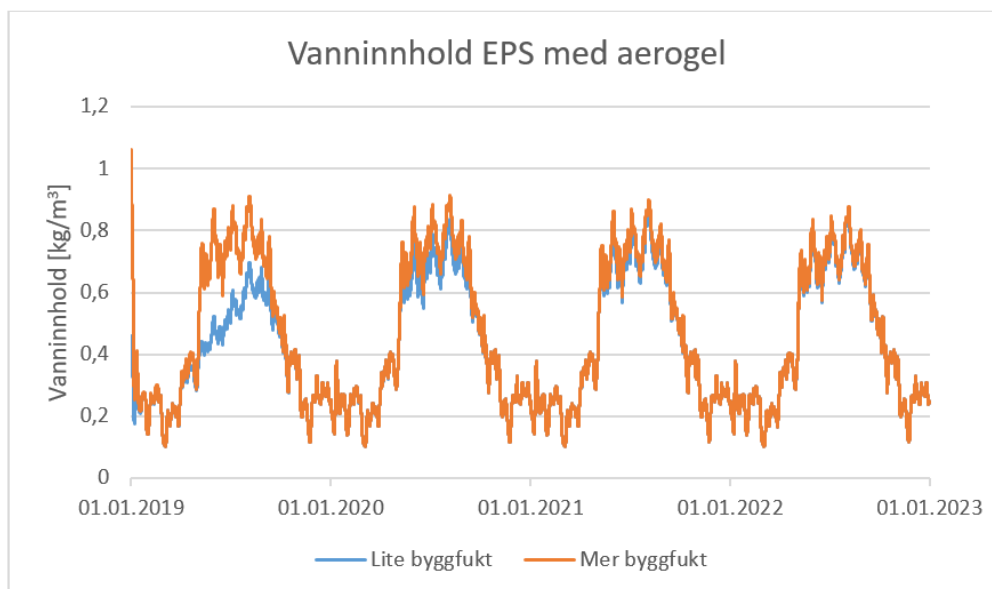
**Figur 48:** Vanninnhold i steinullen i konstruksjonsvarianten med aerogel.



**Figur 49:** Vanninnhold i aerogel.



Det er to lag med aerogel i konstruksjonen, og det er her valgt å kun presentere det sjiktet som får det høyeste vanninnholdet, da forskjellen er minimal. I alle isolasjonssjiktene i konstruksjonen med aerogel stabiliserer vanninnholdet seg raskt. Det har også lite å si hvorvidt mengden byggfukt endres. Forskjellen er at vanninnholdet i simuleringene med lite byggfukt må justeres opp fra start før det stabiliserer seg.



**Figur 50:** Vanninnhold i EPS-en i konstruksjonsvarianten med aerogel.

Tabell 13 presenterer den relative fuktigheten i porene korresponderende med vanninnholdet i materialene. Både med lite og mer byggfukt er verdiene like og RF-en som presenteres er basert på en øyemålt gjennomsnittsverdi.

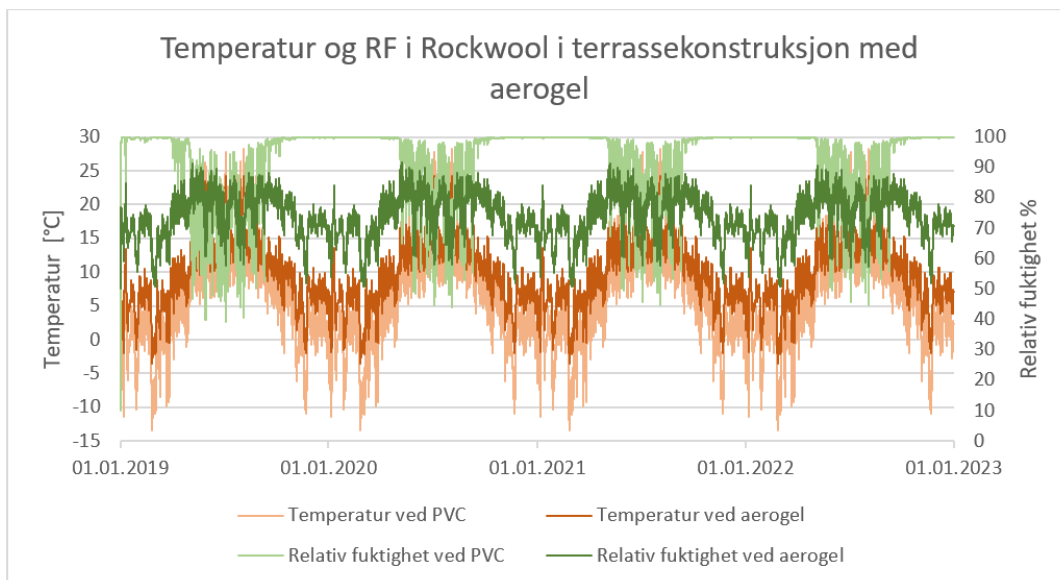
**Tabell 13:** Relativ fuktighet i porer i Rockwool, aerogel og EPS.

Isolasjonssjikt	Relativ fuktighet i porer [%]
Rockwool	≈ 97
Aerogel	≈ 60
EPS	≈ 60

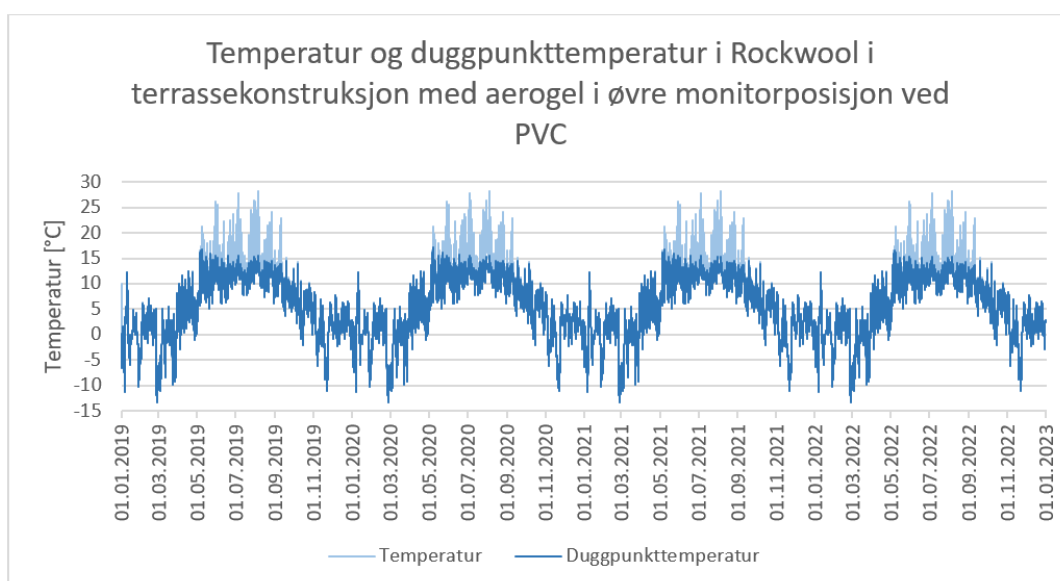
### 6.3.2 Relativ fuktighet og duggpunkt

Temperaturen og den relative fuktigheten i begge monitorposisjoner i Rockwoolsjiktet er presentert i Figur 51. Vinterstid er den relative fuktigheten høy i den øverste delen av

sjiktet, ved PVC-membranen. Ved betraktning av duggpunkttemperaturen i den øvre monitorposisjonen, som er presentert i Figur 52, ser det ut til at den i løpet av vintermånedene overlapper med temperaturen ved flere anledninger og insinuerer at kondens felles ut.

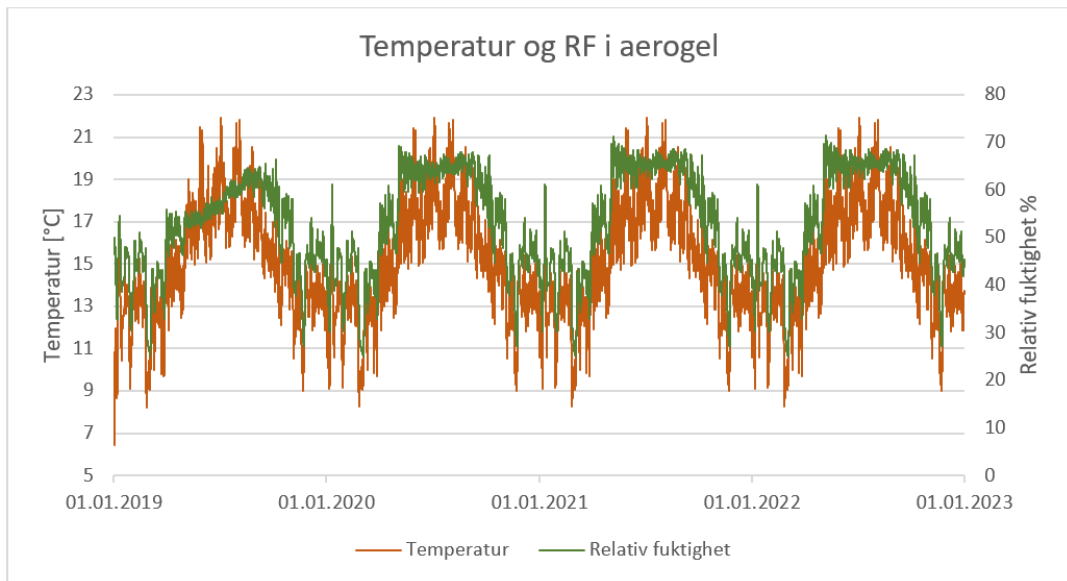


**Figur 51:** Temperatur og relativ fuktighet i Rockwoolsjiktet i konstruksjonen med aerogel.

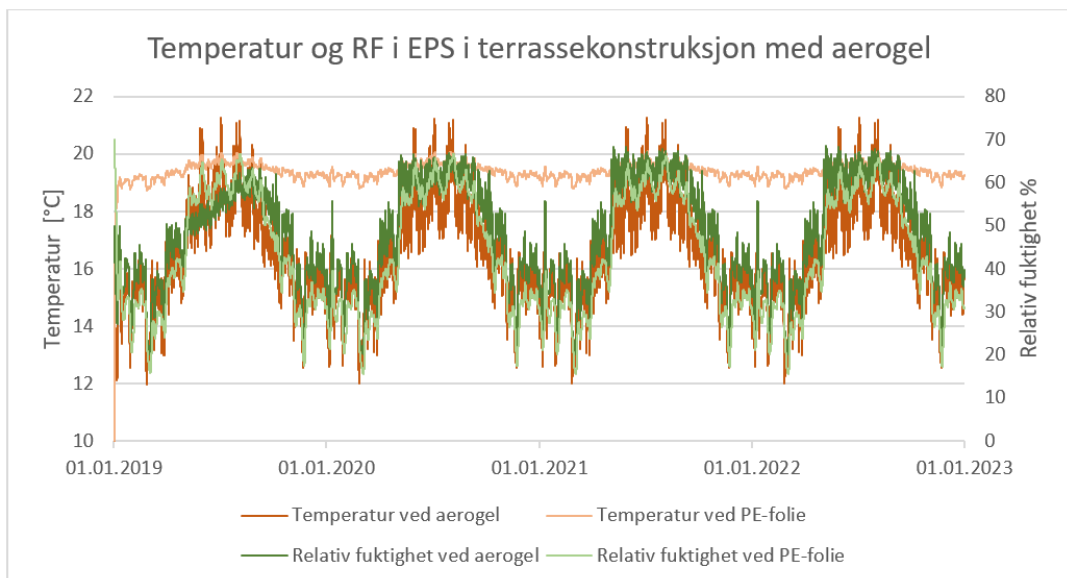


**Figur 52:** Temperatur og duggpunkttemperatur i øverste monitorposisjon i Rockwoolsjiktet i terrassekonstruksjonen med aerogel.

I Figur 53 presenteres temperaturen og den relative fuktigheten i aerogelen og i Figur 54 presenteres temperaturen og den relative fuktigheten i EPS-sjiktet.



**Figur 53:** Temperatur og relativ fuktighet i aerogelen.



**Figur 54:** Temperatur og relativ fuktighet i EPS-en i terrassekonstruksjonen med aerogel.

## 7 Diskusjon

### 7.1 Bruksområder med VIP og aerogel

*“Isolasjonsmaterialene vakuumisolasjonspaneler og aerogel sine muligheter i byggebransjen skal kartlegges ved å se på bruksområder som har størst potensiale på bakgrunn av materialenes egenskaper og dagens løsnings utfordringer.”*

Bruksområdene som er undersøkt er hentet fra litteratur fra flere land i verden, og særlig Østerrike, Sveits og Tyskland. Disse landene er i front når gjelder implementering og forskning på VIP og aerogel i bygninger. Som en naturlig følge er løsningene som presenteres tilpasset og preget av de klimatiske forholdene i disse landene. Det er derfor nødvendig med mer forskning og kvalifiserte vurderinger på om løsningene med materialene kan benyttes i andre typer klima, da dette har en stor innvirkning på de bygningsfysiske forholdene i konstruksjonsdelene.

Norge er et land preget av store høydeforskjeller og lang utstrekning, som har både temperert regnklima, kaldtemperert klima og polarklima. Det kreves lokal kunnskap for å kunne lage egnede byggt tekniske løsninger i forskjellige områder for å unngå problemer som blant annet råte og frost. Til tross for at mange av eksemplene er utført i andre land enn i Norge, tilsier enkelte faktorer at materialene vil kunne egne seg her også. Blant annet vil en lavere gjennomsnittstemperatur muligvis kunne bidra til å senke hastigheten til luft- og fuktinntrengningen i VIP sammenlignet med høyere gjennomsnittstemperaturer. Dette bidrar til forlenget levetid og dermed bedre vilkår for å benytte VIP i nordiske klimaer [3, 19]. Aerogel viser også til egenskaper som egner seg til det nordiske klimaet, da U-verdien til et aerogelvindu vil holde seg stabil selvom temperaturforskjellen ute og inne overstiger 20 °C [64].

Eksemplene fra de tyskspråklige landene er i tillegg preget av en kontinental byggekikk. Denne skiller seg fra den norske, som i stor grad baserer seg på konstruksjonsmaterialer i tre. Flertallet av småhus i Norge bygges i tre, og for å gjøre en inntreden av superisolasjonsmaterialene i norsk byggebransje mest mulig attraktiv vil det være nyttig å utforske hvordan mulighetene er for å benytte dem i bindingsverk. Det som gjør det vanskelig å benytte seg av superisolasjon i bindingsverk er at stenderne vil utgjøre kuldebroer når iso-

lasjonen plasseres mellom dem. Lastene krever i tillegg at stenderne har visse dimensjoner, som kan gi store hulrom dem i mellom. Disse hulrommene må fylles igjen for å unngå konveksjon, og mengdene superisolasjon som må brukes for å få til dette kan bli overflødige både med tanke på pris og varmemotstand. En kombinasjonsløsning med både superisolasjon og konvensjonell isolasjon vil her kunne redusere dette problemet.

Til tross for at konstruksjoner med stenderverk antakelig ikke er det området som er best tjent på å benytte superisolasjon, er et argument for muligheten at stendernes dimensjoner kan holdes til et minimum. Å isolere vegger med tradisjonell isolasjon slik at de oppnår dagens krav krever tykkelser som gjør at stenderne i småhus ofte må overdimensjoneres i forhold til hvor mye last de skal bære. Med superisolasjon, eller en kombinasjonsløsning som nevnt ovenfor, vil materialbruk og areal dermed kunne spares noe inn som et resultat av en redusert påkrevd isolasjonstykkelse.

Den foreløpig høye prisen på materialene gjør at de per i dag er mest aktuelle å implementere i større konstruksjoner, som har bæresystem i stål og betong, da det her er større gevinster å hente. I betongkonstruksjoner, som støpes i kontinuerlige sjikt, oppstår ikke hulrom på samme måte som i bindingsverk. Her legges isolasjonen enten på utsiden eller innsiden av bygningsdelen og problemene med kuldebroer og overdimensjonert isolasjon kan unngås. Dette gjelder også for massivtre, og det bør derfor være mulig å benytte superisolasjon kombinert med dette materialet. Dette er det foreløpig få eksempler på og muligheten er verdt å utforske videre.

I mange av bruksområdene som er beskrevet for VIP og aerogel oppnår konstruksjonene U-verdier som er høyere enn det som kan tilfredsstillе dagens krav. På den annen side er det i mange tilfeller snakk om rehabilitering av eldre bygninger, som hadde en enda dårligere U-verdi i utgangspunktet. Det kan her argumenteres for bruken av VIP og aerogel i konstruksjonene, men kanskje ikke godt nok til å forsvare prisen på materialene. Da det også kan forventes at denne synker i fremtiden og kan det argumenteres at materialene vil da bli mer konkurransedyktige enn de er i dag. I mange av studiene oppgis ikke U-verdier til eksempelkonstruksjonene, og det er nødvendig med flere resultater fra flere studier for å kunne fastslå om superisolasjonen kan tilfredsstillе dagens krav. Tabell 14 lister opp U-verdiene som har vært angitt i eksemplene som er dekket.

**Tabell 14:** U-verdi før og etter i rehabiliterte konstruksjoner.

Eksempel	Isolasjon	U-verdi før	U-verdi etter
Vegg i Zürich [27]	Aerogelmatte 20 mm	< 1,2	0,4
Vegg i Biel [27]	Granulert aerogel	1,1	0,18
Vegg i Karlsruhe [18]	VIP med PVC-skinner	N/A	0,13
Takterrasse i Leimbach [42]	VIP med XPS 4 cm	N/A	0,29

Et problem som ser ut til å kunne oppstå som følge av den økte isolasjonsevnen i bygningsdelene er økte kuldebroverdier i gjennomgående og tilsluttende bygningsdeler [53]. Dette gjelder særlig når det etterisoleres innvendig. Kuldebroene er problematiske da de kan utgjøre en stor del av varmetapet fra bygningen, i tillegg til at det kan oppstå kondens og en redusert termisk komfort. En løsning på problemet i eksempelet nevnt i [53] kan være å helt eller delvis isolere skilleveggen som utgjør en kuldebro. Dette vil også være gjeldene i de tilfellene der kuldebroene er bygningsdeler som dekker og tak som går inn i ytterkonstruksjonene. Argumenter mot løsningen er at dette vil oppta enda mer areal og det kan i noen tilfeller anses som et ekstremt tiltak. I nybygg kan derimot problemer med kuldebroer planlegges rundt og av superisolasjonen er det først og fremst aerogel i form av matter som har potensiale som kuldebrobryter.

Fordelen med aerogel fremfor vakuumisolasjonspaneler er at materialet ikke er like sårbart. Både som matter, i granulert form og i murpuss kan aerogelen formes og tilpasses uten problemer. I flere studier rapporteres det om punkterte og defekte vakuumisolasjonspaneler og dette er per i dag en utfordring. Folien rundt panelene bør bli sterkere og det må legges stor vekt på å behandle dem med varsomhet for å forhindre perforering. Panelene er mest utsatt før de blir bygget inn, og dette bør derfor skje raskt. Det kan i tillegg være en løsning å kle panelene i trykkfast isolasjon, eller å implementere dem i prefabrikkerte elementer som er beskyttet helt fra produksjonsfasen. At panelene krever beskyttelse er med på å øke konstruksjonstykkelsen som igjen gjør løsningene mindre konkurransedyktige. I de beskyttende lagene bør det gjøres vurderinger av temperatur og fuktforhold da VIP-en er dampstett.

Basert på konklusjoner fra tidligere studier vil både VIP og aerogel kunne integreres i de

fleste ytterkonstruksjoner, der enkelte skiller seg ut som mer attraktive. Til tross for dette er det verdt å nevne at enkelte av de utvalgte eksemplene er basert på laboratorieforsøk. Resultater kan her avvike fra hvordan konstruksjonene faktisk vil fungere og det er derfor i mange tilfeller nødvendig med mer utredning for å vurdere om løsningene vil fungere i realiteten. En kombinasjon av laboratorieforsøk, simuleringer og testobjekter in situ vil være gunstig for å kartlegge løsningenes effektivitet.

Vakuumisolasjonspaneler er enklere å anvende i horisontale konstruksjoner, da problemer med innfestning elimineres. Dette er av grunnene til at takterrassekonstruksjoner er et populært bruksområde. Det finnes derimot lite forskning på gulvkonstruksjoner med både VIP og aerogel. Årsaken til dette er ukjent, og området bør utforskes nærmere da det anses som aktuelt for å kunne senke utgravingskostnader, øke etasjehøyde og imøtekomme regulerte planer. Selv om aerogel til nå er lite benyttet i gulvkonstruksjoner, er det naturlig å anta at fiberforsterket aerogel i form av matter/paneler her vil fungere, basert på materialenes egenskaper. Monolittisk aerogel vil egne seg dårlig i gulvkonstruksjoner på grunn av dens skjørhet og granulert aerogel benyttes kun som fyllisolasjon. Sistnevnte er en metode som ikke er særlig utbredt i gulvkonstruksjoner. At monolittisk og granulert aerogel ikke er særlig egnet kan også være en av årsakene til at implementeringen av aerogel i gulv ikke har vært like utbredt til nå.

## 7.2 Terrassekonstruksjoner

*“Det er også ønskelig å undersøke hvordan varme og fukt oppfører seg i en aktuell bygningsdel med materialene i et nordisk klima.”*

Materialene i samtlige av konstruksjonevariantene er uorganiske. Dermed vil det ikke oppstå problemer med råte i konstruksjonen, med mindre fukten som opptrer er ekstrem over lengre perioder. Det er heller ingen materialer i konstruksjonene som vil kunne korrodere, med unntak av aluminiumen i VIP-en. Aluminium har derimot høy korrosjonsfasthet sammenliknet med andre metaller og i bruk i VIP-folier er metallet i tillegg laminert med plast [8]. Problemer med korrosjon av aluminiumen i VIP-folier er ikke nevnt i litteraturen som er dekket og det anses som lite sannsynlig at dette problemet vil oppstå.

Problemer med frost er mest aktuelle i betongen i konstruksjonene. Denne er ikke tatt i

betraktning, da den har minimal innvirkning på funksjonen av superisolasjonsmaterialene. Betongkonstruksjonen som i alle variantene ligger innenfor isolasjonssjiktene er dessuten så varm at problemet her ikke vil kunne oppstå. I Rockwoolsjiktene er temperaturen under 0 °C om vinteren og vann kan dermed fryse til is og eventuell kondens vil felles ut som rim. I tilfeller der RF i porene i materialet, som beskrives videre, er under 98% og fukten opptrer i det hygroskopiske området er det ikke fritt vann i steinullsjiktet. Vannet som eventuelt fryser kan dermed antas å ha plass til dette uten å ødelegge Rockwoolen. En ansamling av frost og rim er derimot, på lik linje med ansamling av vann, et mulig problem.

I enkelte av sjiktene med tradisjonelle isolasjonsmaterialer er faren for at fukten skal opptre i det kapillære området å anse som aktuell ved et forlenget simuleringsforløp, gitt verdiene som ble presentert i Tabell 12 og 13. Dette gjelder særlig i steinullen i konstruksjonen med VIP og betongdekke, der vanninnholdet ikke er stabilisert. Fordelen med at steinull og EPS er benyttet er at disse materialene er kapillærbrytende [88, 89]. Fritt vann vil (dersom det skulle oppstå) dermed ikke ved kapillærsug kunne fraktes til ulike deler av sjiktene der vannet vil kunne ha en negativ innvirkning på superisolasjonen. Vannet kan derimot fraktes nedover i konstruksjonen ved hjelp av tyngdekraften, noe som vil kunne være problematisk der fritt vann eventuelt oppstår i steinullsjiktene som ligger over superisolasjonen. Det er også i disse sjiktene at RF-en i porene ser ut til å kunne øke inn i det kapillære området.

I samtlige av konstruksjonene er den relative fuktigheten i Rockwoolsjiktene over 75%, som håndboken fra Mycoteam anbefaler som en øvre grenseverdi [90]. Det er også tilfelle i EPS-en i konstruksjonsvarianten med VIP uten betongdekke. Hvorvidt denne begrensningen gjelder for alle typer ytterkonstruksjoner er ikke angitt, og forhold i kompakte tak er å anse som spesielle da muligheter for uttørking er begrenset. Gitt at begrensningen er basert på å forhindre en økt varmekonduktivitet i materialene, kan den høye RF-en i sjiktene anses som uproblematisk, da det er superisolasjonen som står for størsteparten av varmemotstanden i konstruksjonene, med et mulig unntak av varianten med aerogel. Steinull er også en isolasjonsvariant som ikke trekker til seg vann og kan derfor benyttes i fuktutsatte konstruksjoner [86, 87], som disse kompakte takene er. Det bør også nevnes at konstruksjonsvarianten med VIP uten betongdekke kun har  $RF > 75\%$  i deler av steinullsjiktet.



### 7.2.1 Terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke

Terrassekonstruksjonen med betongdekke oppnår en U-verdi på  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Denne verdien tilfredsstillter ikke krav til energiltak i TEK17, som er gjengitt i Tabell 3, men er imidlertid innenfor minstekravet. Dette innebærer at krav til energieffektivitet er ivarettatt, forutsatt at bygningens varmetapstall ikke øker. Vurdert ut fra dette kravet alene er konstruksjonen derfor tilfredsstillende. Som tidligere nevnt kan derimot denne U-verdien være urealistisk lav, fordi WUFI<sup>®</sup> ikke regner med at konstruksjonen sannsynligvis har bruk for å implementere konvensjonell isolasjon i randsoner. Samtidig er det ikke uvanlig å benytte et dobbelt lag med VIP. Da vil kostnadene øke, men U-verdien vil til gjengjeld bli ytterligere forbedret. Den tette konstruksjonen oppfyller i tillegg krav til lufttetthet satt i TEK17.

Det totale vanninnholdet i konstruksjonen, som oppgis i Vedlegg 3 og 4, justerer seg ned fra start og stabiliserer seg. Dette indikerer at konstruksjonen evner å tørke ut fukt og at det ikke akkumuleres i løpet av bruksfasen. Dersom fuktighet hadde fortsatt å samle seg opp over ubestemt tid ville konstruksjonen før eller siden ha feilet. Vanninnholdet i steinullsjiktet indikerer derimot en annen tendens, både med lite og mer byggfukt. At vanninnholdet her ikke stabiliserer seg i løpet av simuleringstiden behøver ikke nødvendigvis å være negativt. Det kan simpelthen bety at det tar lenger tid for steinullen å nå sin naturlige fuktlikevekt. Det kan med fordel gjøres nye simuleringer over lengre tidsperioder for å se om og med hvilke verdier vanninnholdet etter hvert stabiliserer seg.

Grafene i Figur 41, som viser temperatur og relativ fuktighet i monitorposisjonene i sjiktet, tilsier at en viss mengde vann vil felles ut; det er svært høy relativ fuktighet i den øverste monitorposisjonen, og temperatur- og duggpunkttemperaturgrafene i Figur 42 ser ut til å overlape hverandre mer og mer i løpet av årene det er gjort beregninger for. Denne tendensen korresponderer godt med resultatene av beregningene av vanninnholdet som øker i sjiktet.

Dersom vanninnholdet ikke stabiliserer seg og fukt fortsetter å akkumulere i steinullsjiktet må konstruksjonen anses som mislykket. En oppsamling av vann vil dersom det er støv i steinullen kunne gi grobunn for mugg og sopp [91]. Slike forekomster forutsetter også en høy relativ fuktighet og temperatur over lengre perioder, noe det av grafen i Figur 41 kommer frem at er tilfellet. Fukten i steinullen vil også kunne diffundere inn mot VIP-en

på varme dager. Dersom vann kontinuerlig blir liggende inntil VIP-en vil dette akselerere aldringsprosessen i panelene. Vannet vil også redusere steinullens isolerende egenskaper. I denne konstruksjonen er derimot formålet til steinullen og EPS-en å beskytte VIP-en, og konstruksjonens totale varmemotstand vil i mindre grad påvirkes av dette.

I det fireårige simuleringsforløpet ser det ut som at akselerasjonen på økningen i vanninnholdet i steinullen er avtagende. Denne tendensen indikerer at det er i ferd med å stabilisere seg. Et så lavt vanninnhold som resultatene tilsier at oppstår etter fire år, vil sannsynligvis være uproblematisk for konstruksjonens funksjonalitet. At VIP er et så nytt materiale i bygningssammenheng gjør at det finnes lite data annet enn fra laboratorieforsøk for hvor mye fukt det vil være problematisk at ansamles i steinullsjiktet. Det vil derfor være interessant å faktisk bygge konstruksjonen med sensorer for måling av temperatur og fuktighet i relevante plasseringer, for å se om de samsvarer med resultatene fra WUFI<sup>®</sup> og for å se om fukten vil ha en negativ innvirkning på VIP-en.

Ved betraktning av materialets fuktlagringsfunksjon i WUFI<sup>®</sup>s materialdatabase kommer det frem at vanninnholdet som opptrer tilsvarende en RF i porene på  $\approx 95\%$ , både med lite og mer byggfukt. Fukten opptrer dermed i det hygroskopiske området og ikke som fritt vann i porene. Verdien er derimot høy, og en ytterligere økning av vanninnholdet, som tilsynelatende vil være tilfelle over et lengre simuleringsforløp, vil korrespondere med en ytterligere økt RF i porene.

Vanninnholdet i EPS-en stabiliserer seg raskt på et uproblematisk lavt nivå. I varianten med en større mengde byggfukt antyder også resultatene i Figur 40 at konstruksjonen til en viss grad evner å tørke ut fukt, da vanninnholdet her synker. Ved betraktning av den relative fuktigheten i monitorposisjonene i EPS-en, som ble fremstilt i Figur 43, kommer det frem at også denne synker noe i løpet av simuleringsforløpet, mens temperaturen holder seg forholdsvis stabil. Det synkende vanninnholdet kommer dermed tilsynelatende ikke som et resultat av at luften blir varmere og tar opp mer fuktighet, slik at den relative fuktigheten øker.

Den synkende relative fuktigheten kan ses på som en naturlig følge av at det blir mindre vann i sjiktet. Sett i sammenheng med at både VIP-en og PE-folien som omslutter EPS-

sjiktet er damptette kan disse resultatene virke underlige, da spørsmålet om hvor dette vannet tar veien oppstår. Det er derimot viktig å merke seg at det i utgangspunktet er små mengder vann det er snakk om, da EPS-en når likevekt på snau 1,2 kg/m<sup>3</sup> i konstruksjonen med lite byggfukt, noe som tilsvarer en verdi i underkant av 75% RF i porene til materialet. Dette skal i utgangspunktet være tilfredsstillende for et isolasjonsmateriale.

### 7.2.2 Terrassekonstruksjon med VIP uten betongdekke

I terrassekonstruksjonen uten betongdekke er U-verdien 0,171 W/(m<sup>2</sup>K) og tilnærmet lik den i konstruksjonen med dekke. Dette er lite overraskende da betongen av type B45 har en høy konduktivitet og utgjør et forholdsvis slankt sjikt. Som følge av at PE-folien og betongen over steinullsjiktet i denne konstruksjonen er fjernet, er forholdene i de konvensjonelle isolasjonssjiktene forandret.

Vanninnholdet i steinullen stabiliserer seg nesten umiddelbart på et uproblematisk lavt nivå, uavhengig av startverdi for byggfukt og med 80% RF i porene. Temperaturen og den relative fuktigheten ved VIP-en i sjiktet ser ved betraktning av Figur 41 og 44 ut til følge samme trend både med og uten betongdekke. I øvre monitorposisjon, ved PVC-membranen, er RF derimot gjennomsnittlig lavere og har større variasjoner. Dette kommer av at Rockwoolen i denne konstruksjonsvarianten i større grad er eksponert for uteklimaet. Vinterstid er den relative fuktigheten høy i begge konstruksjonene, da temperaturene er lave. Vår, sommer og høst gjør den varmere betongløse konstruksjonen at den relative fuktigheten er vesentlig lavere. Duggpunkttemperaturen er generelt lavere enn temperaturen i sjiktet, noe som indikerer at det ikke vil felles kondens. Dette resultatet samsvarer med at vanninnholdet er stabilt.

Ved betraktning av EPS-en er derimot ikke resultatene like gode. Både med og uten byggefukt øker vanninnholdet og rekker ikke å stabilisere seg. Når det i simuleringene er lagt inn mer byggefukt ser det derimot ut til at vanninnholdet vil stabilisere seg raskere, da de to grafene for vanninnhold i EPS konvergerer utover i simuleringsforløpet, som illustrert i Figur 40. Etter fire år i simuleringen med mer innlagt byggefukt havner RF i porene til EPS-en på 85%. Overraskende nok tilsier ikke den relative fuktigheten, temperaturen og duggpunkttemperaturen at det vil felles ut fukt i sjiktet. Dermed oppstår spørsmålet om hvorfor vanninnholdet øker, da EPS-en både på over- og undersiden har damptette sjikt

som i teorien ikke tillater innslipp av vann i sjiktet.

Den relative fuktigheten øker i EPS-sjiktet, både ved VIP-en og ved PE-folien, på tross av at temperaturen er stabil. Dette kan komme som et resultat av den økende vannmengden som ikke har mulighet til å tørke ut på grunn av de damptette omkringliggende sjiktene. Dette fører igjen til at duggpunkttemperaturen konvergerer mot temperaturen i sjiktet. I dette tilfellet, som i Rockwoolen i varianten med betongdekke, vil det være fordelaktig å gjøre simuleringer over en lengre tidsperiode for å se om vanninnholdet til slutt stabiliserer seg, og ved hvilket nivå. Dersom tendensen med økende relativ fuktighet og duggpunkttemperatur fortsetter vil det til slutt kunne oppstå forhold der kondens felles ut og øker vanninnholdet ytterligere.

En mulig løsning på problemet med opphopningen av vann i EPS-sjiktet kan være å erstatte PE-folien med en såkalt smart dampsperre for å tilrettelegge for innadrettet uttørking [74]. Smarte dampsperrer er dampåpne i den ene retningen, og vil i forbindelse med EPS-en kunne legges slik at damp kan bevege seg ut av sjiktet, samtidig som at den er forhindret i å bevege seg fra innsiden av bygget og ut i sjiktet. I det norske klimaet vil dette fungere best om sommeren, når temperaturen er høyere ved VIP-sjiktet og dampen diffunderer innover/nedover i konstruksjonen. Om vinteren beveger fuktigheten seg oppover mot den kalde utsiden, men slipper ikke forbi det damptette VIP-sjiktet. Dersom WUFI<sup>®</sup> Pro hadde tatt i betraktning at VIP-sjiktet i realiteten ikke er kontinuerlig hadde resultatene muligvis sett annerledes ut da mer fuktighet sannsynligvis ville ha kunnet bevege seg lenger opp i konstruksjonen.

### 7.2.3 Terrassekonstruksjon med aerogel

I terrassekonstruksjonen med aerogel blir U-verdien  $0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dette vil si at minstekrav i TEK17 akkurat er oppfylt. Her er det viktig å nevne at konstruksjonsoppbygningen muligvis burde være annerledes, for eksempel med et enkelt lag tradisjonell isolasjon i tillegg til aerogelen. Dette kan resultere i en økt tykkelse. Kombinasjonsløsningen med aerogel og konvensjonell isolasjon har en samlet tykkelse på 170 mm. Det er benyttet et dobbelt lag med aerogel for å oppnå en tilfredstillende U-verdi. En mulighet for å få redusert den samlede isolasjonstykkelsen kan være å heller benytte en kombinasjonsløsning med VIP og aerogel, noe det er verdt å undersøke videre.

Vanninnholdet i alle isolasjonssjiktene i konstruksjonen med aerogel stabiliserer seg raskt. Dette er positive resultater som tilsier at konstruksjonen fungerer godt. Den store forskjellen på denne konstruksjonen og konstruksjonen med VIP uten betongdekke er at det damp- og lufttette sjiktet som VIP-en utgjør ikke forårsaker en oppsamling av vann i EPS-en. Det kan være ugunstig for aerogelens isolerende evner at det er vann i sjiktet [39]. Om den mengden vann det er simulert at vil ligge i aerogelsjiktet er avgjørende for aldringsprosessen vil det være interessant å gjøre faktiske målinger på.

Den relative fuktigheten i den øverste monitorposisjonen i Rockwoolen ligger rundt 100% vinterstid, og som et resultat overlapper duggpunkttemperaturen og temperaturen ved flere anledninger i denne perioden. Det vil her felles ut kondens, som kommer frem i Figur 48, der man ser at vanninnholdet øker i denne perioden. Når temperaturene øker i løpet av sommermånedene vil luften ta opp og holde på denne fuktigheten uten at den mettes. Dermed akkumuleres ikke fuktighet og det vanninnholdet som er i sjiktet i vintermånedene er uproblematisk lavt.

Rockwoolen ser ut til å stabilisere seg på  $0,5 \text{ kg/m}^3$ , noe som tilsvarer  $\approx 97\%$  RF i porene. Det burde her nevnes at det skal lite til før den bikker 98%. Ekstremalverdiene er i vintermånedene på omtrent  $1,1 \text{ kg/m}^3$ . Dette ligger farlig nært en RF tilsvarende 98%. Isolasjonsevnen vil i tillegg svekkes, noe som her kan ha en negativ innvirkning på konstruksjonens totale U-verdi. I både EPS-en og aerogelen stabiliserer RF i porene til materialene seg på et sted mellom 55% og 65%. Dette anses som uproblematisk for disse materialene.

Den relative fuktigheten i både aerogelen og EPS-en er stabil rundt et gjennomsnitt på omtrent 50%. Aerogelkonstruksjonen er den eneste av alle de analyserte eksemplene der RF-en er så lav. At verdiene ligger på dette nivået er positivt, da det skal mer til for at det oppstår kondens, i tillegg til at forholdene ikke ligger til rette for vekst av muggsopp. Helhetlig ser konstruksjonen ut til å kunne fungere godt i praksis.

#### **7.2.4 Innsparing av høyder i terrassekonstruksjonene**

For at VIP og aerogel skal kunne vurderes fremfor konvensjonell isolasjon må bruken av dem på en eller annen måte være fordelaktig. For terrasseløsninger er ønsket om å oppnå

trinnfrie løsninger i overgangen mellom innvendig og utvendig side stort. Terskler eller nivåforskjeller på inntil 25 mm anses som trinnfrie [92] og i mange tilfeller kan noen få centimeter redusert isolasjonsmengde tilfredstille ambisjonene om universelt og estetisk utformede bygninger.

Mange steder angir også reguleringsplaner en maksimal tillatt høyde på bygg. En innsparring i taktykkelse vil dermed kunne bidra til å imøtekomme disse kravene, i tillegg til at prisen kan forsvares der det eventuelt må gjøres dyre utgravninger for å tilrettelegge for riktig høyde på bygget. Dette vil også være tilfelle i rehabiliteringsprosjekter der etterisolering med konvensjonell isolasjon vil kunne komme i konflikt med eksisterende tilstøtende bygningsdeler samt dører og vinduer. Å skifte ut og bytte plass på disse elementene blir raskt dyrere enn å etterisolere med superisolasjon.

I Tabell 15 er det gjort en sammenlikning av et rettvendt tak med lettklinkerbetong mot de analyserte konstruksjonene for å kunne vurdere hvor mye den samlede isolasjonstykkelsen kan reduseres med superisolasjon. Løsningen som er valgt er en av mange alternativer for kompakte tak, som kan variere med forskjellige typer betong og isolasjon. Materialvalg for både bærekonstruksjon og isolasjon har stor innvirkning på konstruksjonens totale tykkelse og U-verdi. Verdiene for det konvensjonelle taket er hentet fra SINTEF Byggforsk [74].

**Tabell 15:** Sammenlikning av rettvendt tak med konvensjonell isolasjon, VIP og aerogel.

	<b>Konvensjonell</b>	<b>VIP</b>	<b>Aerogel</b>
<b>U-verdi</b> [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,18	0,17	0,77
<b>Bærekonstruksjon</b> [mm]	200	200	200
<b>Isolasjon</b> [mm]	170	120	170
<b>Differanse iso ifht. konvensjonell</b> [mm]		50	0

Av tabellen fremkommer det at det i terrassekonstruksjonene med VIP er mulig å spare inn drøye 50 mm i høyde. Her bør det nevnes at lettklinkerbetongen som benyttes i den konvensjonelle løsningen har en konduktivitet på 0,38 W/(mK), mens betong av typen B45 har en konduktivitet på 1,6 W/(mK). Dette betyr at en annen type betong vil gi konstruksjonen bedre isolerende egenskaper: U-verdien til konstruksjonen kan i beste fall havne på under 0,15 W/(m<sup>2</sup>K). For å oppnå denne U-verdien i det konvensjonelle taket det sammen-

liknes mot, kreves det 200 mm isolasjon. Dermed blir differansen på isolasjonstykkelsen, sammenliknet med VIP-løsningen, 80 mm.

Da aerogel stiller dårligere enn VIP når det kommer til konduktivitet, blir isolasjonssjiktet i terrassekonstruksjonen med aerogel tykkere. Gevinsten i forhold til innsparing av høyder blir dermed større med bruken av VIP. En bemerkning er at sjiktene med superisolasjon er like tykke i begge konstruksjoner, slik at tykkelsen på den konvensjonelle isolasjonen må økes i aerogelkonstruksjonen for å oppnå en like god U-verdi. Dersom det benyttes mer aerogel vil mye av den konvensjonelle isolasjonen kunne droppes. Dette går på bekostning av pris, som medfører at konstruksjonen vil bli mindre konkurransedyktig på markedet.

U-verdien som aerogelkonstruksjonen oppnår, på  $0,177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , er så vidt bedre enn den til den konvensjonelle løsningen, og det samlede laget isolasjon er like tykt. Men, lettklinkerbetongen har som nevnt bedre konduktivitet enn B45. Dersom lettklinkerbetongen hadde vært benyttet i aerogelkonstruksjonen ville U-verdien ha blitt bedre enn i den konvensjonelle løsningen. Med andre ord er ikke konstruksjonene helt sammenliknbare, og muligheten for å spare inn høyde med bruk av aerogel er også tilstede.

### 7.3 Videre arbeid

Målet med denne oppgaven er å kartlegge bruksområder og vurdere egenskapene og opp-treden til VIP og aerogel brukt i bygninger. Her presenteres forslag til videre arbeid som ytterligere vil kunne bekrefte og utvide resultatene som er avdekket.

1. *Finnes det flere muligheter for VIP og aerogel som isolasjonsmaterialer i bygninger i et nordisk klima?*

Her vil det være interessant å gjøre et enda dypere litteraturstudie for å se hva eksisterende forskning viser. Det vil også være aktuelt å gjøre faktiske tester og målinger av konstruksjonsdelers funksjonalitet med bruken av superisolasjon i nordiske klima. Det er gjort mange studier på materialene i Østerrike, Sveits og Tyskland. Vil materialene fungere på samme måte i det nordiske klimaet og hvilke tiltak må eventuelt til for at de skal gjøre det?

2. *Hva skjer med konstruksjonen uten betongdekke dersom parametrene varieres mer?*

Her vil det være interessant å sette opp flere varianter av konstruksjonen uten betongdekke. Det kan innenbære økte eller reduserte isolasjonstykkelser, endring av materialer eller mer/mindre byggfukt. På grunn av de resultatene som forekommer for materialsjiktet med EPS er det nødvendig å se på varianter av denne konstruksjonen for å vurdere oppførselen av vanninnholdet i sjiktet.

Det kan også være behov for å gjøre de samme simuleringene over lengre tidsperiode for å se om vanninnholdet vil stabilisere seg etter de fire årene som simuleres i oppgaven.

3. *Hvordan vil resultatene se ut dersom det benyttes en løsning med både VIP og aerogel?*

Det kan være interessant å analysere en konstruksjon der aerogel og VIP kombineres. En kombinasjonsløsning kan medføre at tykkelsen konvensjonell isolasjon kan reduseres og resultatet kan bli en konstruksjon som er enda mer energieffektiv enn dersom kun ett av materialene benyttes. Videre bør det gjøres faktiske tester og målinger for å vurdere en slik konstruksjons effektivitet.

4. *Er det fare for muggvekst og råteskader i konstruksjonene?*

Da alle materialene i løsningene er uorganiske er ikke dette den største utfordringen, men det kan være interessant å benytte programvare som for eksempel WUFI<sup>®</sup> Bio som ser på dette for å få et helhetlig inntrykk av løsningene.

5. *Hvordan blir resultatene dersom beregningene gjøres i et todimensjonalt program?*

WUFI<sup>®</sup> Pro som er benyttet i analysene beregner bare endimensjonalt og dette er en begrensning som følge av at programmet da antar at sjiktet med VIP er kontinuerlig over hele konstruksjonen. VIP kommer fra leverandør som paneler i gitte størrelser og overgangen mellom panelene vil ikke være helt tette. Dette gjør at beregningene i analysene ikke er helt realistiske og det er derfor nødvendig å gjøre en grundigere analyse også med et todimensjonalt program.

6. *Er materialene miljøvennlige?*

Et av argumentene for å implementere VIP og aerogel i byggebransjen bygger på behovet for å energieffektivisere bygningsmassen. Det vil dermed kunne kalles paradoksalt dersom produksjonen, anvendelsen og resirkuleringen av materialene er svært



energikrevende og lite miljøvennlig. Dette perspektivet bør utforskes og tas i betraktning i en helhetlig vurdering av om materialene er løsninger for fremtiden.

7. *Hvor mye areal spares inn og vil det lønne seg sett mot den høye prisen på produktene?*

Det burde gjøres et kostnadsoverslag for innsparing av areal og høyder der de innsparte kostnadene må sammenlignes med kostnadene påløpt ved bruken av superisolasjonen.

## 7.4 Andre fremtidige muligheter

VIP og aerogel er ikke de eneste materialene som kan representere fremtidig superisolasjon. Samlebetegnelsen avanserte isolasjonsmaterialer (AIM) refererer til en rekke materialer som Jelle, Gustavsen og Baetens [15] foreslår at skal inneha en rekke kvaliteter; den termiske konduktiviteten i ny tilstand bør være under  $0,004 \text{ W}/(\text{mK})$ , og under  $0,005 \text{ W}/(\text{mK})$  etter 100 år. Materialene bør ikke influeres av perforering og bør kunne tilpasses på byggeplass.

Et av de store problemene med bruken av VIP er nettopp at de ikke kan kuttes eller perforeres. Et mulig fremtidig AIM er det som kan betegnes som vakuumisolasjonsmaterialer (VIM) som i prinsippet vil fungere på samme måte som VIP, men uten behovet for den beskyttende folien. For å kunne lage disse materialene er det nødvendig at faststoffet som utgjør strukturen har lav termisk konduktivitet  $\lambda_{\text{solid}}$ . Strukturen må i tillegg være lukket med små porer og fylt med vakuum.

For å få til vakuum i den lukkede strukturen må dette oppstå når materialene produseres. En måte å forestille seg dette på er at strukturmateriallet blåser seg opp innenifra og i prosessen går fra å være uporøst til å danne homogene, små porer. En annen løsning kan være å lage et strukturmateriale eller overflater i porene som effektivt vil absorbere alle gassmolekylene ved hjelp av for eksempel en kjemisk reaksjon.

Strukturmateriallet bør ha en så lav strålingskonduktivitet  $\lambda_{\text{rad}}$  som mulig, noe som kan komme i strid med en lav  $\lambda_{\text{solid}}$ , og det må i tillegg være sterkt nok til å ikke implodere som følge av vakuomet. Luft- og damptransport gjennom porestrukturen må være så lav at de foreslåtte konduktivitetskravene etter 100 år er oppfylt. VIM vil kunne kuttes og perforeres av blant annet spikere og skruer uten større konsekvenser enn lokale kuldebroer.

Ikke ulikt VIM er det også tenkelig med gassisolasjonsmaterialer (GIM). I disse materialene vil de små porene fylles med edelgasser som argon, krypton eller xenon som alle har lavere varmeledningsevne enn luft. Fordelen med GIM fremfor VIM er at de kan være enklere å produsere, i tillegg til at strukturmaterialiet ikke behøver å være like sterkt for å opprettholde materialets integritet. Det vil muligens også være enklere å bevare den originale lave termiske konduktiviteten, dog VIM i utgangspunktet her vil være bedre da porene er fylt med vakuum og ikke gass.

For både VIM og GIM er det å fullstendig unngå inntrengning av luft og damp i løpet av en hundre års periode å anse som uoppnåelig. Videre reiser spørsmålet seg om hvorvidt det vil være mulig å lage et isolasjonsmateriale som ikke affekteres av denne inntrengningen, og i [15] er svaret på dette nanoisolasjonsmaterialer (NIM). NIM vil fungere slik at porestørrelsene reduseres til under et visst nivå for å oppnå en konduktivitet på  $0,004 \text{ W/(mK)}$ .

Tanken med NIM er at porestrukturen både kan være åpen og lukket. Når porene er fylt med luft må størrelsen på dem være under  $40 \text{ nm}$  og i prinsipp vil dermed enkelte aerogeler kunne anses som NIM. I åpne strukturer må materialet være resistent mot diverse aldringsmekanismer, som kondensasjon i porene, som vil øke konduktiviteten betydelig.

NIM oppnår sin lave termiske konduktivitet, uten vakuum, takket være den tidligere omtalte Knudsen-effekten. I tillegg forutsettes det at  $\lambda_{\text{solid}}$  er så lav som mulig, og at det samlede bidraget fra  $\lambda_{\text{solid}}$  og  $\lambda_{\text{gas}}$  dominerer over strålingsbidraget  $\lambda_{\text{rad}}$  som kan utgjøre en stor forskjell for den totale termiske konduktiviteten i NIM [9].

Dynamiske isolasjonsmaterialer (DIM) vil dersom de kan produseres slik at de er robuste og praktiske ha et stort potensiale. DIM er materialer der den termiske konduktiviteten i teorien kan reguleres og kontrolleres innenfor et ønsket område. Dette vil innebære å kunne endre innholdet eller konsentrasjonen av gass i porene ( $\lambda_{\text{gas}}$ ), å endre emissiviteten i overflaten i porene ( $\lambda_{\text{rad}}$ ), eller å endre konduktiviteten i strukturmaterialiet ( $\lambda_{\text{solid}}$ ).

For å få til disse kontrollerte forandringene kan det hentes inspirasjon og idéer fra andre

vitenskapsfelt og teknologier. Det vil for eksempel være tenkelig å applikere en elektrisk spenning over materialet, en teknologi som blant annet benyttes i selvbetonende vinduer.

## 8 Konklusjon

For å vurdere aerogel og vakuuminisolasjonspanelers potensiale som fremtidige isolasjonsmaterialer er oppgavens problemstilling oppdelt i følgende spørsmål:

1. I hvilke byggtekniske løsninger har materialene størst potensiale?
2. Hvordan opptrer fukt og varme i konstruksjoner med materialene?
3. Egner de seg bedre enn konvensjonelle isolasjonsmaterialer sett i sammenheng med spørsmålene ovenfor?

Gjennom et større litteratursøk er det gjort et dykk i bruksområder og løsninger for og med aerogel og VIP. Som følge av materialenes ulike egenskaper og forutsetninger for bruk gav ikke søket entydige svar. Aerogel vil i enkelte konstruksjoner egne seg bedre enn VIP, og VIP vil i andre konstruksjoner egne seg bedre enn aerogel. Sistnevnte ser i form av fiberforsterkede matter ut til å være svært anvendelig i et flertall av byggtekniske løsninger. De to materialene, samlet under begrepet superisolasjon, dekker til sammen et bredt spekter av bruksområder som presenteres i Tabell 16.

**Tabell 16:** Oversikt over hvilke bruksområder VIP og aerogel egner seg til i bygninger.

Bruksområder	VIP	Aerogel			
		Monolittisk	Granulert	Fiberforsterket	Murpuss
Gulv	x <sup>1</sup>			x <sup>1</sup>	
Innvendig etterisolering	x <sup>2</sup>			x	x
Utvendig etterisolering	x <sup>2</sup>			x	x
Hulromsisolasjon			x	x <sup>3</sup>	
Sandwichelementer	x			x	
Vinduer og glassfasader		x	x		
Dører	x	x	x	x	
Kuldebroer				x	
Takterrasser	x			x	
Skråtak	x			x	

<sup>1</sup>Det er gjort få studier der både VIP og aerogel brukes i gulvkonstruksjoner. Da VIP har potensiale i kompakte tak er det grunnlag til å se potensiale i gulv også. Dette gjelder også for aerogel.

<sup>2</sup>VIP som benyttes på veggkonstruksjoner må ofte brukes sammen med et innfestingssystem.

<sup>3</sup>Resirukelerte fiberforsterkede aerogelmatter kan benyttes som hulromsisolasjon.

Per i dag skiller enkelte bruksområder seg ut som de mest aktuelle som følge av materiale- nes foreløpig høye pris. I tettbygde strøk der arealkostnadene er høye vil superisolasjonen kunne lønne seg. Ved etterisolering der det er lite plass eller areal til rådighet er materialene også svært aktuelle. Der praktiske og estetiske faktorer påvirker valg av materialer stiller også superisolasjonen sterkt; dette inkluderer blant annet terrassekonstruksjoner, glassfasader og verneverdige murfasader.

Sammenliknet med konvensjonelle isolasjonsmaterialer er superisolasjonenens store ulempe den høye prisen. Dersom etterspørselen etter superisolasjon øker vil det derimot være rimelig å anta at prisene etterhvert vil synke. Skulle dette bli tilfelle anses aerogel og VIP som svært konkurransedyktige løsninger. En annen ulempe er VIP-ens anvendelighet og levetid. Sammenliknet med både konvensjonell isolasjon og aerogel kommer VIP her dårligere ut. Folien må derfor bli mer robust, for å redusere panelenes sårbarhet og forlenge deres levetid.

De analyserte terrassekonstruksjonene viser resultater som tilsier at opptreden av fukt og varme er akseptabel. Særlig analyseobjektet med aerogel fungerer godt. I konstruksjonene med VIP ser ikke vanninnholdet ut til å stabilisere seg i enkelte av sjiktene, og analyser med et lengre simuleringsforløp bør gjennomføres for å vurdere videre utvikling av fukt og vann. Akkumuleringen av vann kan se ut til å være forårsaket av VIP-ens damp- og lufttette natur. Det bør merkes at vanninnholdet som opptrer er forholdsvis lavt og takket være steinull og EPS sine materialegenskaper er konstruksjonene å anse som funksjonelle. Det kan derimot hende at den eksisterende fukten vil påvirke levetiden på superisolasjonen.

Etter en samlet vurdering av resultatene fra både litteraturstudiet og analysen kan det konkluderes med at superisolasjon er aktuelle materialer for fremtiden. I utvalgte tilfeller er materialene allerede bedre egnet enn tradisjonelle varianter og gitt en ytterligere forbedring av de utfordringene superisolasjonen per i dag står overfor vil de konkurrere sterkere og sterkere på verdensmarkedet.

## Referanser

- [1] Allen MR, Dube OP, Solecki W, Aragón-Durand F, Cramer W, Humphreys S, et al. Global Warming of 1.5 °C. The Intergovernmental Panel on Climate Change; 2018.
- [2] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. European Parliament, Council of the European Union; 2010. 2.
- [3] Grynning S, Baetens R, Jelle B, Gustavsen A, Uvsløkk S, Meløysund V. Vakuumisolasjonspaneler for bruk i bygninger–Egenskaper, krav og muligheter [Vacuum insulation panels for building applications: Properties, requirements and possibilities](Project number: B22479. 18 Report ISSN 1504-6958 ISBN 9788253610504). Oslo: SINTEF Byggforsk. 2009;.
- [4] Kalnæs SE, Jelle BP. Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*. 2014;116:355–375.
- [5] Wang X, Walliman N, Ogden R, Kendrick C. VIP and their applications in buildings: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*. 2007;160(4):145–153.
- [6] Schwab H, Heinemann U, Beck A, Ebert HP, Fricke J. Permeation of different gases through foils used as envelopes for vacuum insulation panels. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. 2005;28(4):293–317.
- [7] Alam M, Singh H, Limbachiya M. Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry–A review of the contemporary developments and future directions. *Applied energy*. 2011;88(11):3592–3602.
- [8] Aluminiumskorrosjon [Internett]. Alumeco; n.d. [Hentet 14. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.alumeco.no/kunnskap-og-teknikk/generelt/aluminiumskorrosjon>.
- [9] Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions–Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011;43(10):2549–2563.
- [10] Gangåssæter HF, Jelle BP, Mofid SA, Gao T. Air-Filled Nanopore Based High-Performance Thermal Insulation Materials. *Energy Procedia*. 2017;132:231–236.

- [11] Tenpierik M, Cauberg J. VIP integrated façade designs: the advantage of combining high thermal performance with limited construction thickness. Proceedings of the 24th international conference on passive and low energy architecture, PLEA/NUS, Singapore. 2007;p. 303–310.
- [12] Binz A, Steinke G. Applications of vacuum insulation in the building sector. 7th international vacuum insulation symposium proceedings. 2005;p. 43–48.
- [13] Simmler H, Brunner S. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life. *Energy and buildings*. 2005;37(11):1122–1131.
- [14] Erb M, Symons W. Vacuum insulation panel properties and building applications. *IEA/ECBCS Annex*. 2005;39.
- [15] Jelle BP, Gustavsen A, Baetens R. The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of Building Physics*. 2010;34(2):99–123.
- [16] Tenpierik MJ, Cauberg JJ; The Icelandic Building Research Institute Reykjavik. Vacuum insulation panels in building facades: moisture and temperature conditions during insulation. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. 2005;p. 937–944.
- [17] Tenpierik MJ. Vacuum insulation panels applied in building constructions. 2010;p. 126.
- [18] Johansson P. Vacuum Insulation Panels in Buildings: Literature Review. Chalmers University of Technology; 2012.
- [19] Baetens R, Jelle BP, Thue JV, Tenpierik MJ, Grynning S, Uvsløkk S, et al. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*. 2010;42(2):147–172.
- [20] Bringing building protection to a new level [Internett]; 2012 [Hentet 14. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://bit.ly/2JA44Wh>.

- [21] Cuce E, Cuce PM, Wood CJ, Riffat SB. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;34:273–299.
- [22] Skogstad HB. 573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper. SINTEF Byggforsk; 2004.
- [23] Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review. *Energy and Buildings*. 2011;43(4):761–769.
- [24] Ore S, Helseth LE. Kolloider [Internett]. Store norske leksikon; 2018 [Hentet 17. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kolloider>.
- [25] Gurav JL, Jung IK, Park HH, Kang ES, Nadargi DY. Silica aerogel: synthesis and applications. *Journal of Nanomaterials*. 2010;2010:23.
- [26] Lolli N. Aerogel and argon insulation in windows. *The Research Center on Zero Emission Buildings Annual report 2015*. 2015;p. 40–43.
- [27] Koebel M, Rigacci A, Achard P. Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *Journal of sol-gel science and technology*. 2012;63(3):315–339.
- [28] Neugebauer A, Chen K, Tang A, Allgeier A, Glicksman LR, Gibson LJ. Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel. *Energy and buildings*. 2014;79:47–57.
- [29] Riffat SB, Qiu G. A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2012;8(1):1–6.
- [30] Merget R, Bauer T, Küpper H, Philippou S, Bauer H, Breitstadt R, et al. Health hazards due to the inhalation of amorphous silica. *Archives of toxicology*. 2002;75(11-12):625–634.
- [31] Gao T, Ihara T, Grynning S, Jelle BP, Lien AG. Perspective of aerogel glazings in energy efficient buildings. *Building and Environment*. 2016;95:405–413.
- [32] Sikkerhetsdatablad Spaceloft - Silika aerogel [Internett]; 2013 [Hentet 9. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://media.glava.net/mediabank/store/7967/ProdDok-2517-1.pdf>.



- [33] Bygningsfysikk [Internett]. Rådgivende Ingeniørers Forening (RIF); n.d. [Hentet 19. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.rif.no/fag-og-marked/ekspertgrupper/bygningsfysikk/>.
- [34] Bøhlerengen T. 421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag. SINTEF Byggforsk; 2018.
- [35] Gustavsen A. 471.015 Kuldebroer. Konsekvenser og dokumentasjon av energibruk. SINTEF Byggforsk; 2008.
- [36] Byggteknisk forskrift (TEK17) [Internett]. Direktoratet for byggkvalitet; 2017 [Hentet 5. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [37] Byggteknisk forskrift (TEK17) Kapittel 14 Energi [Internett]. Direktoratet for byggkvalitet; 2017 [Hentet: 11. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-1/>.
- [38] Mandilaras I, Atsonios I, Zannis G, Founti M. In Situ Performance Assessment of a Composite Insulation System Consisting of Mineral Wool and Vacuum Insulation Panels. In: 11th International Vacuum Insulation Symposium Proceedings (IVIS2013); 2013. p. 49–50.
- [39] Ihara T, Jelle BP, Gao T, Gustavsen A. Aerogel granule aging driven by moisture and solar radiation. *Energy and Buildings*. 2015;103:238–248.
- [40] BVN 60.015 Fuktregistrering og fuktmåling. Instrumenter og metoder. SINTEF Byggforsk; 2005.
- [41] Acharya A, Joshi D, Gokhale VA. AEROGEL—a promising building material for sustainable buildings. *Chemical and Process Engineering Research*. 2013;9:1–6.
- [42] Materna R, Wancor Z. VIP's for advanced retrofit solutions for buildings. *High Performance Thermal Insulation Systems Vacuum Insulated Products (VIP)*. 2001;p. 55.
- [43] About effesus [Internett]. Effesus; 2018 [Hentet 13. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <http://www. effesus.eu/>.
- [44] Gustavsen A. Nye isolasjonsmaterialer i verneverdige bygg- muligheter og begrensninger [Internett]; n.d. [Hentet 14. mars 2019] Tilgjengelig fra: <https://bit.ly/2VOjDRt>.

- [45] Rodriguez-Maribona I, Grün G. Energy efficiency in european historic urban districts, a practical guidance; 2016.
- [46] Brunner S, Wakili K. VIP used in buildings. 11th International Vacuum Insulation Symposium Proceedings (IVIS 2013). 2013;p. 3–4.
- [47] Maref W, Saber H, Gnanamurugan G, Nicholls M. In-Situ Performance of Residential Wood-Frame Construction Retrofitted Using VIPs. 11th International Vacuum Insulation Symposium Proceedings (IVIS2013);p. 51–52.
- [48] Binz A, Moosmann A, Steinke G, Schonhardt U, Fregnan F, Simmler H, et al. Vacuum insulation in the building sector. Systems and applications (subtask B), Final report for the IEA/ECBCS Annex. 2005;39.
- [49] Sveipe E, Jelle BP, Wegger E, Uvsløkk S, Grynning S, Thue JV, et al. Improving thermal insulation of timber frame walls by retrofitting with vacuum insulation panels—experimental and theoretical investigations. *Journal of Building Physics*. 2011;35(2):168–188.
- [50] Johansson P. Retrofitting of old Exterior Wall with Vacuum Insulation Panels: Measurements of Thermal Properties, Moisture Performance and Practical Considerations [avhandling]. Göteborg: Chalmers University of Technology; 2012.
- [51] Kubina L. LockPlate™ System - ETICS with integrated VIP [Internett]. Saint-Gobain Weber Terranova, a.s.; 2019 [Hentet 13. mars 2019]. Tilgjengelig fra: [http://www.cesb.cz/cesb10/partners/GEN\\_Weber/WeberLockPlate%20A4.pdf](http://www.cesb.cz/cesb10/partners/GEN_Weber/WeberLockPlate%20A4.pdf).
- [52] Verneverdige bygg kan energieffektiviseres [Internett]; n.d. [Hentet 19. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <http://www.zeb.no/index.php/en/news-and-events/89-verneverdige-bygg-kan-energieffektiviseres>.
- [53] Cuce E, Cuce PM. The impact of internal aerogel retrofitting on the thermal bridges of residential buildings: An experimental and statistical research. *Energy and Buildings*. 2016;116:449–454.
- [54] Blom P, Bøhlerengen T. 723.314 Etterisolering av murvegger. SINTEF Byggforsk; 2014.

- [55] Voellinger T, Bassi A, Heitel M. Facilitating the incorporation of VIP into precast concrete sandwich panels. *Energy and Buildings*. 2014;85:666–671.
- [56] Saber HH, Maref W, Gnanamurugan G, Nicholls M. Energy retrofit using vacuum insulation panels: An alternative solution for enhancing the thermal performance of wood-frame walls. *Journal of Building Physics*. 2015;39(1):35–68.
- [57] Buxbaum C, Gallent W, Kircher S, Pankratz O, Seiler A. Thermal rehabilitation of existing building enclosures by using VIP (vacuum insulation panel) sandwich and timber based panels. *Journal of Building Physics*. 2011;(35).
- [58] Gudmundsson K. A parametric study of a metal sandwich VIP. *Proceedings of the 9th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS 2009)*. 2009;p. 18–19.
- [59] IsokalkAS. Bruksområde [Internett]; 2018 [Hentet 13. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.isokalk.no/136-2/>.
- [60] Rehabilitering av eldre mur- og betongbygg [Internett]. Eigendomsavdelingen; 2015 [Hentet 12. mars 2019]. Tilgjengelig fra: [https://www.bergen.kommune.no/bk/multimedia/archive/00251/02\\_Hjelland\\_-Rehabi\\_251223a.pdf](https://www.bergen.kommune.no/bk/multimedia/archive/00251/02_Hjelland_-Rehabi_251223a.pdf).
- [61] Berardi U. The benefits of using aerogel-enhanced systems in building retrofits. *Energy Procedia*. 2017;134:626–635.
- [62] Fixit 222 Superisolerende Kalkmørtel med Aerogel [Internett]; 2018 [Hentet 9. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.isokalk.no/wp-content/uploads/2018/05/180524-Isokalk-Fixit-p%C3%A5f%C3%B8ringsanvisning.pdf>.
- [63] Granås S. Vellykket rehabilitering med aerogel-kalkmørtel [Internett]. Tekniske nyheter; 2016 [Hentet 9. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.tekniskenyheter.no/energieffektivisering/energieffektivisering/vellykket-rehabilitering-med-aerogel-kalkmortel>.
- [64] Aerogel Norge AS- Når bærekraftige løsninger betyr noe [Internett]. Aerogel Norge AS; n.d. [Hentet 7. mars 2019]. Tilgjengelig fra: [https://aerogelnorge.no/wp-content/uploads/2014/11/brosjyre\\_Web.pdf](https://aerogelnorge.no/wp-content/uploads/2014/11/brosjyre_Web.pdf).
- [65] Bugten A. 571.954 Isolerruter. Lys- og varmetekniske egenskaper. SINTEF Byggforsk; 2016.

- [66] Jensen KI, Schultz JM, Kristiansen FH. Development of windows based on highly insulating aerogel glazings. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004;350:351–357.
- [67] Villa i holmenkollen med toppetasje i Aerogel og glass [Internett] Aerogel Norge As; n.d. [Hentet 2019-03-07] Tilgjengelig fra: <https://aerogelnorge.no/villa-i-holmenkollen-med-toppetasje-i-aerogel-og-glass/>.
- [68] Salvesen F, Halvorsen UM, Marini A, Matusiak B, Angelo K, Anter KF, et al. Veileder for bruk av translusente fasader; 2012.
- [69] Pool M. Insulation of a mixed use building with 7 storeys in Munich with VIP. *Proceedings of the 9th international vacuum insulation symposium (IVIS 2009)*. 2009;p. 17–18.
- [70] Pool M. Neubau eines Wohn-und Geschäftshauses mit Ultra-Niedrigenergiehaus-Standard unter Verwendung von Vakuumisulationspaneelen. *Bauphysik*. 2005;27(6):363–368.
- [71] Nussbaumer T, Bundi R, Tanner C, Muehlebach H. Thermal analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels. *Energy and Buildings*. 2005;37(11):1107–1113.
- [72] Appelfeld D. Thermal optimization of curtain wall façade by application of aerogel technology. *Journal of Facade Design and Engineering*. 2017;5(1):118–127.
- [73] Erb M. Vacuum insulation - Panel properties and building applications. *HiPTI - High Performance Thermal Insulation - IEA/ECBCS Annex 39 - Final report*. 2005;39.
- [74] Noreng K. 525.207 Kompakte tak. SINTEF Byggforsk; 2018.
- [75] Brunner S, Simmler H. In situ performance assessment of vacuum insulation panels in a flat roof construction. *Vacuum*. 2008;82(7):700–707.
- [76] OPTIM-R Balcony and Terrace System [Internett]. Kingspan Group; 2019 [Hentet 13. mars 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.kingspan.com/gb/en-gb/products/insulation/insulation-boards/optim-r/optim-r-balcony-and-terrace-system>.
- [77] Kosny J, Fontanini AD, Shukla N, Fallahi A, Watts A, Trifu R, et al. Thermal performance analysis of residential attics containing high performance aerogel-based radiant barriers. *Energy and Buildings*. 2018;158:1036–1048.

- [78] Skogstad HB. 573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper. SINTEF Byggforsk; 2004.
- [79] Lee SW, Lim CH, et al. Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;65:643–661.
- [80] Geving S. Introduksjon [Internett]. Fraunhofer IBP og SINTEF Byggforsk; 2016 [Hentet 9. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi.no/Introduksjon.php3>.
- [81] Thue JV, Oustad M, Gustavsen A. WUFI 1D Pro 4.1 Brukermanual [Internett]. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet; 2007 [Hentet 09. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi.no/WUFI1D-4.1-Bruker-v3.1.pdf>.
- [82] NS-EN ISO 13789; 2017.
- [83] Geving S. 471.111 Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater. SINTEF Byggforsk; 1999.
- [84] Silseth MK, Gåsbak J, Bøhlerengen T. 725.118 Skader i kompakte tak. Årsaker og utbedringer. SINTEF Byggforsk; 2012.
- [85] Aarstad K. 572.205 Betong. Typer, egenskaper og bruksområder. SINTEF Byggforsk; 2016.
- [86] Hva er forskjellen på glassull og steinull? [Internett]. ByggeBolig; n.d. [Hentet 15. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://boligkanalen.no/byggebolig/hva-er-forskjellen-paa-glassull-og-steinull>.
- [87] Sæther NG. Isolasjon for dummies [Internett]. Huseiernes Landsforbund; 2016 [Hentet 15. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.huseierne.no/hus-bolig/tema/oppussing/isolasjon-for-dummies/>.
- [88] Forskjeller som teller [Internett]. AS ROCKWOOL; 2015 [Hentet 19. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://bit.ly/2W7NDXS>.
- [89] Isolasjon i gulvet [Internett]. Sundolitt; n.d [Hentet 19. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://bit.ly/2YzoYc9>.

- [90] Mattsson J, Stensrød O. Håndbok om vannskader - Årsak, undersøkelser, tiltak og gjenoppbygging. Mycoteam; 2009.
- [91] Hva er muggsopp [Internett]. Mycoteam; n.d. [Hentet 18. mai 2019]. Tilgjengelig fra: <https://www.mycoteam.no/inneklima-mugg/hva-er-muggsopp/>.
- [92] Denizou K. 323.101 Atkomst og inngangsparti. SINTEF Byggforsk; 2019.

# Figurer

1	Spesifikk varmekonduktivitet som funksjon av indre gasstrykk for forskjellige isolasjonsmaterialer ved 20 °C og atmosfærisk trykk i omgivelsene [6]. . . .	5
2	Oppbygning av VIPs omhyllende folie med MF [7]. HDPE/LDPE betegner polyetylen med henholdsvis høy/lav densitet. PET betegner polyetyleneterftalat (som er et polymer som brukes som substrat). Adhesive betegner polyuretanen som limer sammen lagene i folien. . . . .	6
3	Økning i vakuumpanelers totale varmeledningskoeffisient $\lambda$ som følge av kuldebrovirkning fra tilstøtende materialer [14], der d angir dimensjonene på vakuumisolasjonspanelene. . . . .	10
4	Spesifikk varmekonduktivitet som funksjon av indre gasstrykk og standardisert porediameter i forskjellige medier [23]. . . . .	14
5	Ovenfor illustreres aerogel mellom glasslag i form av a) monolittisk aerogel og b) granulert aerogel [21]. . . . .	16
6	Aerogeler med fiberforsterkning. a) Aerogelmatte b) Aerogelpanel c) Aerogelmatte på tørris som illustrerer de gode isolerende egenskapene [29]. . . .	16
7	Et ødelagt vindu der aerogelgranulater er spredt utover et område [31]. . .	17
8	Oversikt over kostnader for aerogel, VIP og konvensjonell isolasjon. Enheten for den termiske konduktiviteten $\lambda$ er [W/(mK)] og prisen oppgis i amerikanske dollar per m <sup>2</sup> og disse tallene er hentet fra [27]. . . . .	22
9	Vertikalsnitt av gulvkonstruksjon i fryserom i Bern [42]. Vakuumisolasjonspanelene er farget fiolette. . . . .	23
10	Boligen i Zürich. De to øverste bildene illustrerer boligen før og etter rehabilitering, mens de to nederste illustrerer ytterveggen under renoveringen med aerogelmattene [27]. . . . .	25
11	Aerogel som hulromsisolasjon blåst inn i veggen [45]. . . . .	25
12	Til venstre illustreres veggen som skal etterisoleres og til høyre et nærbilde av innblåsningshullet [27]. . . . .	26
13	Skinnesystem brukt mellom VIP [18]. . . . .	26
14	Stålvinkler med innfestede lekter utenpå vakuumisolasjonspaneler [49]. . .	27
15	Illustrasjoner av elementer fra LockPlate <sup>TM</sup> System hentet fra [18, 51]. . .	28

16	Vertikalsnitt av innervegg i Zurich med tilslutning til både gulv og himling [48]. . . . .	29
17	Innvendig etterisolering av huset i England. De to øverste bildene viser før og de tre nederste bildene viser etter renoveringen [53]. . . . .	30
18	Til venstre illustreres den originale veggen i huset i England, og til høyre den samme veggen med aerogel og gips (rød strek) plassert på innsiden av ytterveggen [53]. . . . .	30
19	Rehabilitering av kjellervegger med AEROCALCE. Bildet til venstre illustrerer den ferdig renoverte kjellerveggen, bildet i midten AEROCALCE systemet og bildet til høyre renoveringen av kjellerveggen [27]. . . . .	31
20	Aerogel i murpuss. Til venstre påføres murpussen på en fasade og til høyre illustreres en nylig rehabilitert murbygning [63]. . . . .	32
21	a) Lysinnlipp gjennom et konvensjonelt vindu, b) lysinnlipp gjennom et aerogelvindu [31]. . . . .	33
22	Aerogel i vinduer. Bildet til venstre ved dagtid [67] og til høyre om kvelden [Foto: Espen Grønli]. . . . .	34
23	Kommersiell løsning for kantforsegling for aerogelvindu [66]. . . . .	34
24	To ulike løsninger for forsegling av kanten av aerogelvinduer [66]. . . . .	35
25	Horizontalsnitt av halve dørbladet, som er symmetrisk [71]. . . . .	36
26	Til venstre vises den usiolerte veggen, midten er alternativ 1 med aerogel plassert under veggen og til høyre er alternativ 2 med aerogel trukket rundt hele veggen [72]. . . . .	37
27	Det gule området viser ledig plass til utvendig isolasjon i vinduskarmen (omtrent 40mm) [72]. . . . .	38
28	Venstre bilde viser et tverrsnitt som sammenlikner en terrassekonstruksjon med tradisjonell isolasjon og en med VIP [19]. Bildet til høyre viser et eksempel der panelene legges på balkong [18]. . . . .	39
29	Til venstre illustreres oppbygningen av løsningen OPTIM-R Balcony and Terrace System. Til høyre illustreres en typisk plan for legging av panelene [76]. . . . .	40
30	Vertikalsnitt fra takterrassekonstruksjon i Leimbach [42]. . . . .	40
31	a) Testhytten fra utsiden, b) konvensjonell oppbygging av loftsrommet, c) laminert aerogel festet til takflaten på loftet [77]. . . . .	41



32	Bildet til venstre viser hytte 1, den konvensjonelle testhytten, mens bildet til høyre viser hytte 2, testhytten med laminert aerogel (rød strek) [77]. . .	41
33	Klimaanalyse gjeldende for Trondheim. Til venstre vises solstrålingsmengde og til høyre vises total regnmengde. . . . .	45
34	Detaljtegning av terrassekonstruksjonen med VIP og betongdekke. . . . .	48
35	Detaljtegning av terrassedekket med VIP uten betongdekke. . . . .	50
36	Monitorposisjoner i konstruksjonsvarianten med VIP og betongdekke. Disse illustreres med sirkler. . . . .	51
37	Detaljtegning av terrassedekket med aerogel og uten betongdekke. . . . .	52
38	Monitorposisjoner i konstruksjonsvarianten med aerogel og uten betongdekke. Disse illustreres med sirkler. . . . .	53
39	Vanninnhold i steinullen i de forskjellige konstruksjonsvariantene med VIP. Innholdet i variantene med og uten betongdekke er så like at grafene overlapper hverandre og er vanskelige å skjelne. . . . .	55
40	Vanninnhold i EPS-en i de forskjellige konstruksjonsvariantene med VIP. .	55
41	Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i Rockwoolsjiktet i konstruksjonsvarianten med betong og lite byggfukt. . . . .	56
42	Temperatur og duggpunkttemperatur i Rockwoolsjiktet i øverste monitorposisjon i konstruksjonsvarianten med betongdekke og lite byggfukt. . . . .	57
43	Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i EPS-sjiktet i konstruksjonsvarianten med betong og mer byggfukt. . . . .	57
44	Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i Rockwoolsjiktet i konstruksjonsvarianten uten betong med mer byggfukt. . . . .	58
45	Temperatur og duggpunkttemperatur i Rockwoolsjiktet i øverste monitorposisjon i konstruksjonsvarianten uten betongdekke med mer byggfukt. . .	58
46	Temperatur og relativ fuktighet i de to monitorposisjonene i EPS-sjiktet i konstruksjonsvarianten uten betong med mer byggfukt. . . . .	59
47	Temperatur og duggpunkttemperatur i EPS-sjiktet i øverste monitorposisjon i konstruksjonsvarianten uten betongdekke med mer byggfukt. . . . .	59
48	Vanninnhold i steinullen i konstruksjonsvarianten med aerogel. . . . .	60
49	Vanninnhold i aerogel. . . . .	60
50	Vanninnhold i EPS-en i konstruksjonsvarianten med aerogel. . . . .	61

51	Temperatur og relativ fuktighet i Rockwoolsjiktet i konstruksjonen med aerogel. . . . .	62
52	Temperatur og duggpunkttemperatur i øverste monitorposisjon i Rockwoolsjiktet i terrassekonstruksjonen med aerogel. . . . .	62
53	Temperatur og relativ fuktighet i aerogelen. . . . .	63
54	Temperatur og relativ fuktighet i EPS-en i terrassekonstruksjonen med aerogel.	63

## Tabeller

1	Veiledende materialeegenskaper for VIP. . . . .	4
2	Veiledende materialeegenskaper for silica aerogel. . . . .	12
3	Energiltak og minstekrav fra § 14 i TEK17 [37]. . . . .	19
4	Isolasjonsmaterialer benyttet i testhyttene i undersøkelsen [77]. . . . .	42
5	Beskrivelse av fukttilskuddklasser [83]. . . . .	44
6	Oppbygning med materialtykkelser og konduktivitet i takterrasse med VIP og betongdekke. . . . .	48
7	Startfuktighet i hvert materialsjikt i terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke. . . . .	49
8	Oppbygning med materialtykkelser og konduktivitet i takterrasse med VIP og uten betongdekke. . . . .	50
9	Startfuktighet i hvert materialsjikt i terrassekonstruksjonen med VIP og uten betongdekke. . . . .	51
10	Oppbygning med materialtykkelser og konduktivitet i takterrasse med aerogel og uten betongdekke. . . . .	52
11	Startfuktighet i hvert materialsjikt i terrassekonstruksjonen med aerogel. . . . .	53
12	Relativ fuktighet i porer i Rockwool og EPS i konstruksjonene med VIP. . . . .	56
13	Relativ fuktighet i porer i Rockwool, aerogel og EPS. . . . .	61
14	U-verdi før og etter i rehabiliterte konstruksjoner. . . . .	66
15	Sammenlikning av rettvendt tak med konvensjonell isolasjon, VIP og aerogel. . . . .	74
16	Oversikt over hvilke bruksområder VIP og aerogel egner seg til i bygninger. . . . .	80

# Vedlegg

- 1 Artikkel
- 2 Plakat
- 3 Terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke, lite byggfukt
- 4 Terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke, mer byggfukt
- 5 Terrassekonstruksjon med VIP uten betongdekke, lite byggfukt
- 6 Terrassekonstruksjon med VIP uten betongdekke, mer byggfukt
- 7 Terrassekonstruksjon med aerogel uten betongdekke, mer byggfukt
- 8 Terrassekonstruksjon med aerogel uten betongdekke, lite byggfukt

# 1 Artikel

# VIP og aerogel – En mulighetsstudie

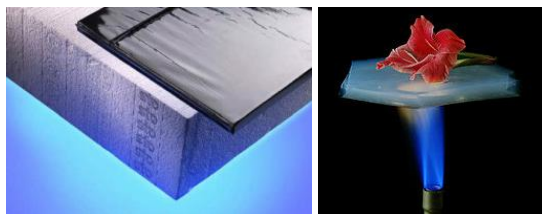
Frida Kristin Ulla\*, Ingrid Astrup\*

\*Institutt for bygg- og miljøteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, Norge

## ABSTRAKT

I takt med den globale oppvarmingen medfører et økt fokus på klima og miljø at byggebransjen utvikler nye normer og krav for energieffektiv utbygging. Kvantitet og kvalitet på materialer som benyttes i bransjen er vesentlige faktorer i denne utviklingen. Vakuumisolasjonspaneler (VIP) og aerogel er isolasjonsmaterialer som sammenliknet med konvensjonelle varianter har overlegne termiske egenskaper. Materialene er nye på markedet og det eksisterer et behov for å kartlegge hvilke fremtidige muligheter de har for bruk i bygninger, samt hvor godt de eventuelt vil fungere.

VIP og aerogel er begge materialer med svært høy porøsitet. Dette, kombinert med svært små porestørrelser, gir ved hjelp av blant annet Knudsen-effekten en svært lav termisk konduktivitet. VIP benytter seg i tillegg av vakuum i porene som opprettholdes av en damp- og lufttett folie. Dette reduserer konduktiviteten ytterligere, på bekostning av at ulike foliematerialer resulterer i kuldebroeffekter langs kantene av panelene. Mens VIP kun kommer i form av innkapslede paneler, opptrer aerogel i form av både paneler, matter og granulat. Materialene illustreres i Figur 1.



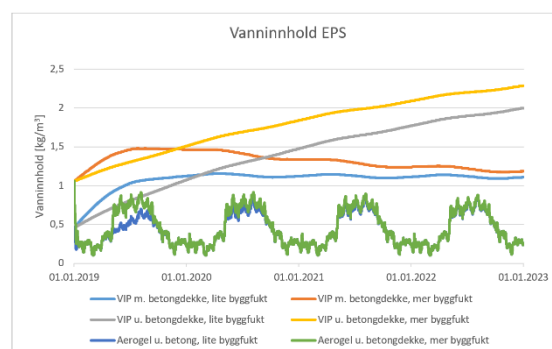
Figur 1 Bildet til venstre illustrer VIP sammenliknet med et konvensjonelt isolasjonsmateriale<sup>1</sup>. Bildet til høyre illustrer aerogel og dens lave konduktivitet<sup>2</sup>.

Der aerogel, særlig i form av matter, er mer brukervennlige forutsetter VIP derimot at en rekke hensyn tas. Panelenes folie er skjør og kan ikke perforeres. Derfor må de legges med beskyttende lag på hver side. Panelene må i vertikale konstruksjoner innfestes med skinnesystemer, lekter, vinkler eller lim. At panelene ikke kan perforeres innebærer også at de ikke kan kuttes og tilpasses på byggeplass, slik at både enkle og kompliserte geometrier i bygningsdeler forutsetter ferdig utarbeidede planer for legging.

Superisolasjonen, i form av både VIP og aerogel, har til sammen et stort omfang bruksområder. På grunn av materialenes foreløpige høye pris kan en del av dem trekkes ut som mer aktuelle. Ved rehabilitering av eksisterende bygninger er det i mange tilfeller av både estetiske, praktiske og

lovpålagte årsaker liten plass for etterisolering. Med superisolasjonens opptil ti ganger bedre varmemotstand enn konvensjonelle materialer er den i mange av disse tilfellene ikke bare attraktiv, men også nødvendig. For nybygg vil i områder med høy boligmarkedsverdi det innsparte arealet som følge av reduserte isolasjonstykkelser raskt kunne lønne seg.

Ved hjelp av det endimensjonale beregningsprogrammet WUFI® Pro er det gjort simuleringer for fukt- og varmetransport i tre ulike konstruksjonsvarianter med superisolasjon, med mer eller mindre byggfukt. Konstruksjonene er kompakte tak, der to varianter implementerer VIP og en variant implementerer aerogel. Bakgrunnen for utførelsen av beregningene er et ønske om å undersøke hvorvidt superisolasjon vil fungere sett fra et bygningsfysisk perspektiv i en bygningsdel i et nordisk klima. Her utgjør faktorer som temperatur, vanninnhold og relativ fuktighet vurderingsgrunnlaget. Figur 2 er variasjonene i vanninnhold gjennom simuleringsforløpet fremstilt grafisk.



Figur 2 Vanninnhold i EPS-sjiktet som er plassert under superisolasjonen i terrassekonstruksjonene.

Resultatene er varierende, noe som tilsier at materialvalg og oppbygging av konstruksjoner er avgjørende for funksjonen til superisolasjonen. Det burde generelt ikke være for mye vann i konstruksjonen, da dette kan svekke superisolasjonens effektivitet og levetid.

Materialene har stort potensiale og viser til gode resultater ved bruk. De kan gi innsparing i form av plass og høyde, og gi mer innslipp for dagslys. For at disse materialene skal kunne brukes i fremtiden er det kritisk at prisen synker, slik at de blir mer konkurransedyktige på markedet. Det må i tillegg gjøres mer forskning på materialenes levetid og miljøvennlighet.

<sup>1</sup> Zwerger and Klein, 2005

<sup>2</sup> Wikipedia, offentlig eiendom

## 2 Plakat

# VIP og aerogel - En mulighetsstudie

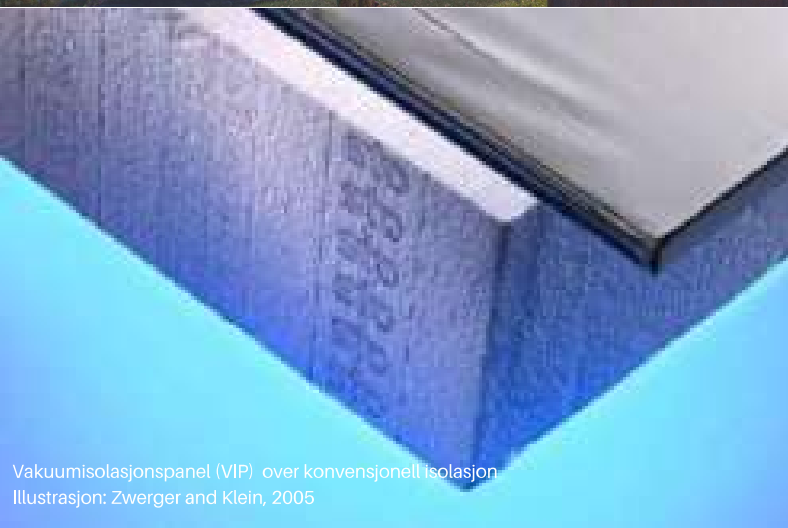
## VIP and Aerogel - A Feasibility Study

Av Frida Kristin Ulla og Ingrid Astrup



### Fremtidens isolasjonsmaterialer

Villa i Holmenkollen med aerogelvinduer  
 Foto: Espen Grønli



Vakuumisolasjonspanel (VIP) over konvensjonell isolasjon  
 Illustrasjon: Zwirger and Klein, 2005



Høyisolerende aerogel  
 Illustrasjon: Wikipedia, offentlig eiendom

### Hva?

- Høyporøse isolasjonsmaterialer
- Termisk konduktivitet så lav som en tidel av konvensjonell isolasjon
- VIP: Paneler
- Aerogel: Paneler, matter, granulater

### Hvorfor?

Plassbesparelse, lysinnslipp, redusert materialforbruk, lettere konstruksjoner, innsparing i byggehøyde

### Materialenes utsikter

- Foreløpig høy pris
- VIP kort levetid
- Med god planlegging kan det gi gode løsninger



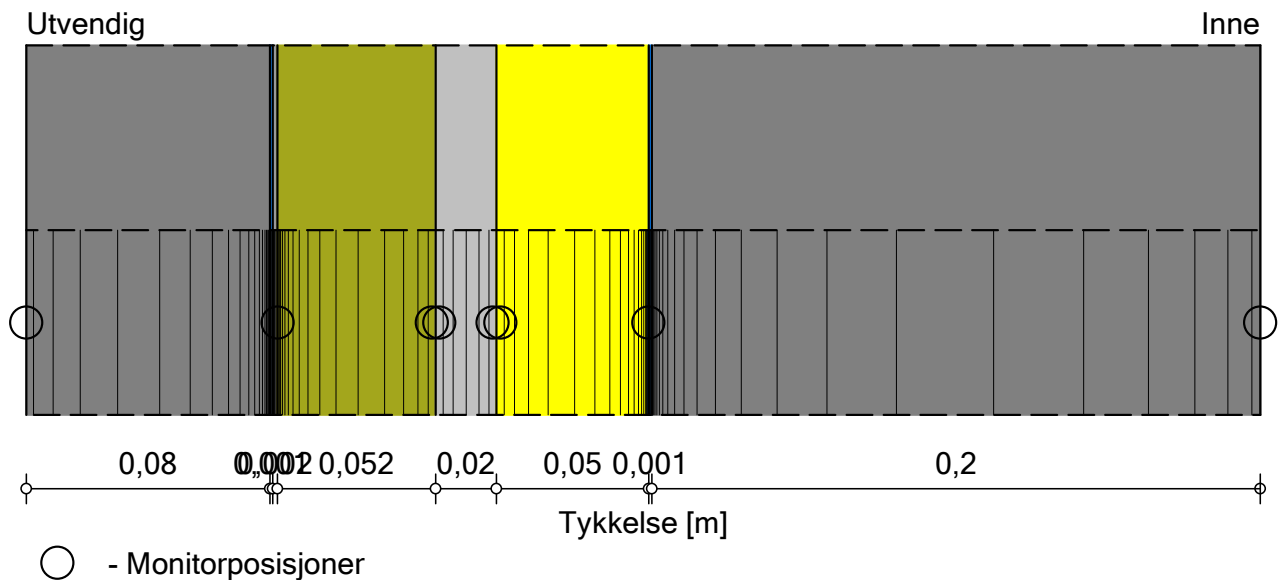
### **3 Terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke, lite byggfukt**

## Prosjektdata






Prosjektnavn	Superisolasjon, bacheloroppgave
Prosjektnummer	
Oppdragsgiver	NTNU og Rambøll
Kontaktperson	Frida Ulla og Ingrid Astrup
Postnr/Sted	
Adresse	
Tel.	
Faks	
E-post	
Ansvarlig	Frida Ulla og Ingrid Astrup
Kommentarer	Analyse av bygningsdeler med VIP eller aerogel.
Dato	25.03.2019

## Konstruksjonsoppbygging

Variant: #1 VIP terrasse betongdekke lite byggfukt



### Materialer:

	- Betong B45	0,08 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- PVC membrane	0,002 m
	- ROCKWOOL TOPROCK DD	0,052 m
	- VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,02 m
	- EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- Betong B45	0,2 m

Samlet tykkelse: 0,406 m

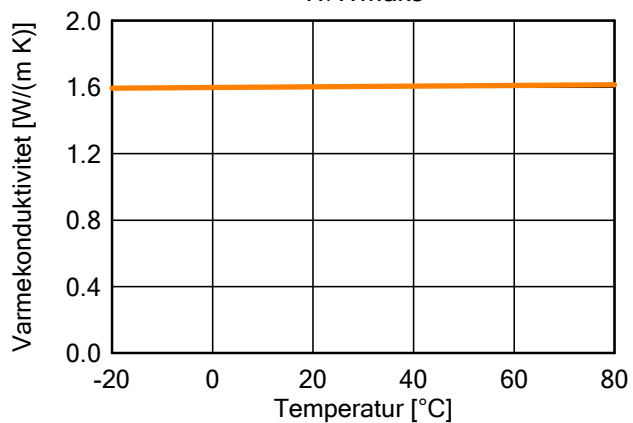
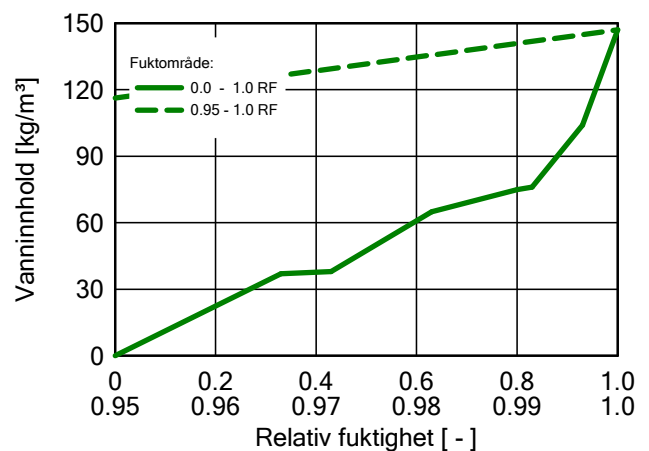
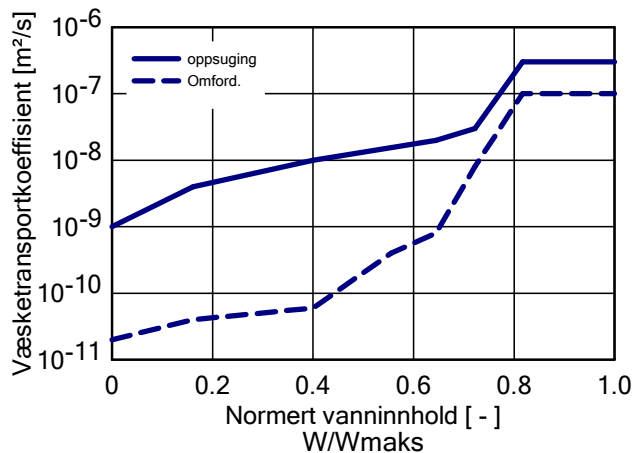
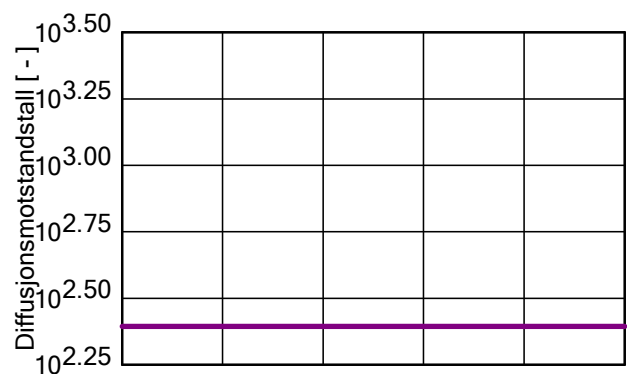
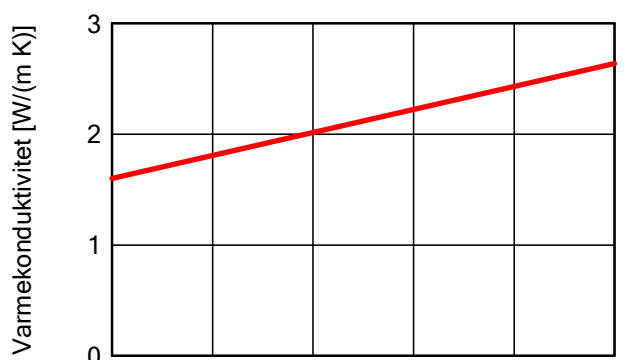
Varmemotstand: 5,7 (m<sup>2</sup> K)/W

U-verdi: 0,17 W/(m<sup>2</sup> K)

# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

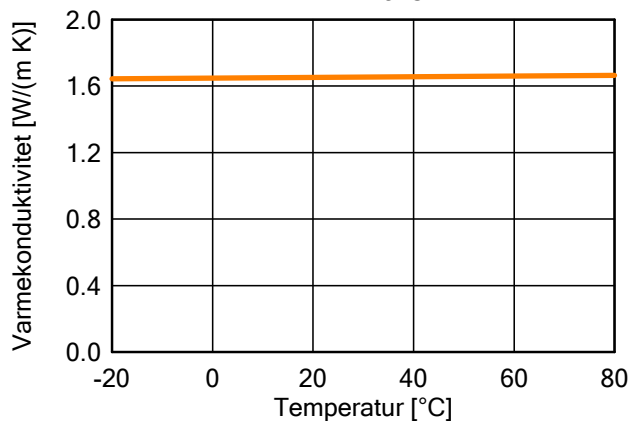
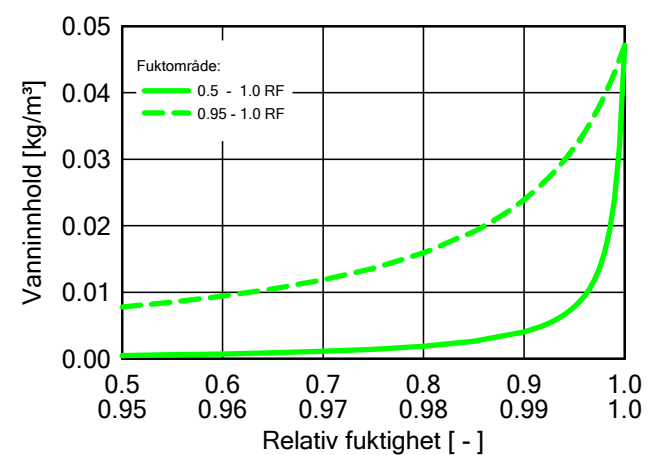
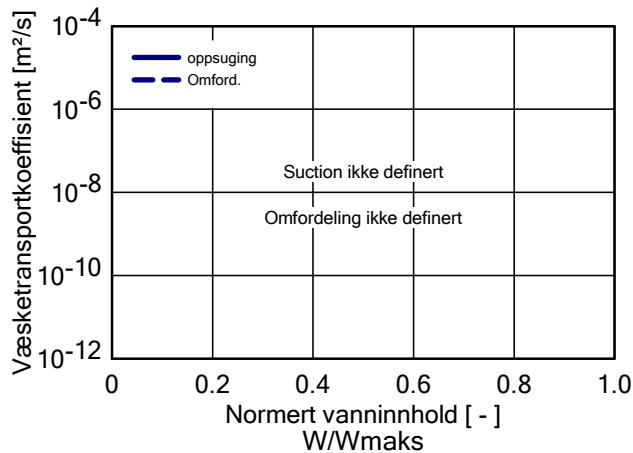
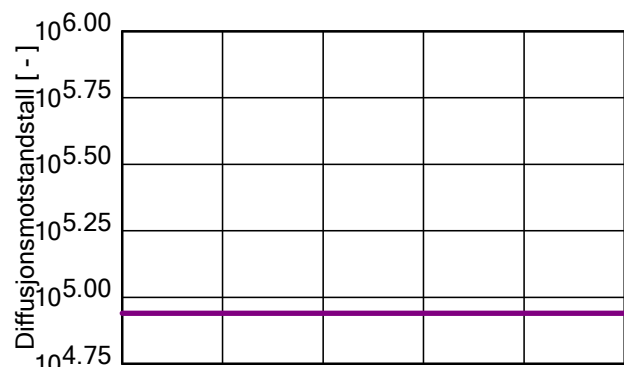
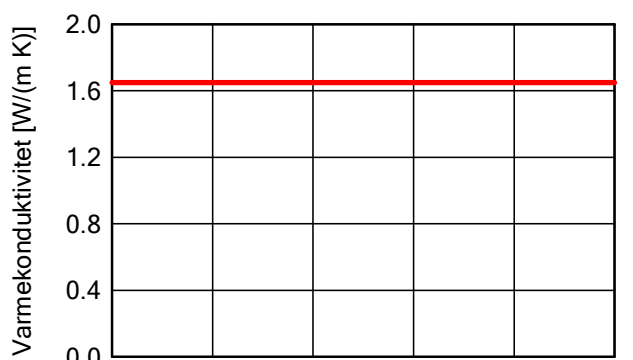
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

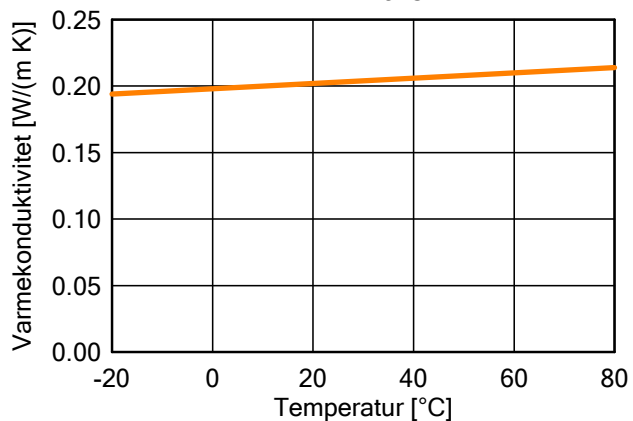
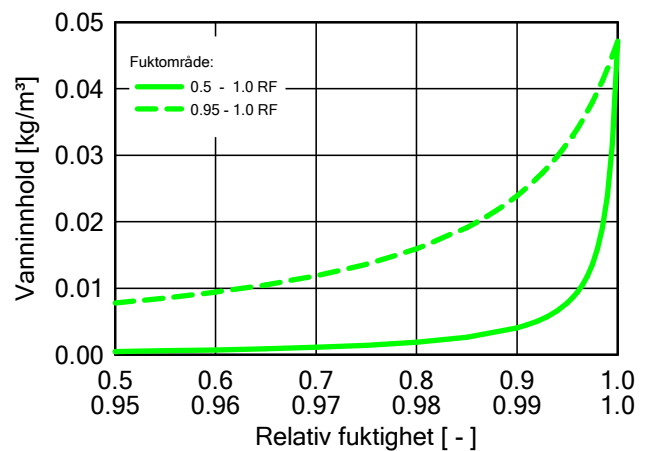
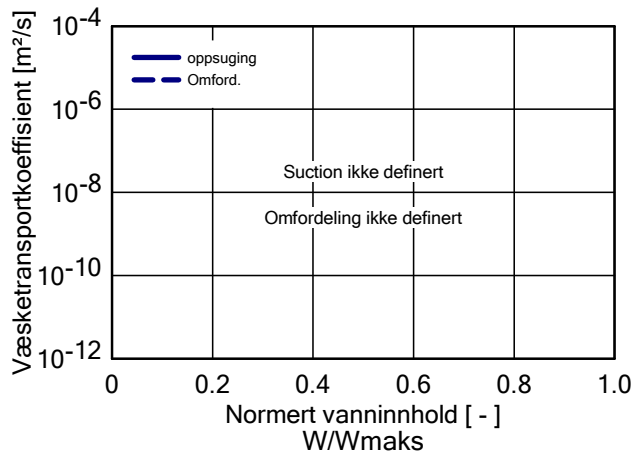
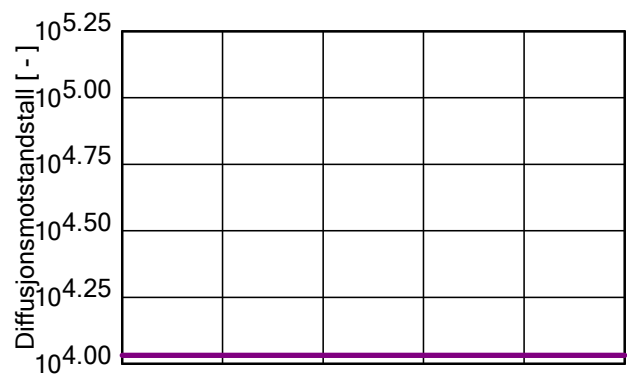
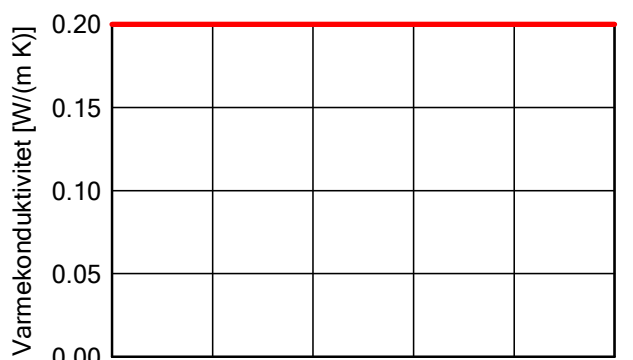
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: PVC membrane

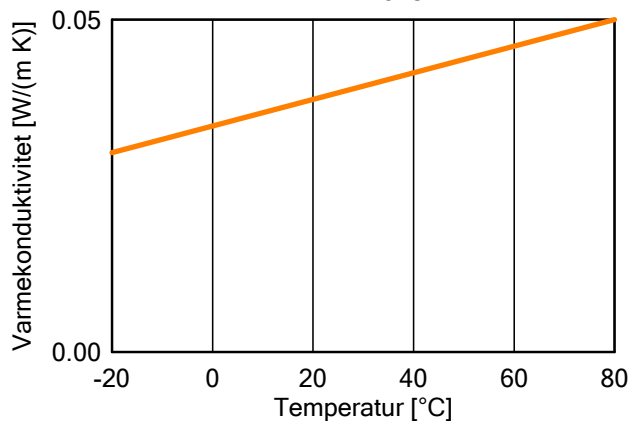
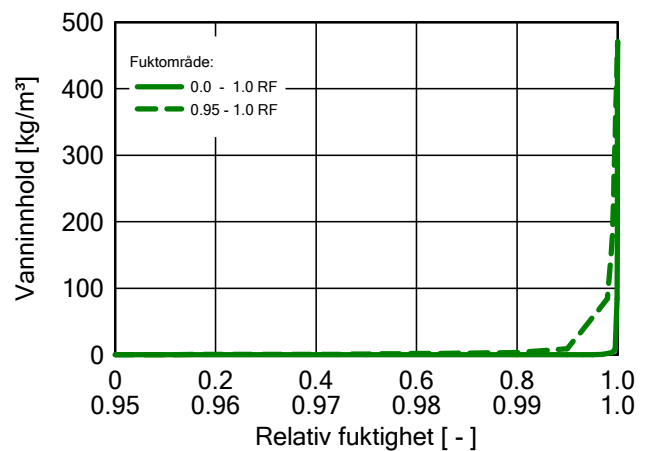
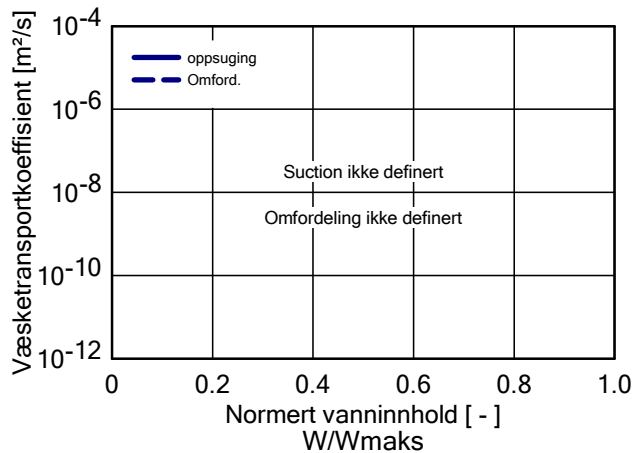
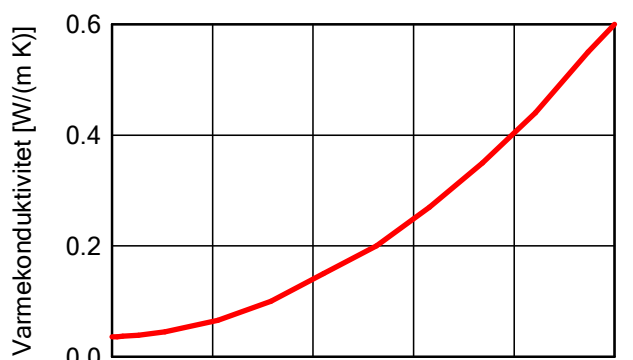
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	10761
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL TOPROCK DD

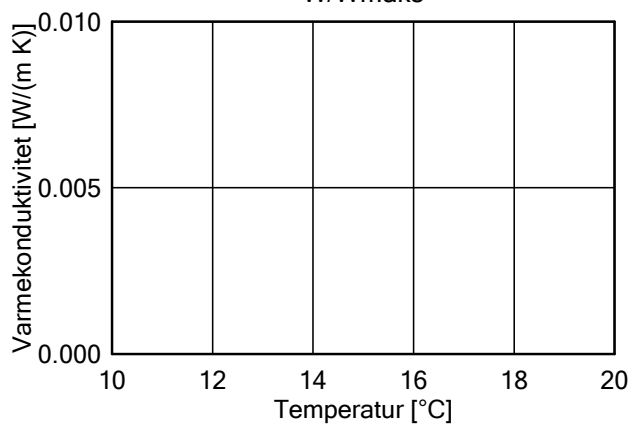
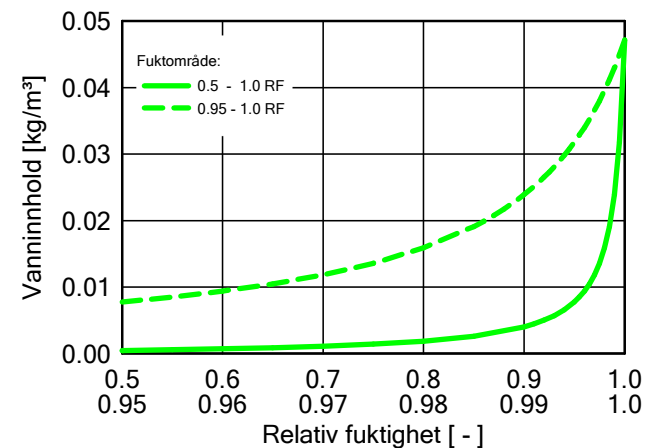
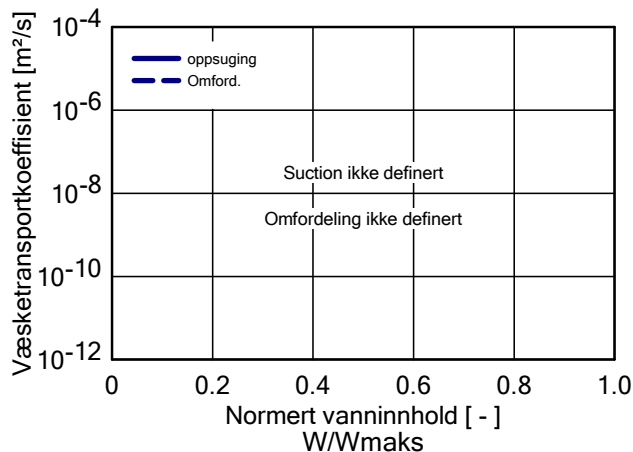
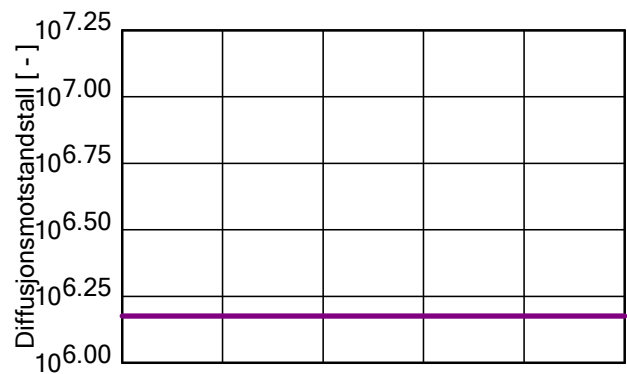
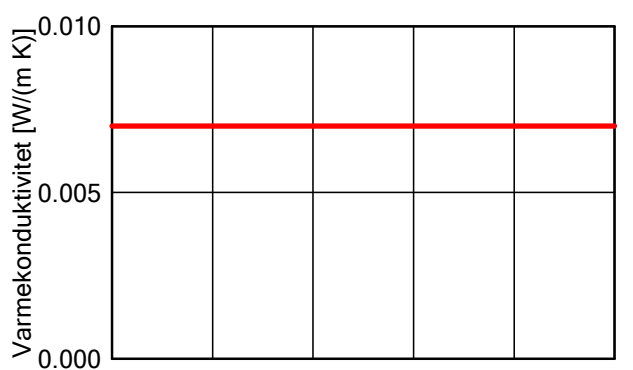
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	176
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	1.2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K)

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	200
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	800
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.007
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	1500000

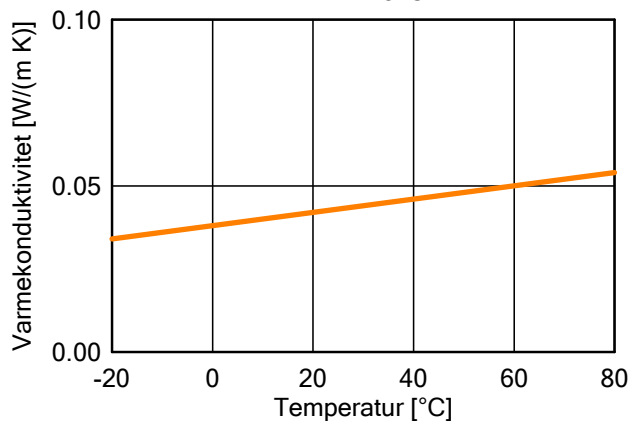
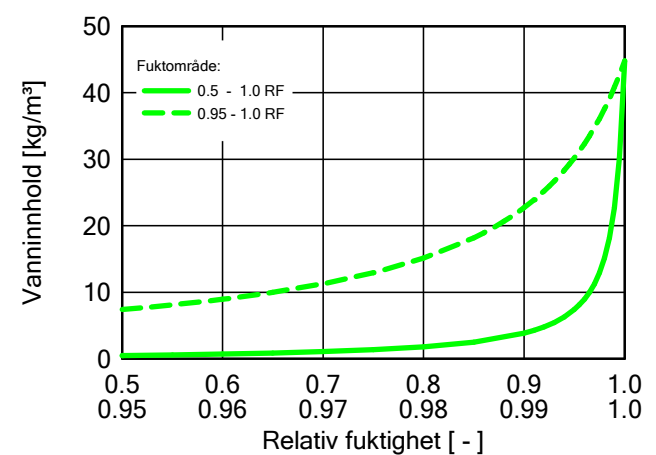
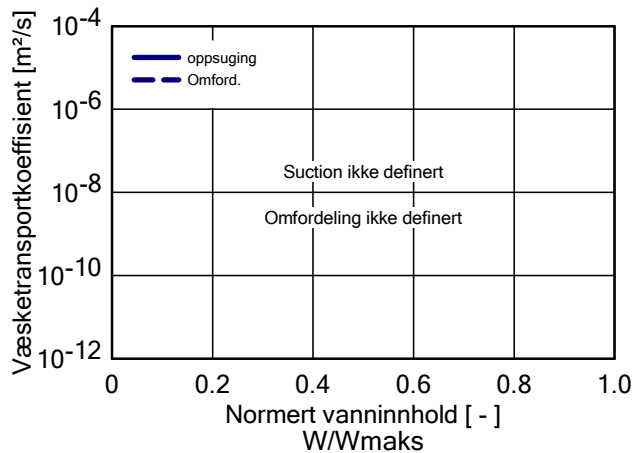
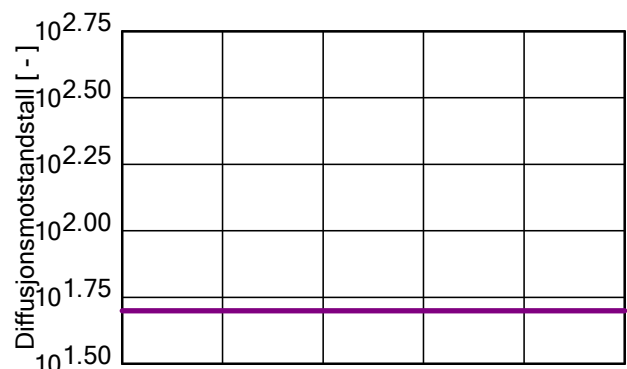
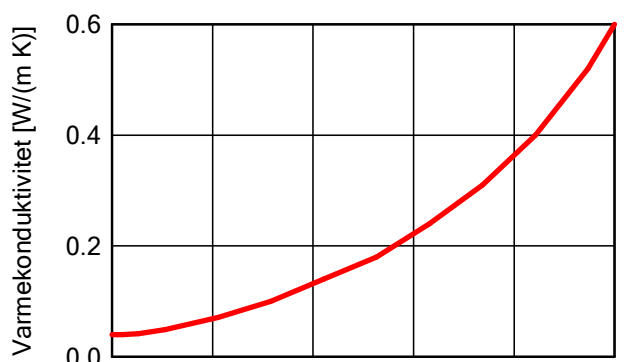




# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>)

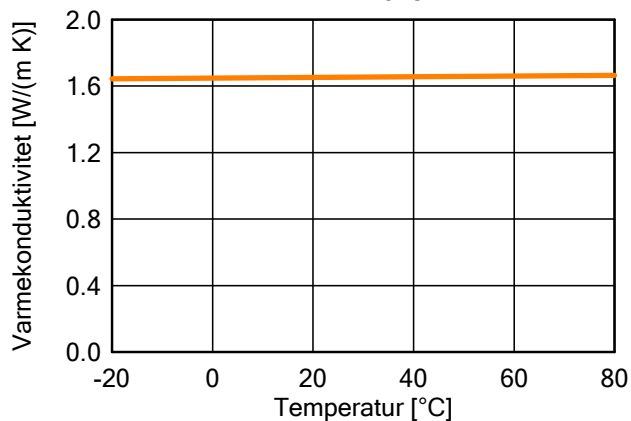
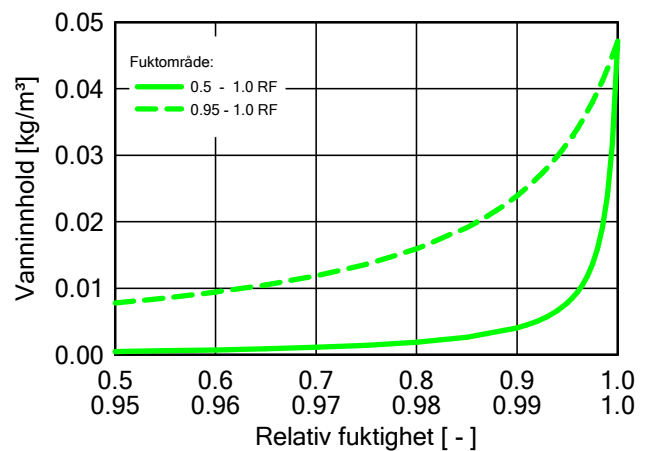
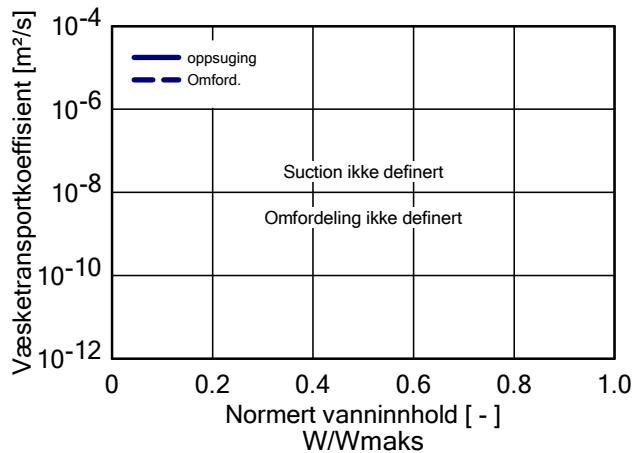
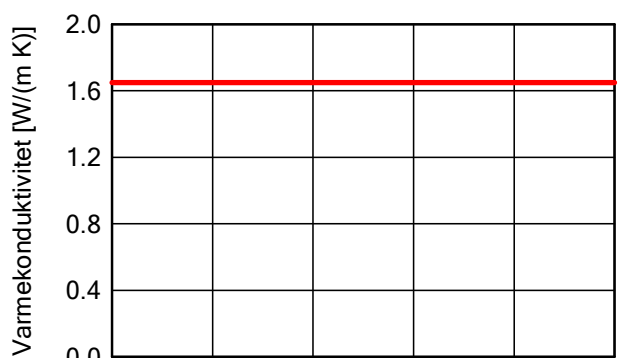
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	30
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	50
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

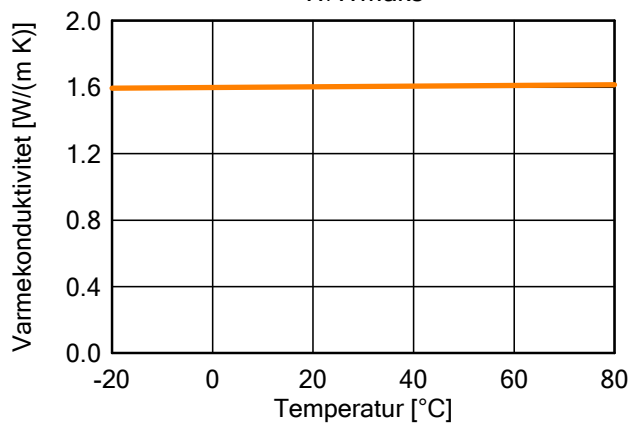
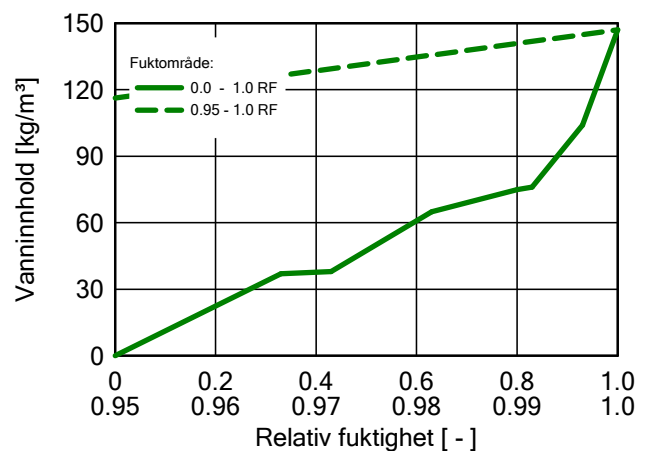
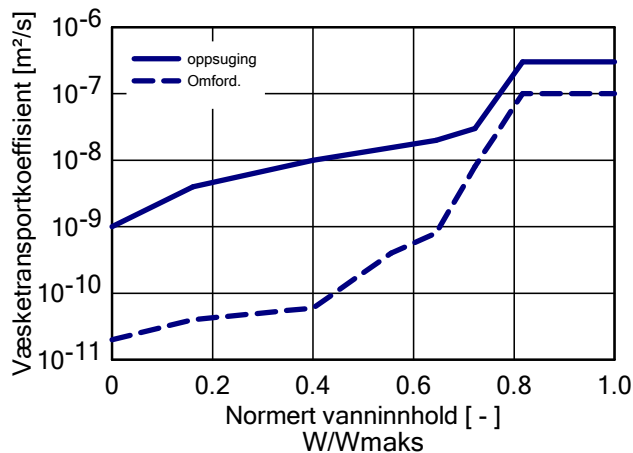
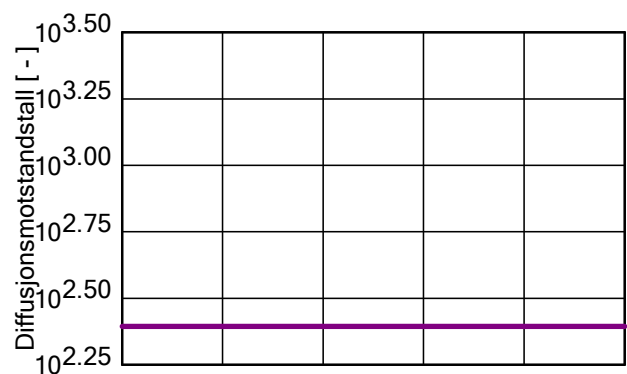
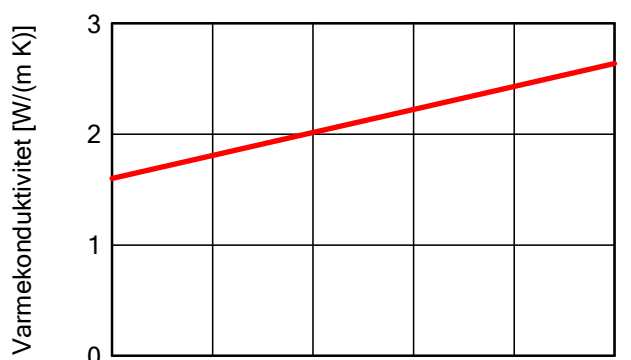
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## Randvilkår

## Ute (venstre side)

Sted for klima: Trondheim; NBI / NTNU  
 Temperaturforskyvning: 0.0 °C  
 Orientering / Helning: Vest / 0 °  
 Avkjøling ved stråling om natten: nei

## Inne (høyre side)

Inneklima: EN 13788  
 Fuktklasse 3; Temperatur: 20 °C

## Overflaters overgangskoeffisient

## Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Lys	[-]	0.2
Langbølget strålingsemissivitet	Lys	[-]	0.9
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1,0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

## Inne (høyre side)

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

## Resultater fra siste beregning

## Status for beregning

Dato/tid for beregning	03.05.2019 08:39:15
Regnetid	1 min,46 sek.
Begynn / Avslutt beregning	01.01.2019 / 01.01.2023
Antall konvergensfeil	0

## Numerisk kvalitetssjekk

Samlet fukttransport, utv. (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,69 -1,4
Samlet fukttransport, innv. (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	14,16 0,3
Balanse 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-15,18
Balanse 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-15,18

Vanninnhold [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	Slutt	Min.	Maks.
Totalt vanninnhold	39,78	24,33	22,57	39,78

Vanninnhold [kg/m<sup>3</sup>]

Sjikt/Materiale	Start	Slutt	Min.	Maks.
Betong B45	147,00	137,14	117,23	148,92
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,03	0,00	0,04
PVC membrane	0,00	0,03	0,00	0,04
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,00	0,20	0,00	0,20
VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,00	0,00	0,00	0,00
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK)	0,46	1,11	0,46	1,15
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Betong B45	140,00	66,47	63,93	140,03

## Tidsintegralet av strømningsstetthetene

Varmestrømstetthet, venstre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-1017,43
Varmestrømstetthet, høyre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-348,0
Fuktstrømmer, venstre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,77
Fuktstrømmer, høyre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	14,67

## Hygrotermiske kilder

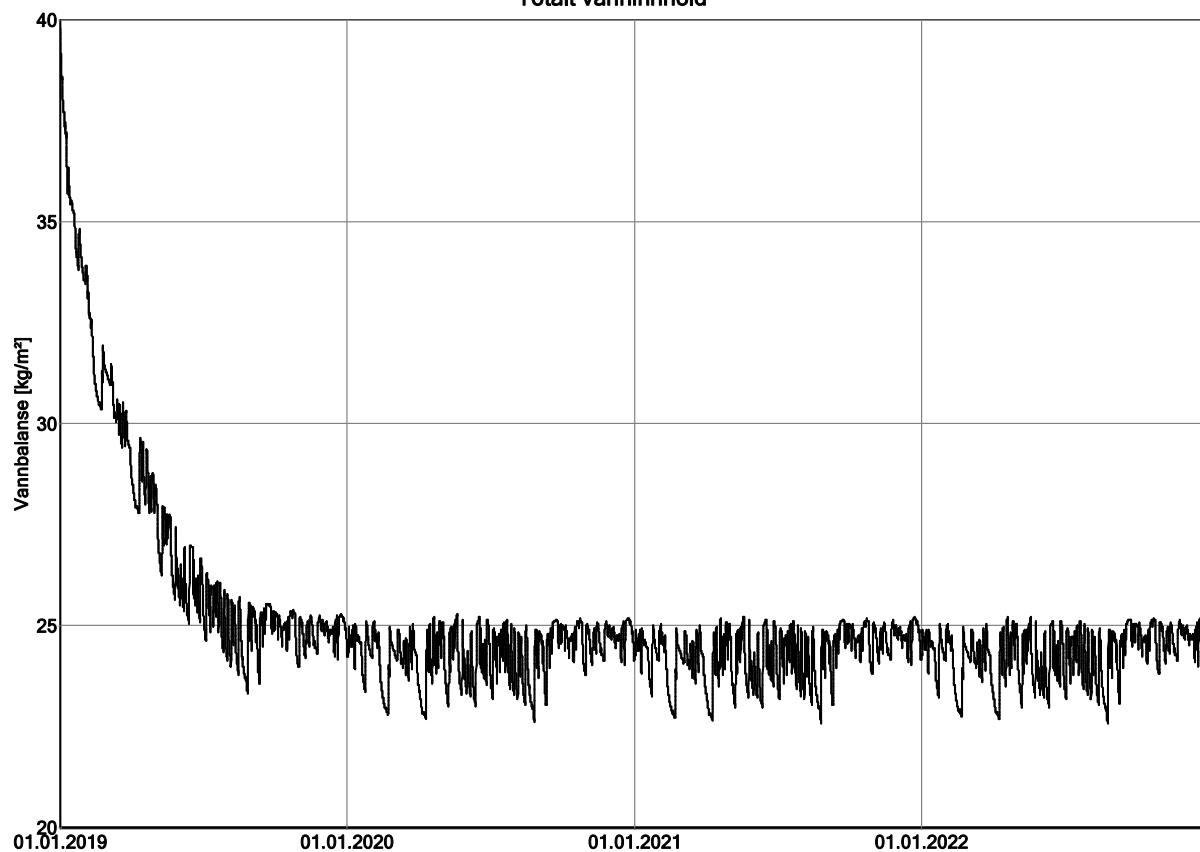
Varmekilder	[MJ/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0

## WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### Hygrotermiske kilder (Fortsett)

Begrensete fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
-----------------------	----------------------	-----

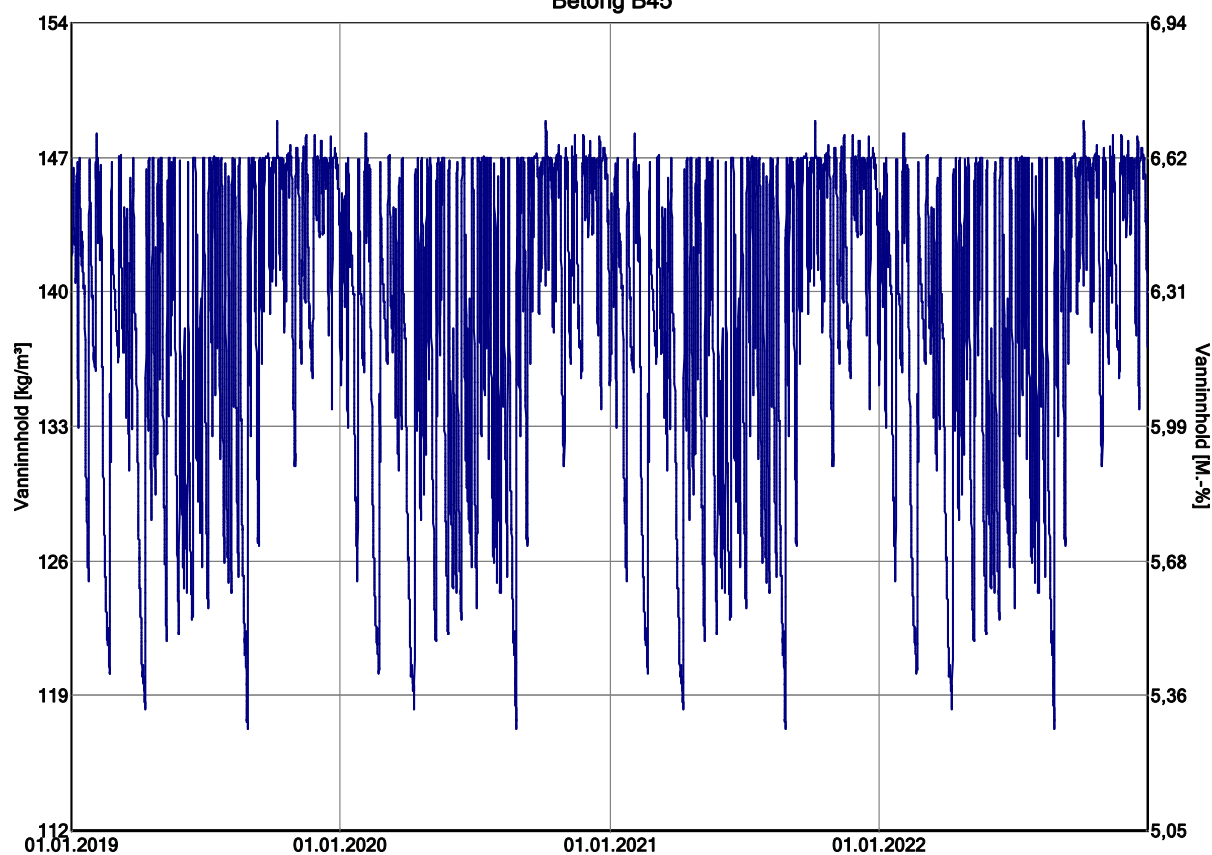
### Totalt vanninnhold



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

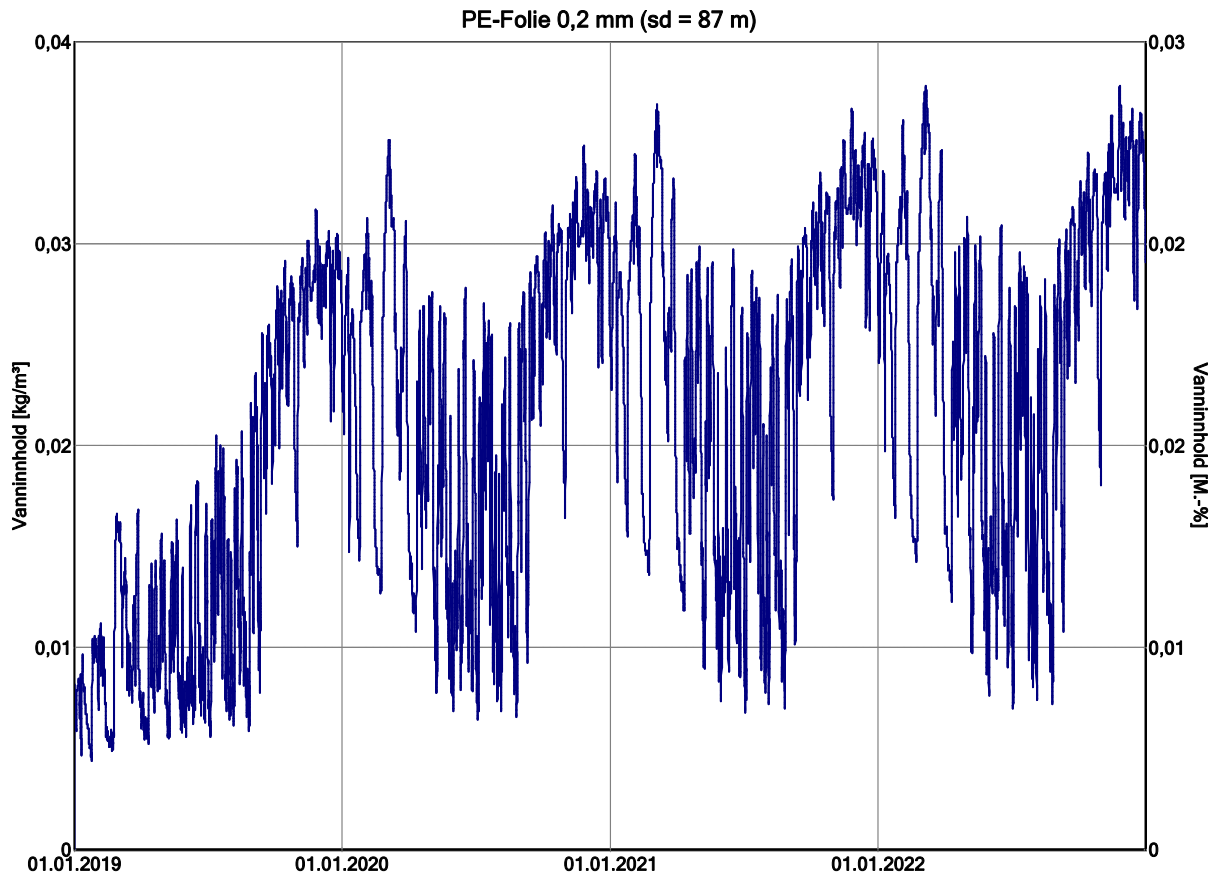
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### Betong B45



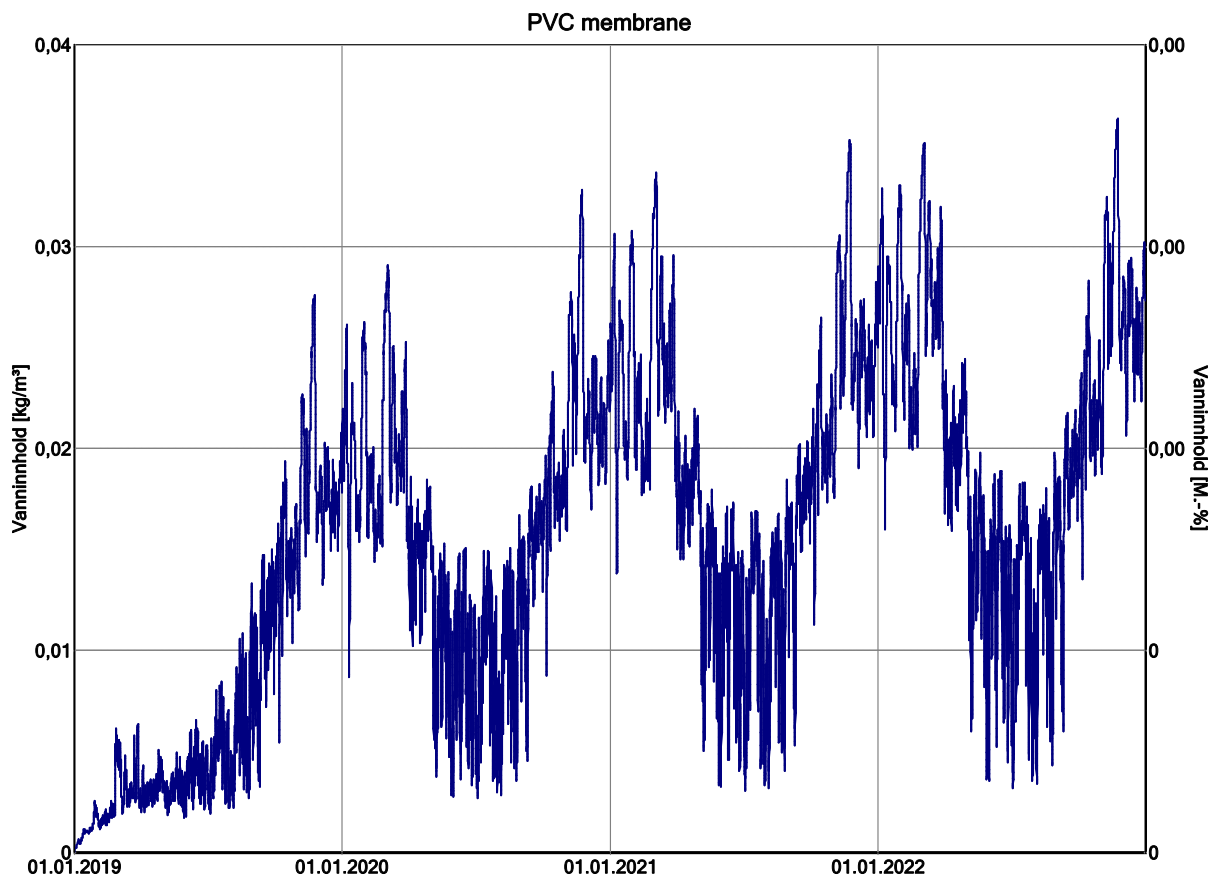
WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

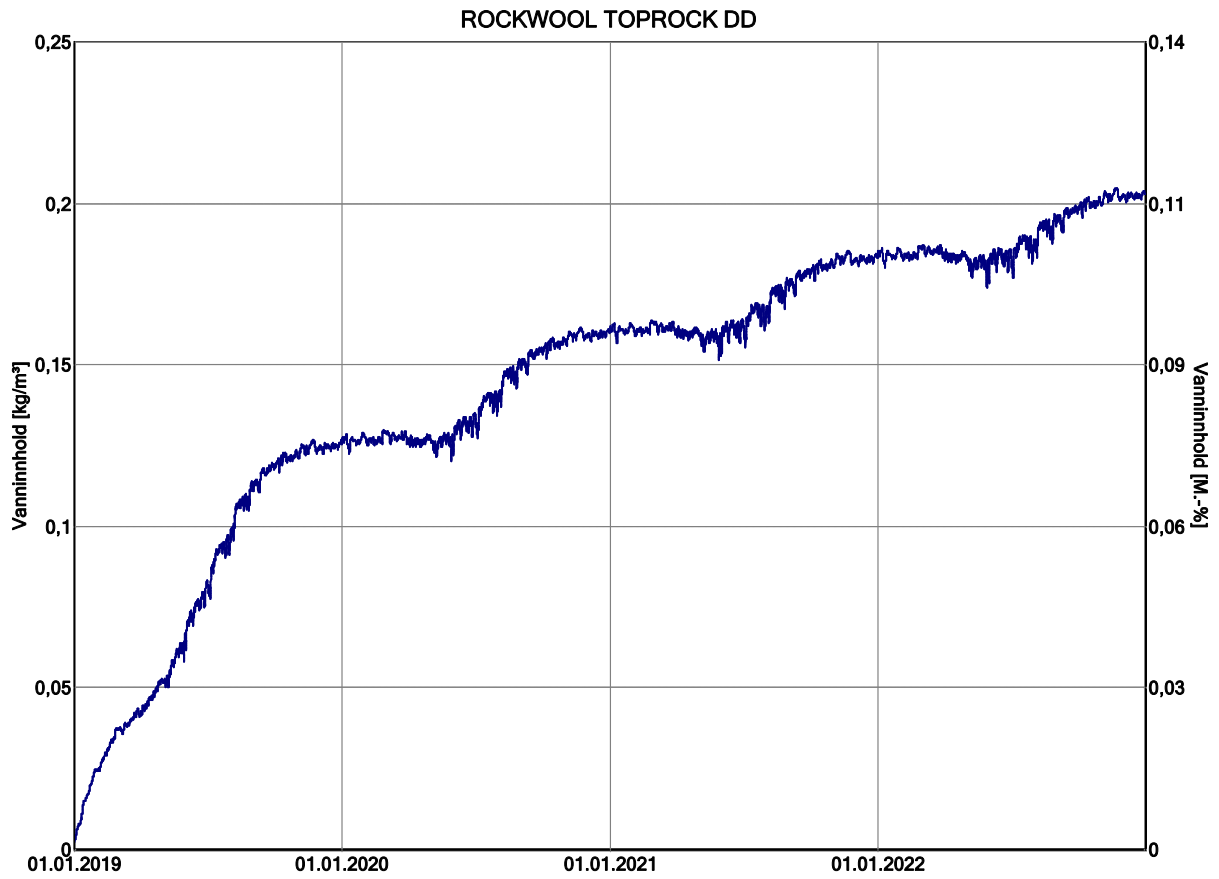
WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

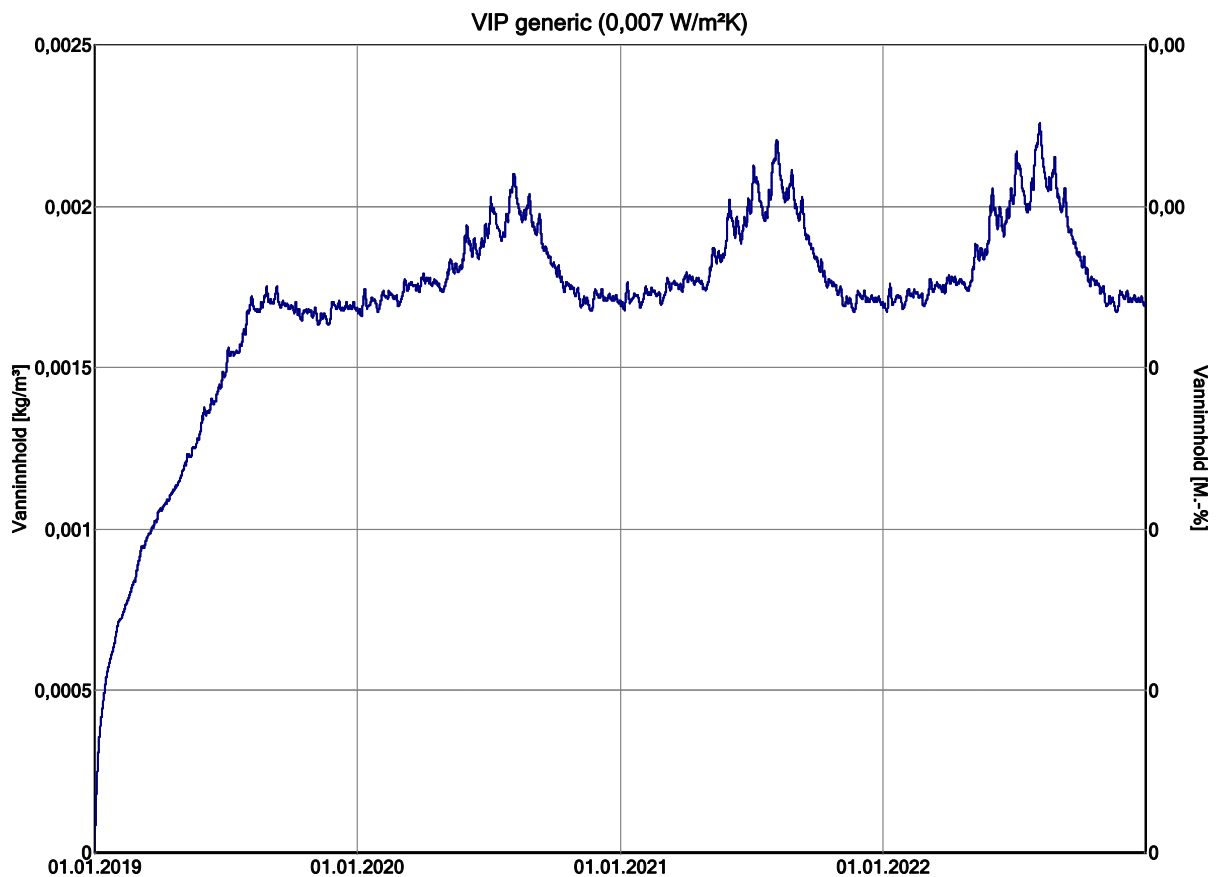
WUFI Pro 6.2 NonCommercial





WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

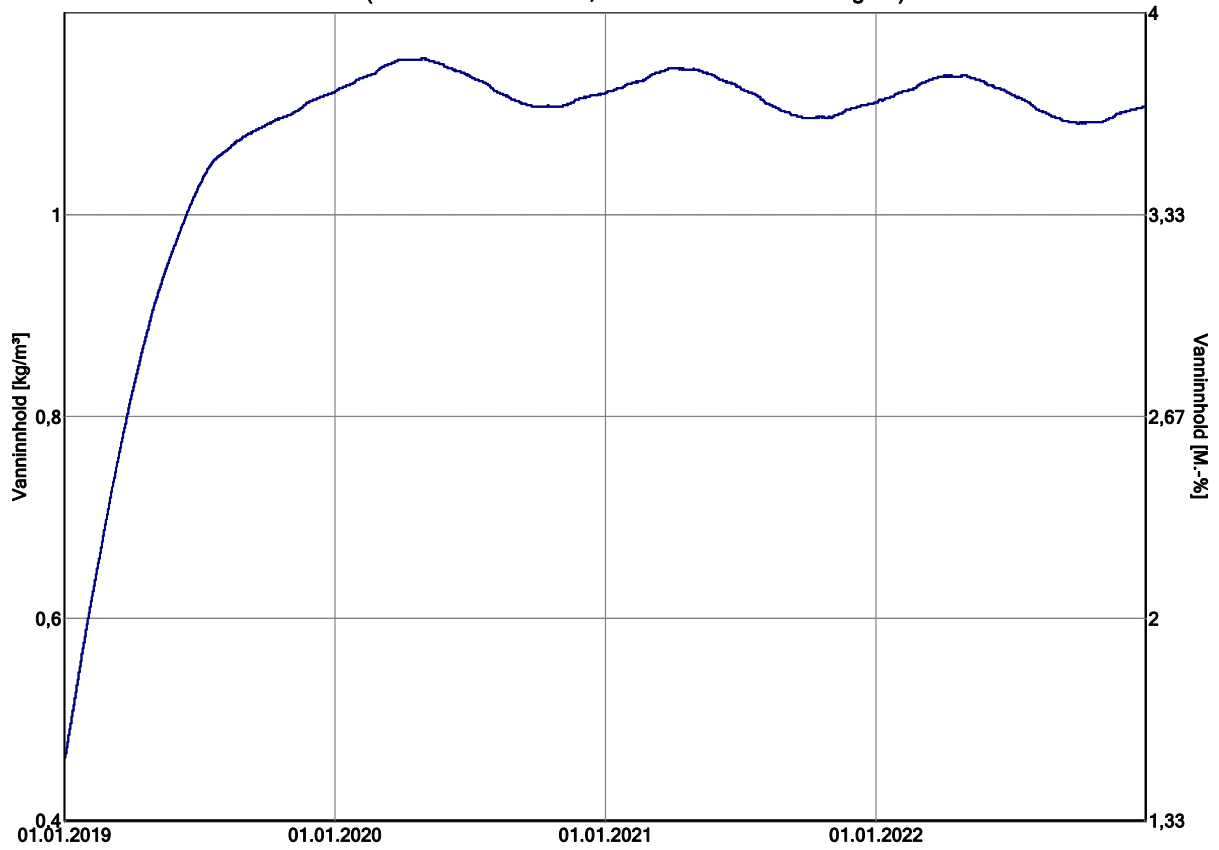
WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

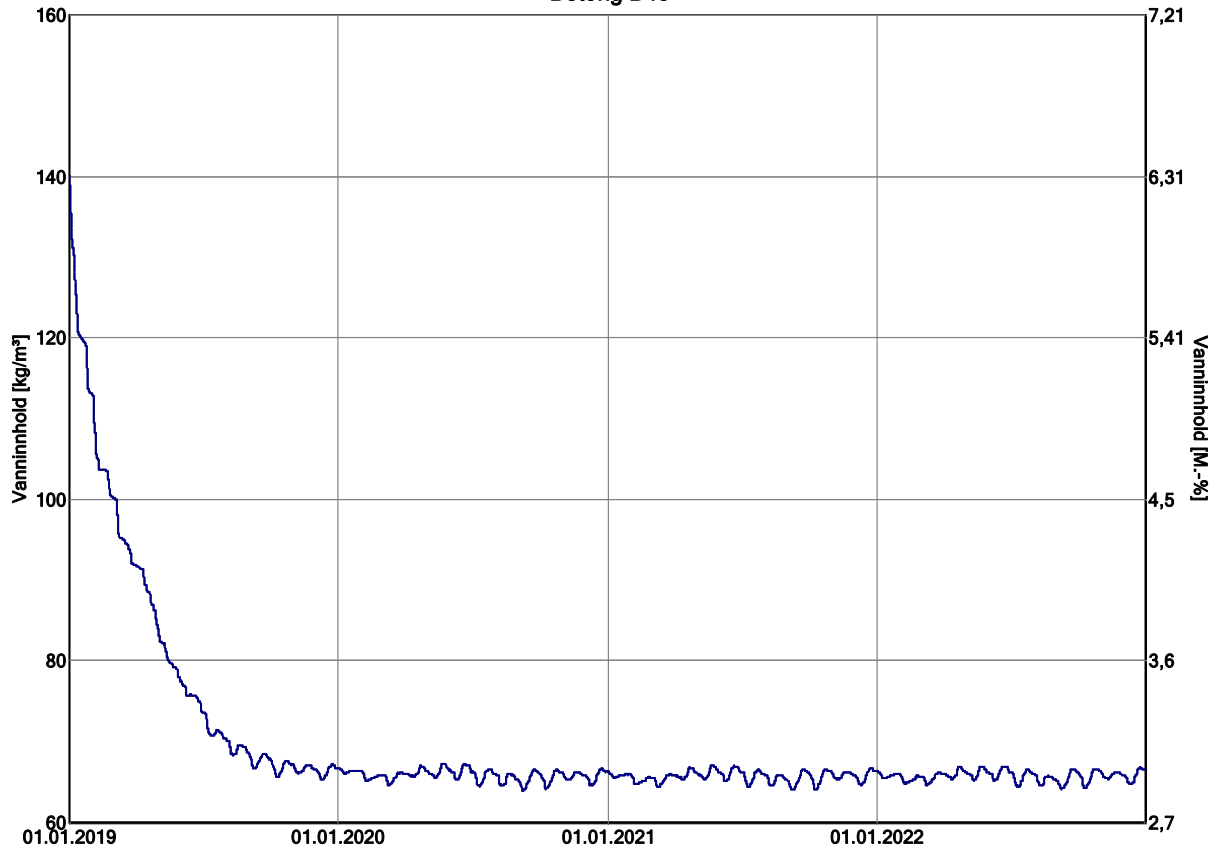
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

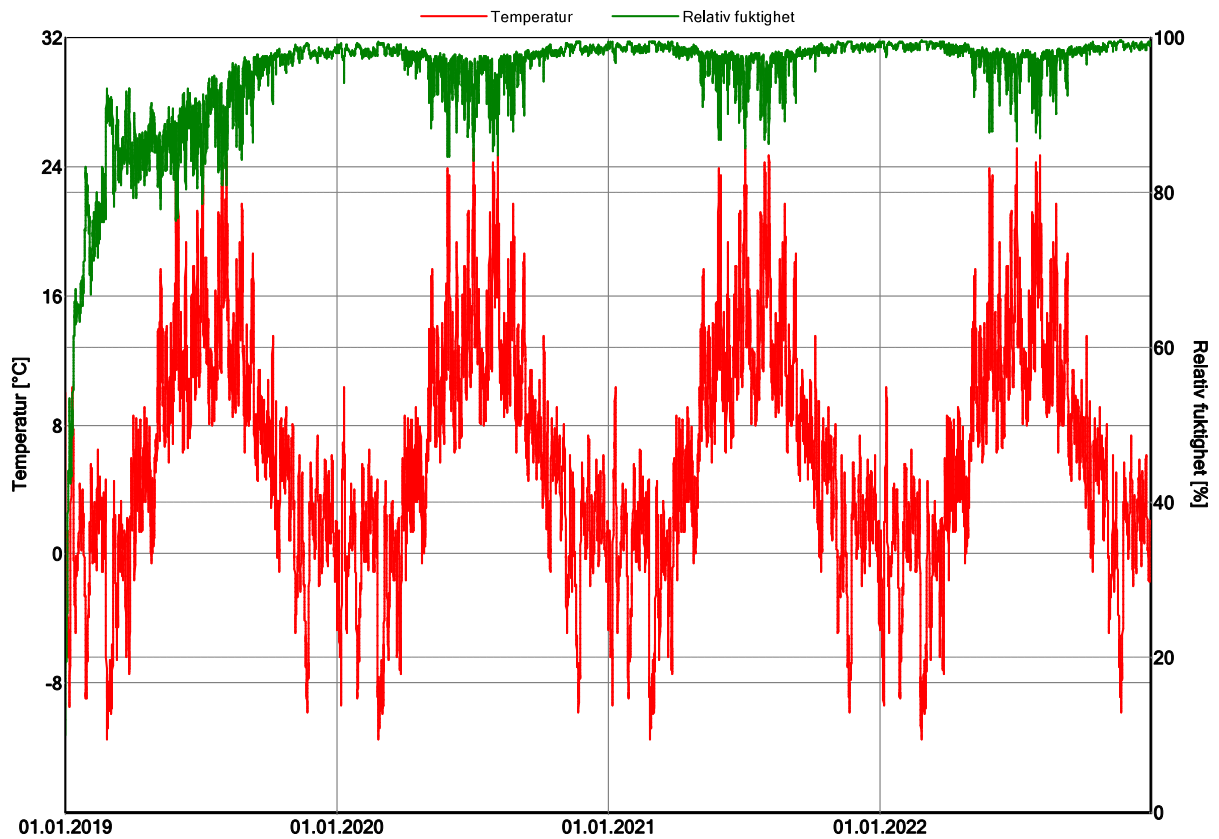
### Betong B45



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

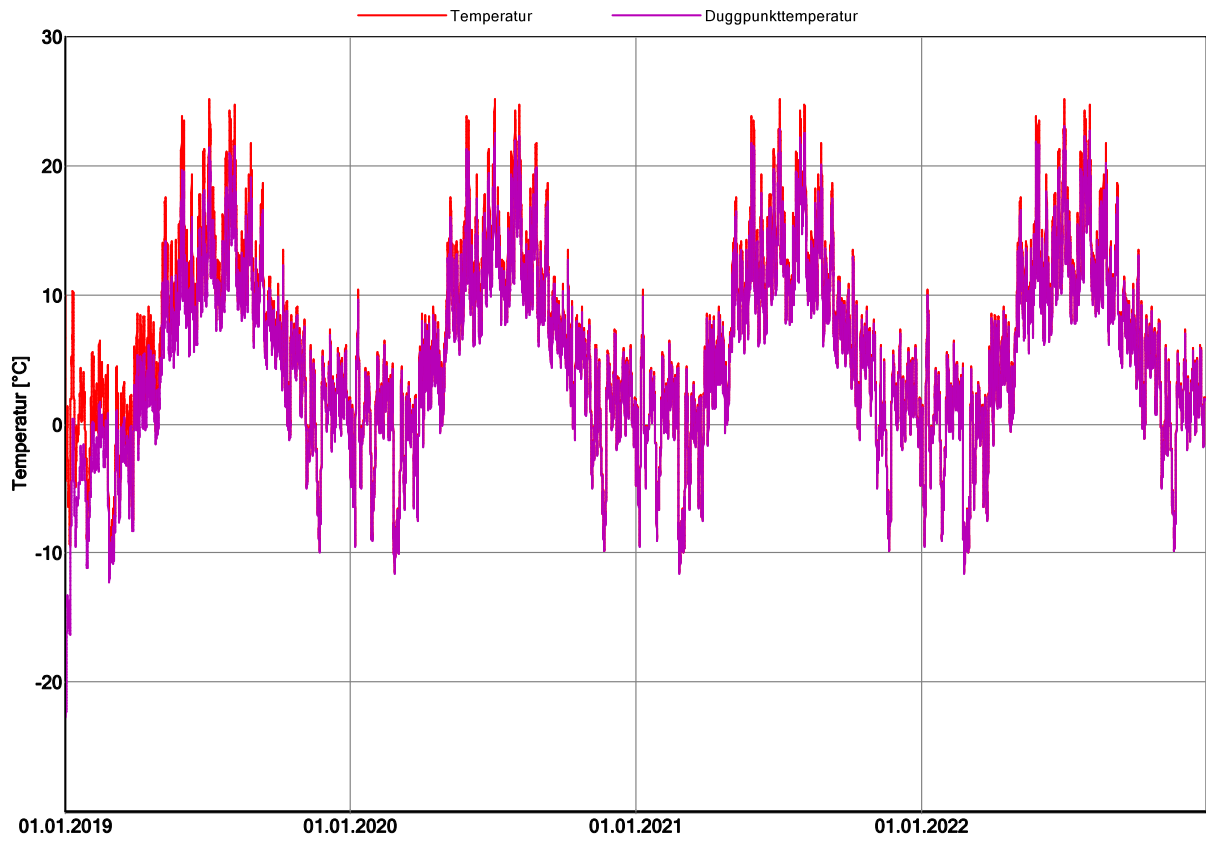
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000118 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

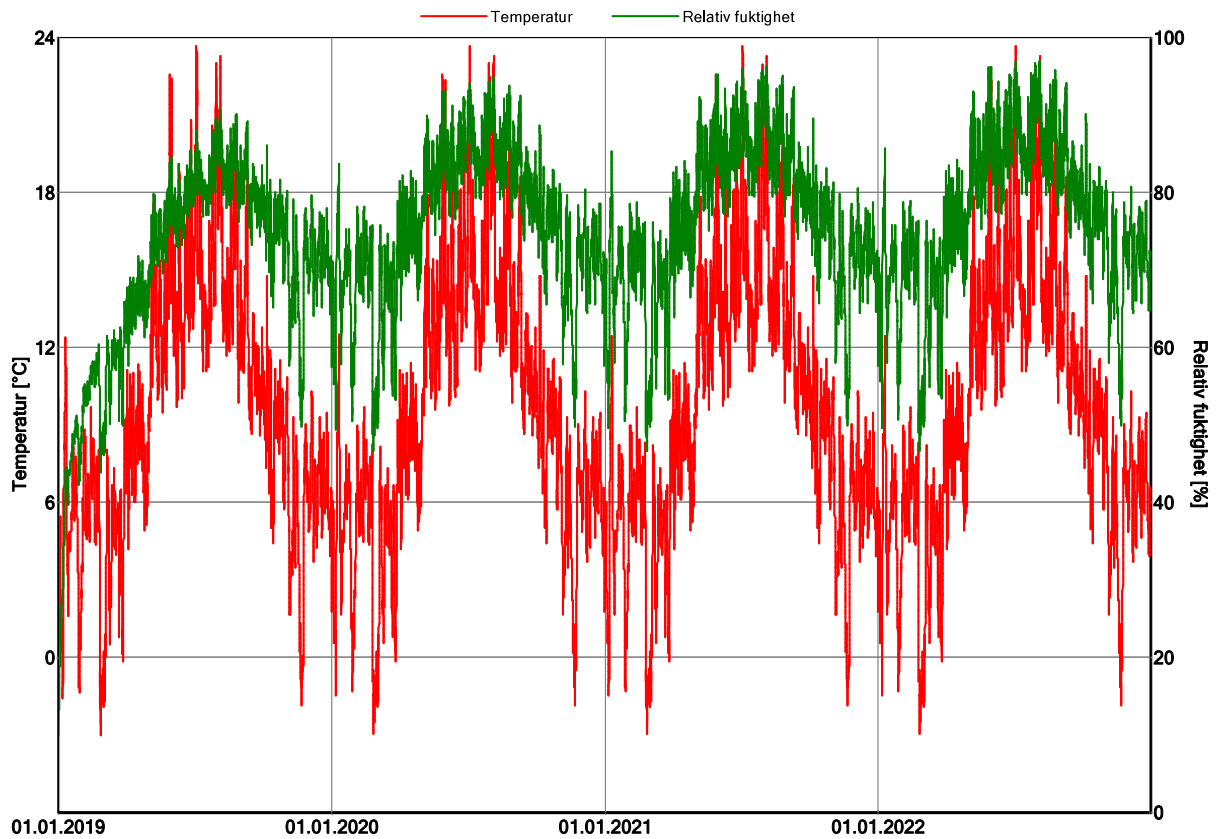
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000118 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

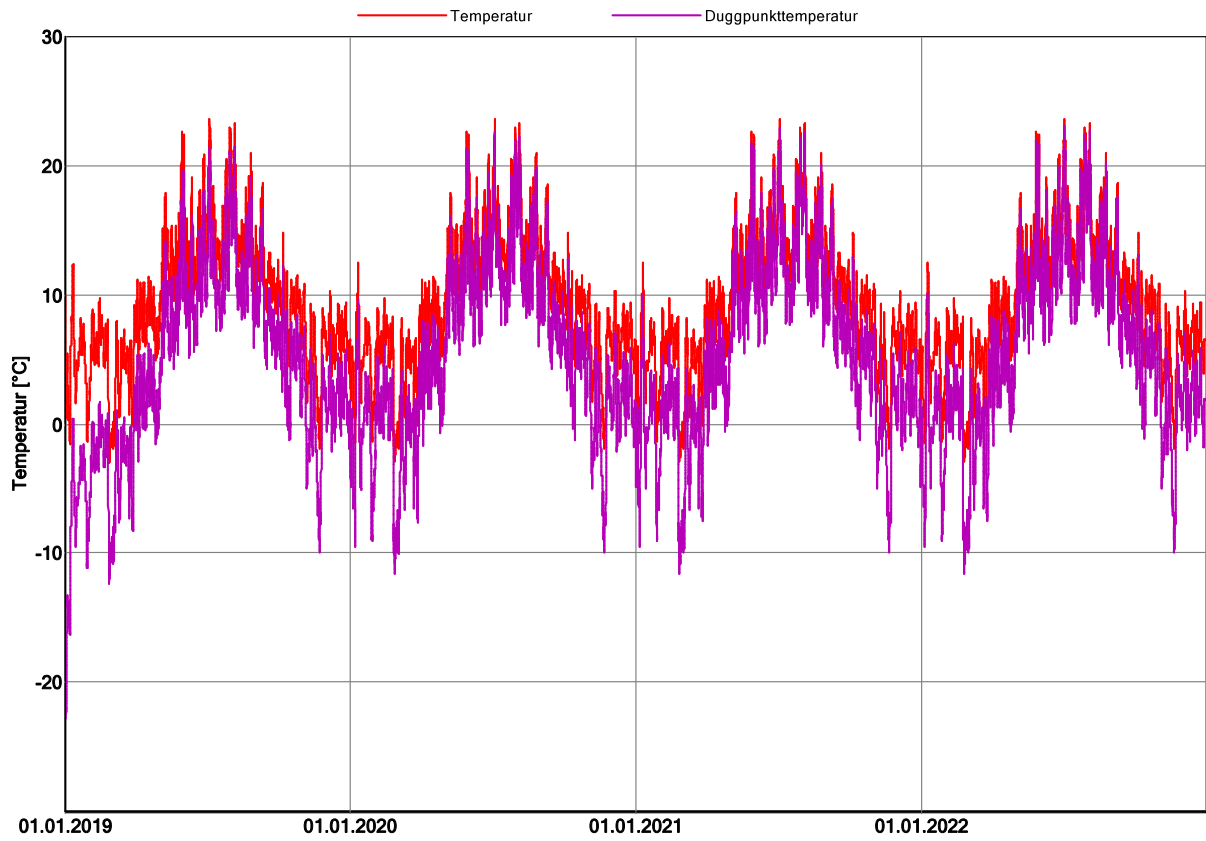
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,050757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

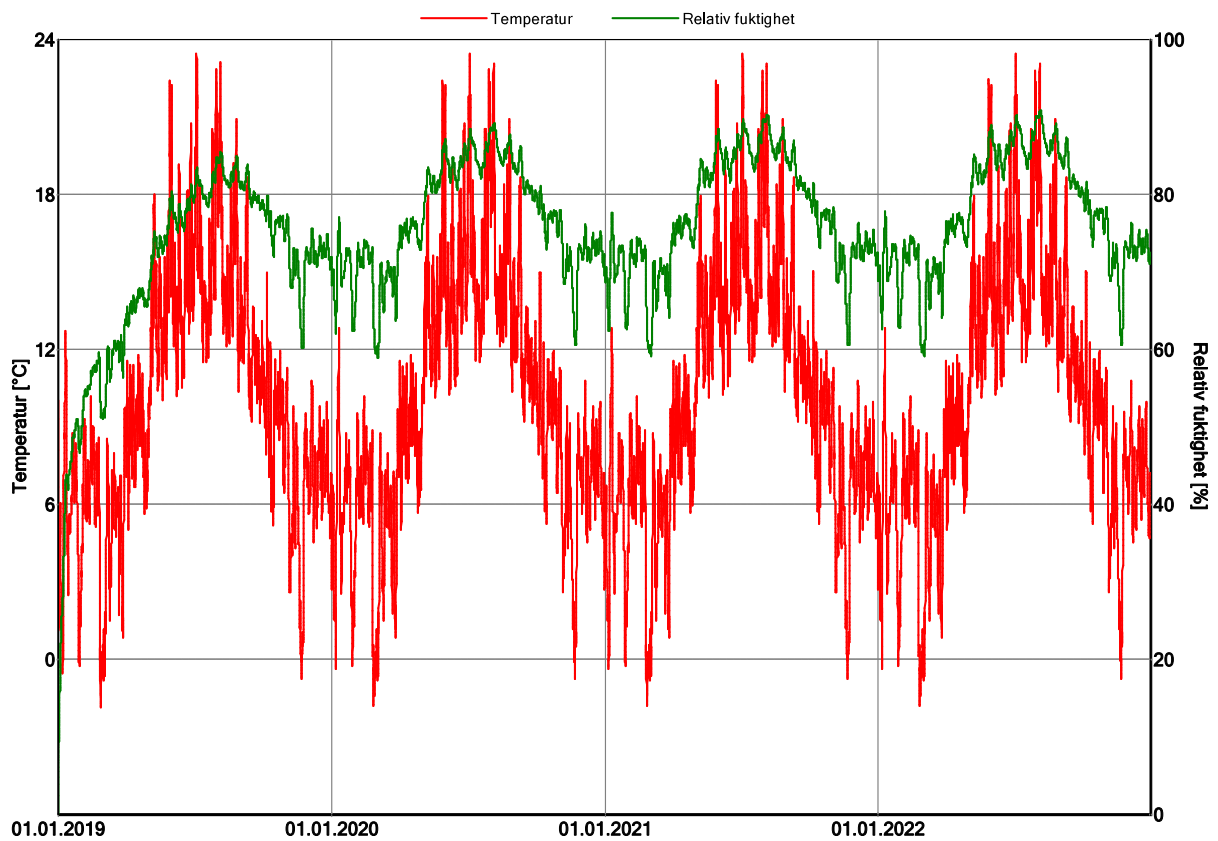
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,050757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

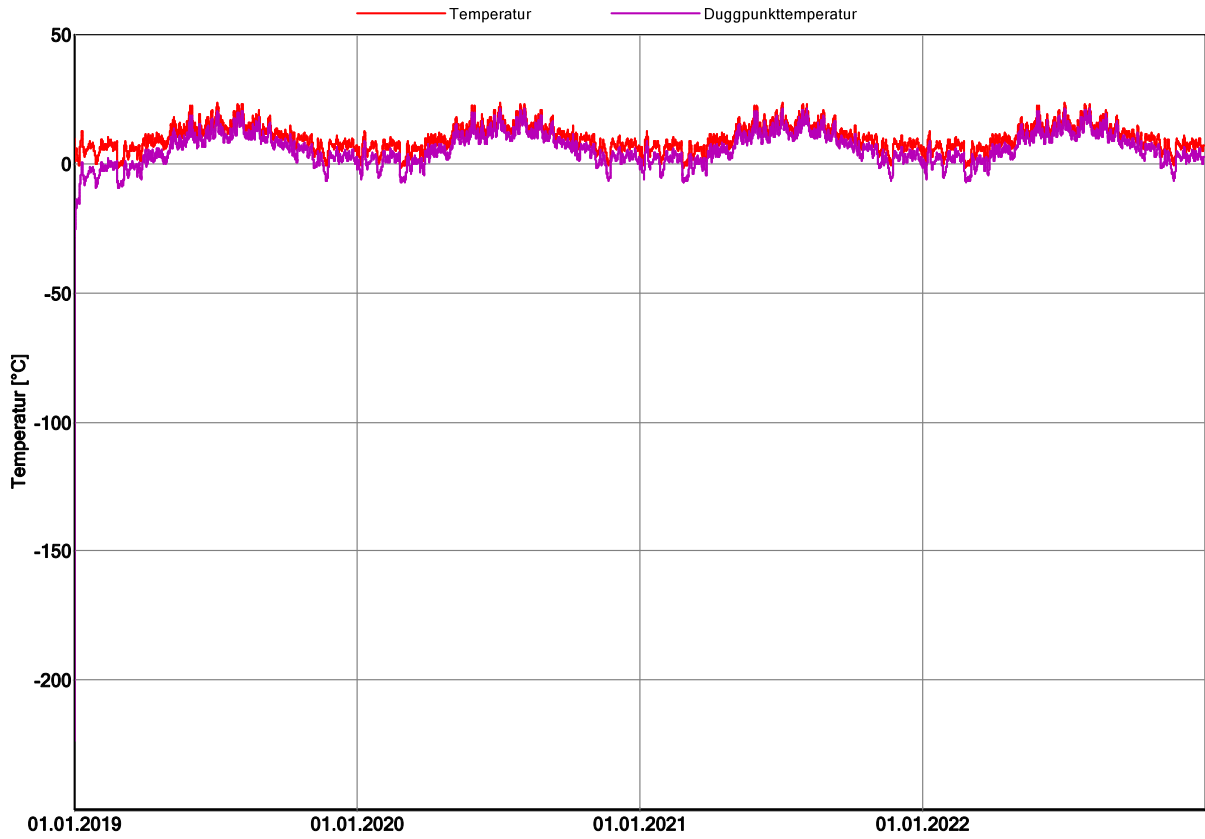
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,001243 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

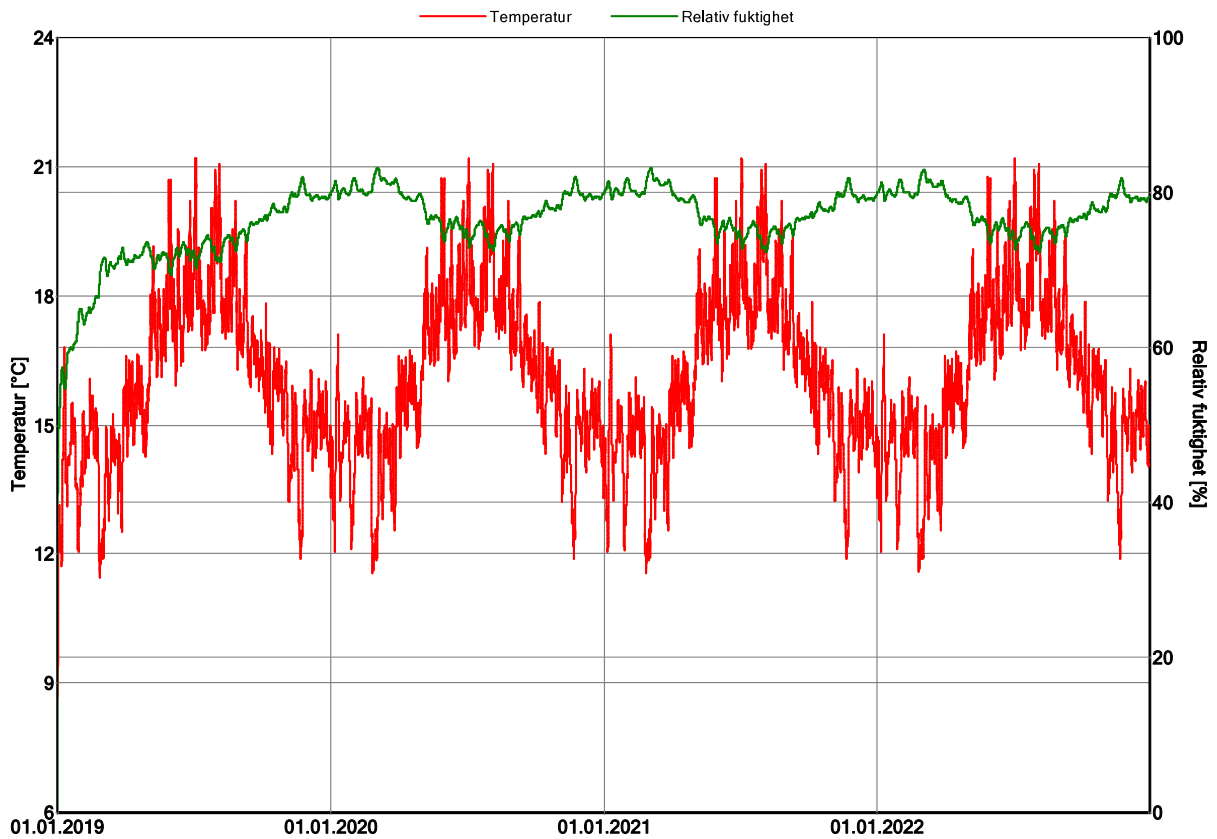
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,001243 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

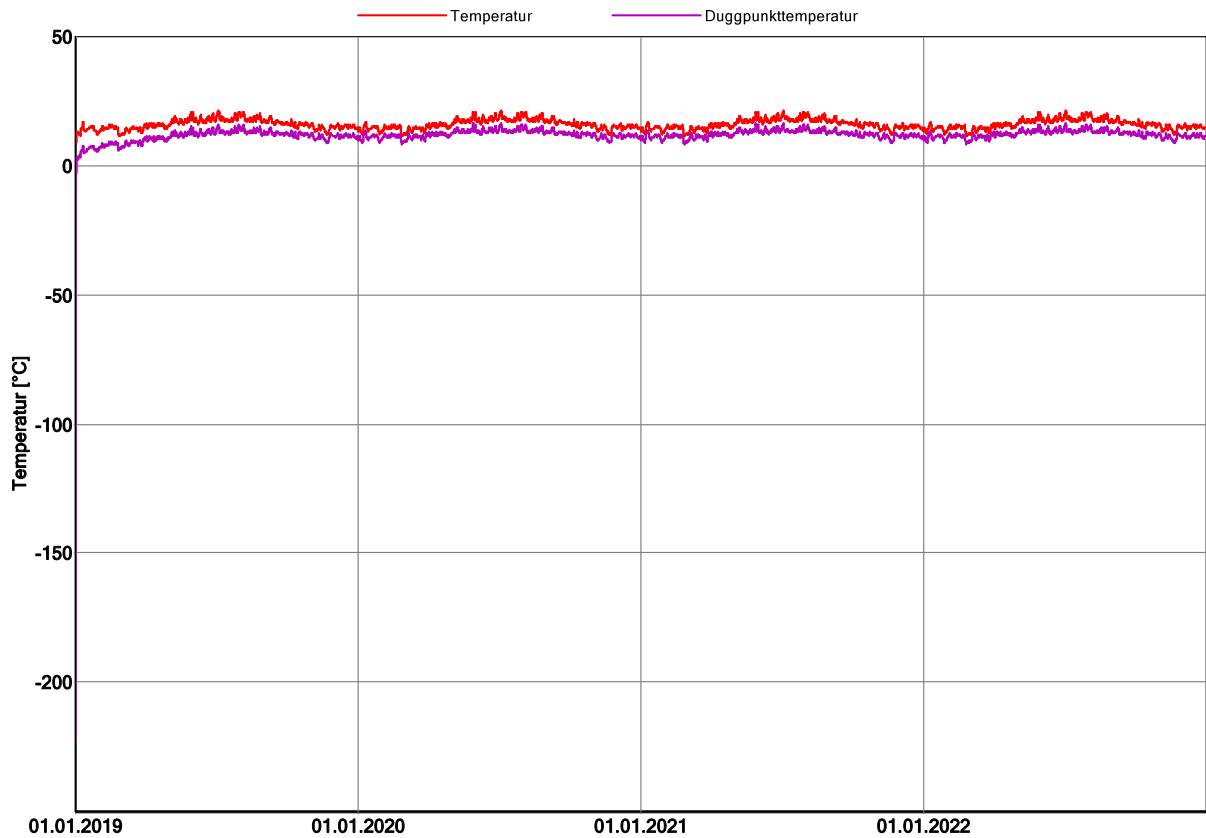
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,018757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

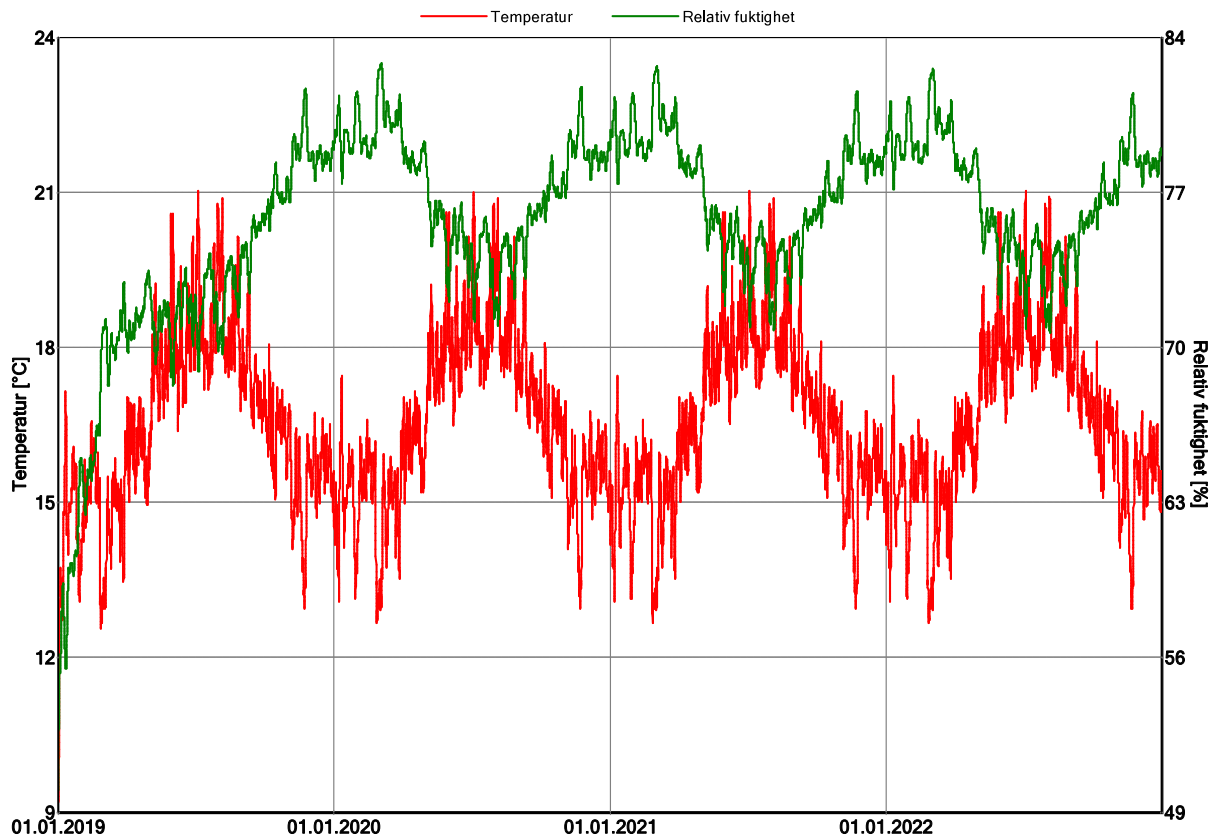
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,018757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

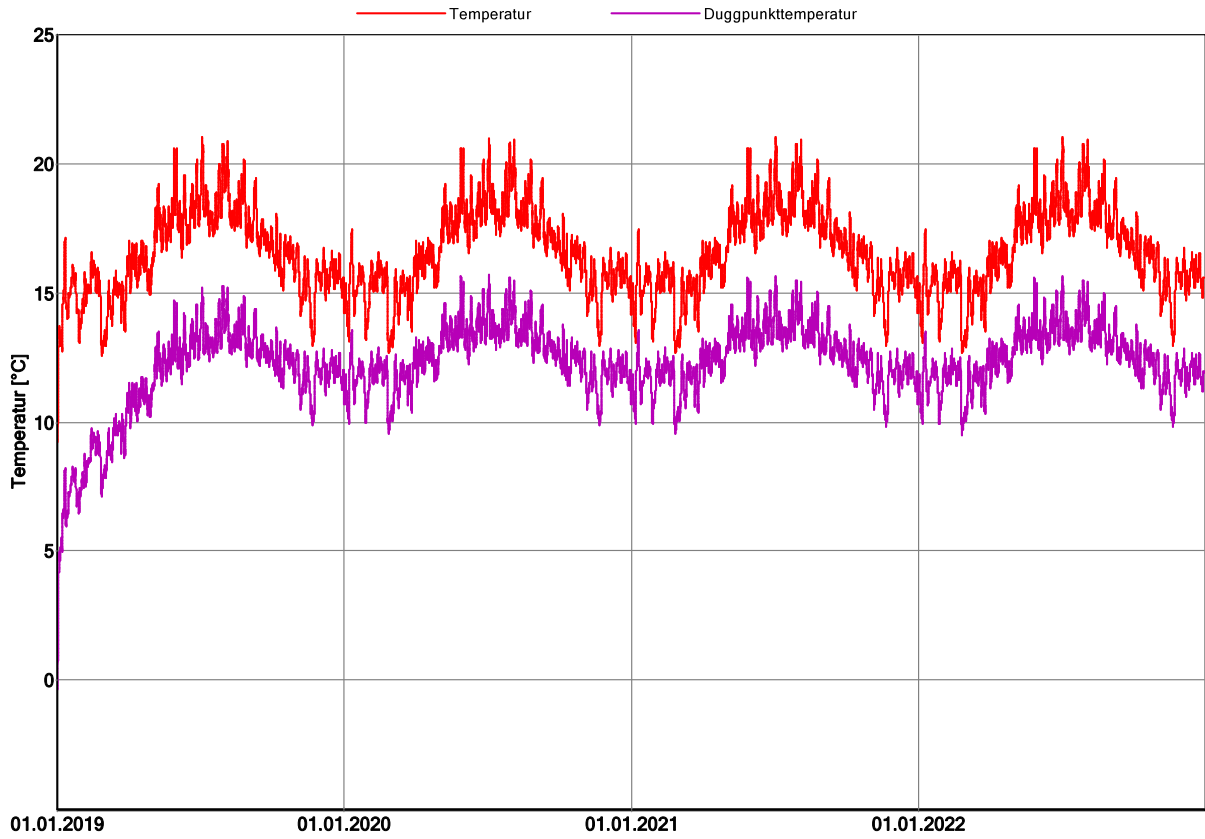
### EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,001243 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

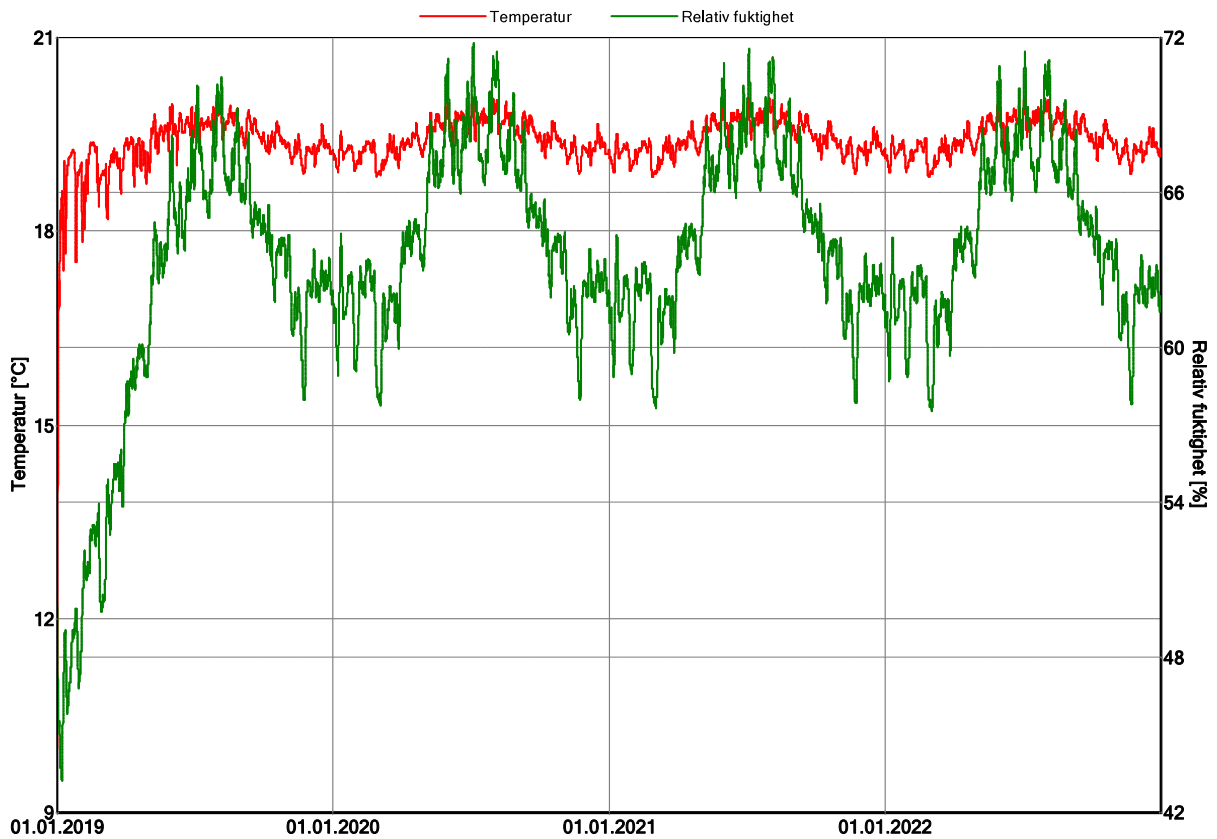
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,001243 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049922 m)

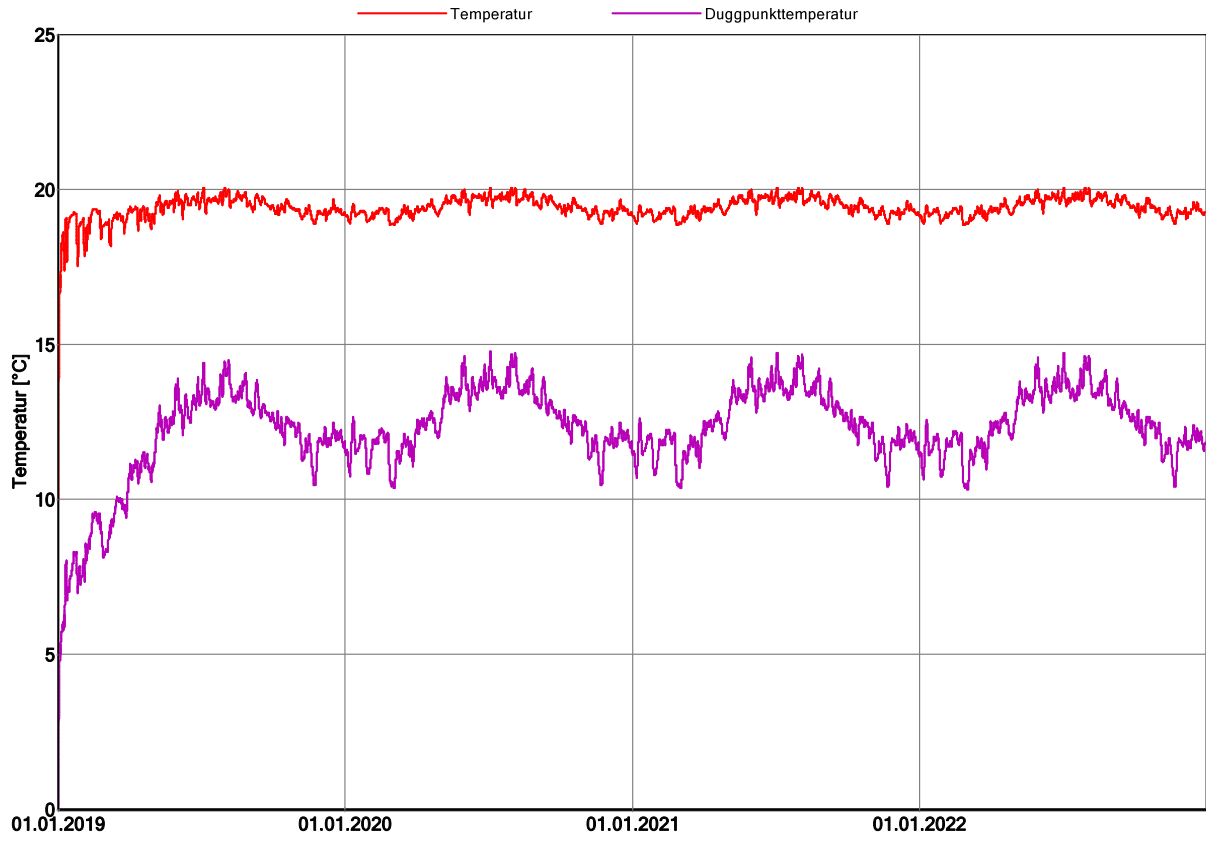


WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049922 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019.w6p; Variant 1: #1 VIP terrassekonstruksjon; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

## 4 Terrassekonstruksjon med VIP og betongdekke, mer byggfukt

## Prosjektdata

Prosjektnavn Superisolasjon, bacheloroppgave

Prosjektnummer

Oppdragsgiver NTNU og Rambøll

Kontaktperson Frida Ulla og Ingrid Astrup

Postnr/Sted

Adresse

Tel.

Faks

E-post

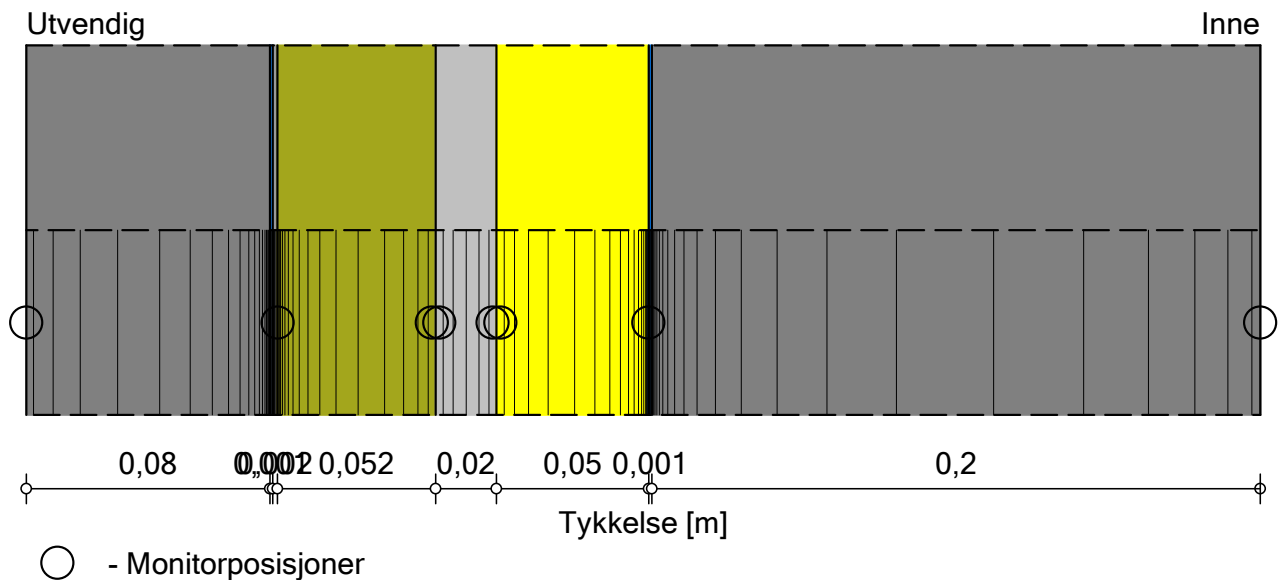
Ansvarlig Frida Ulla og Ingrid Astrup

Kommentarer Analyse av bygningsdeler med VIP eller aerogel.

Dato 25.03.2019

## Konstruksjonsoppbygging

Variant: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt



### Materialer:

	- Betong B45	0,08 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- PVC membrane	0,002 m
	- ROCKWOOL TOPROCK DD	0,052 m
	- VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,02 m
	- EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- Betong B45	0,2 m

Samlet tykkelse: 0,406 m

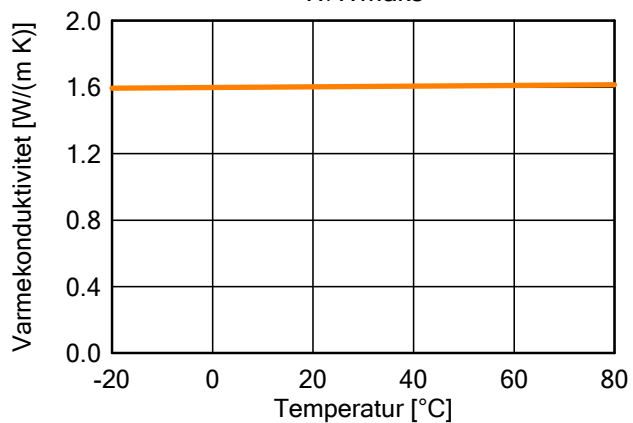
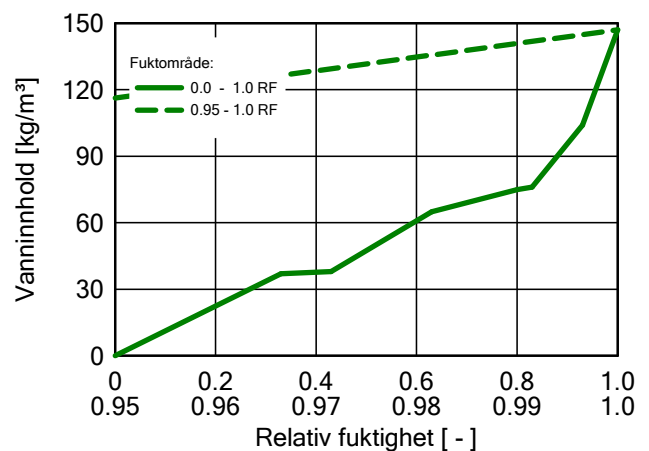
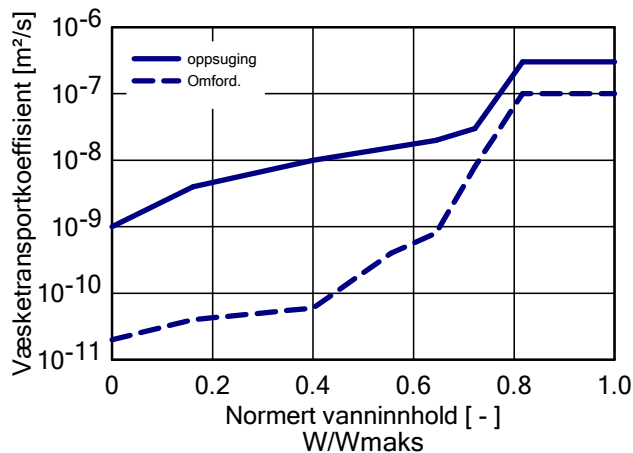
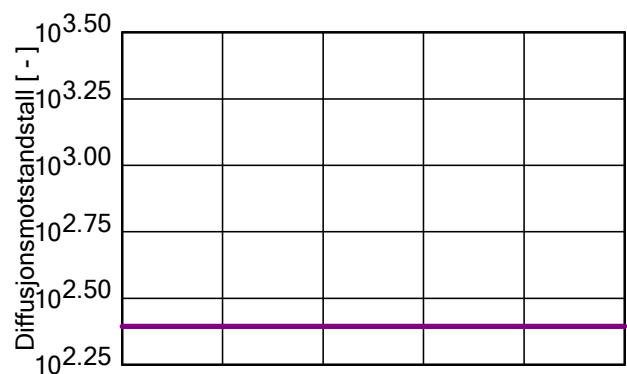
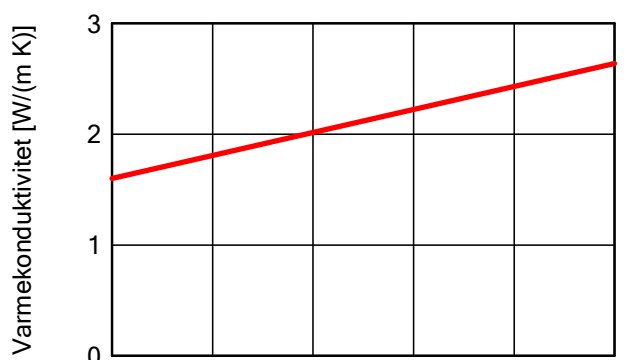
Varmemotstand: 5,7 (m<sup>2</sup> K)/W

U-verdi: 0,17 W/(m<sup>2</sup> K)

# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

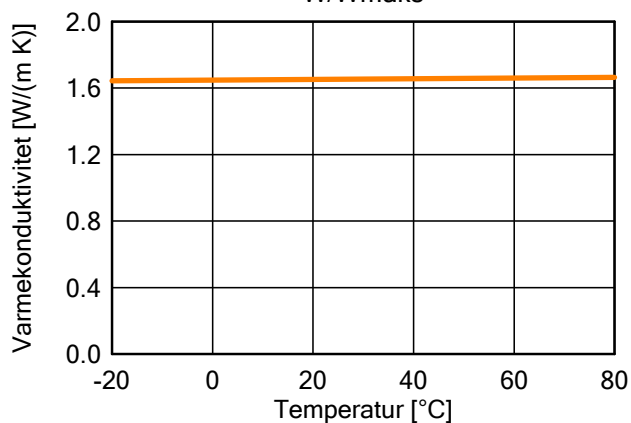
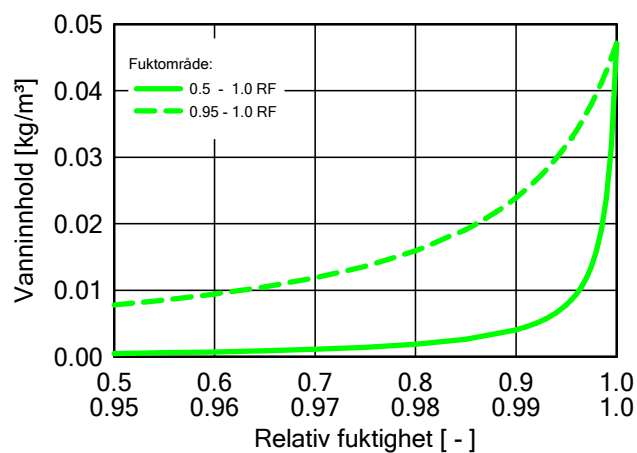
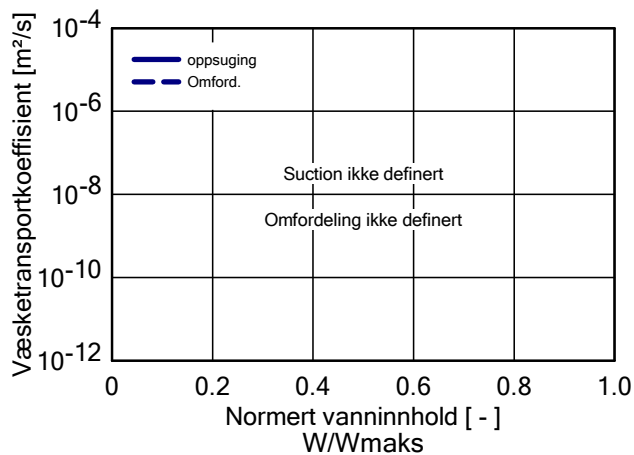
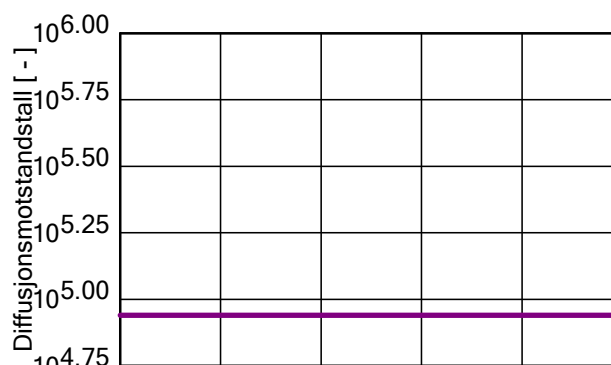
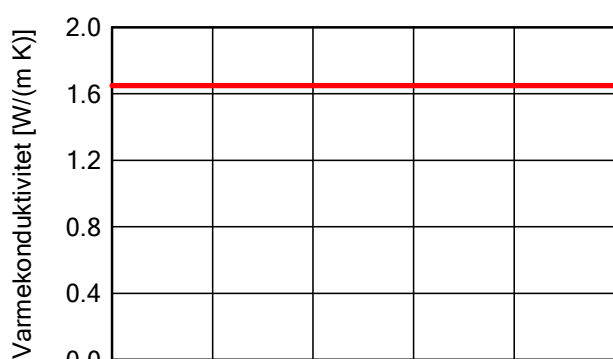
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

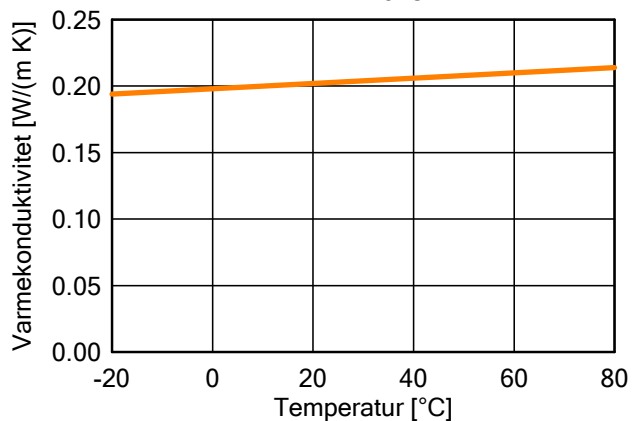
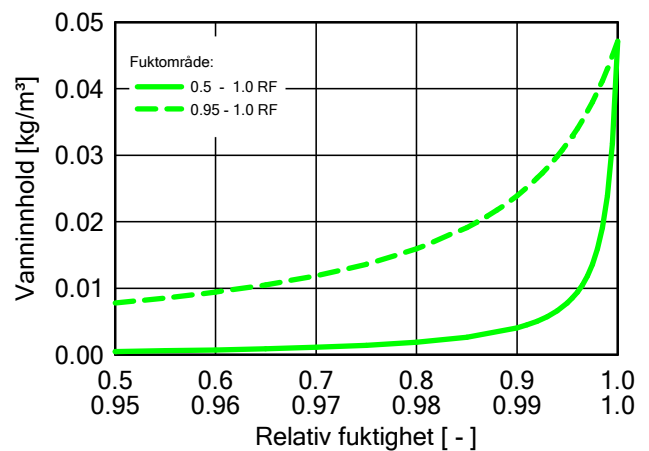
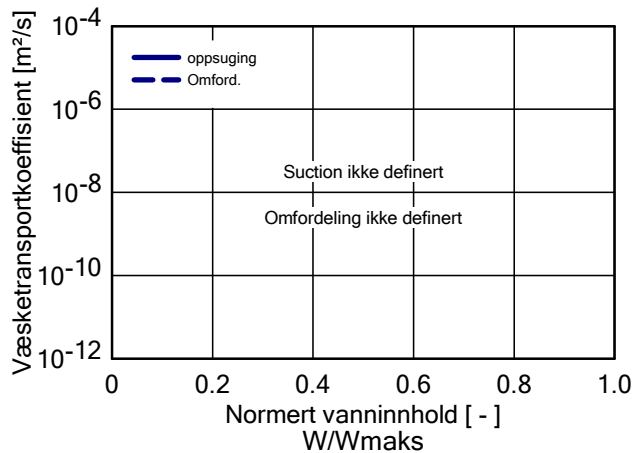
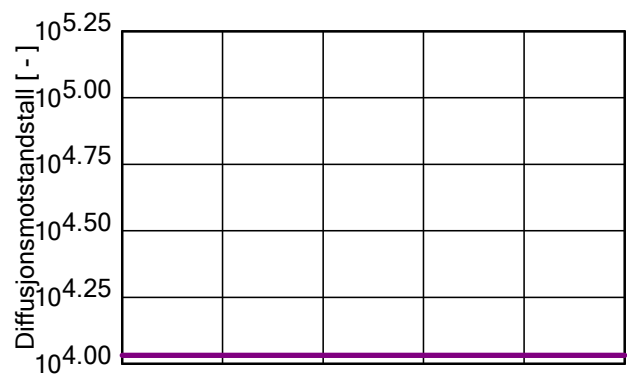
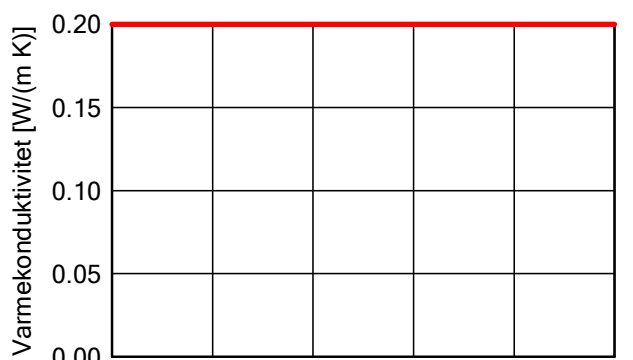
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: PVC membrane

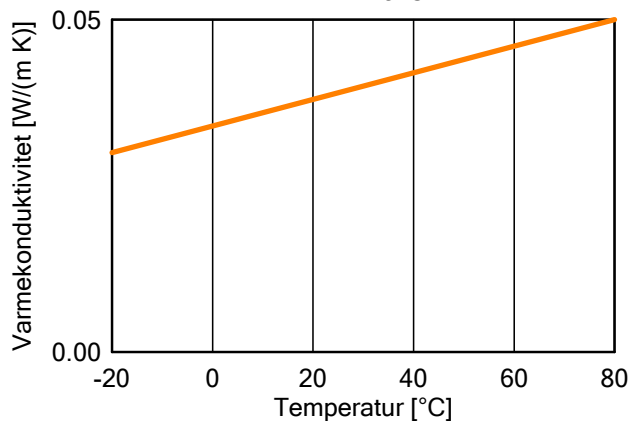
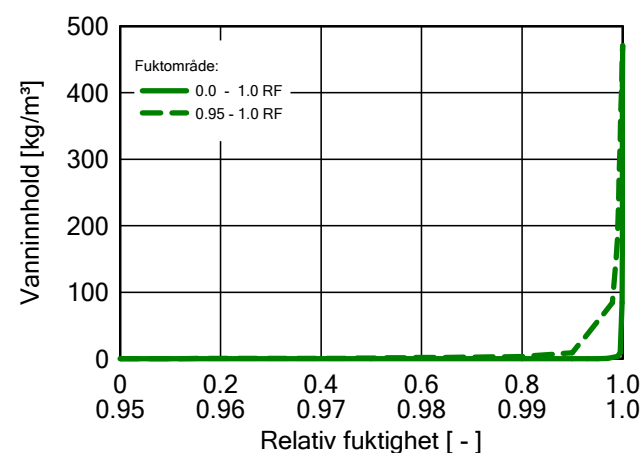
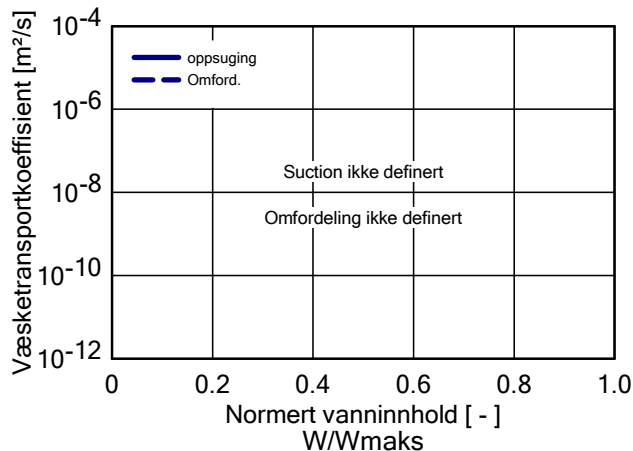
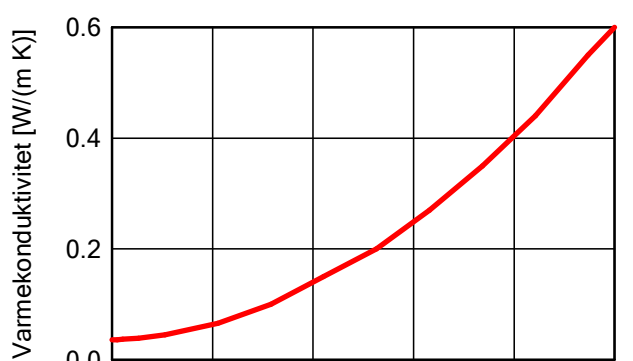
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	10761
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL TOPROCK DD

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	176
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	1.2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002

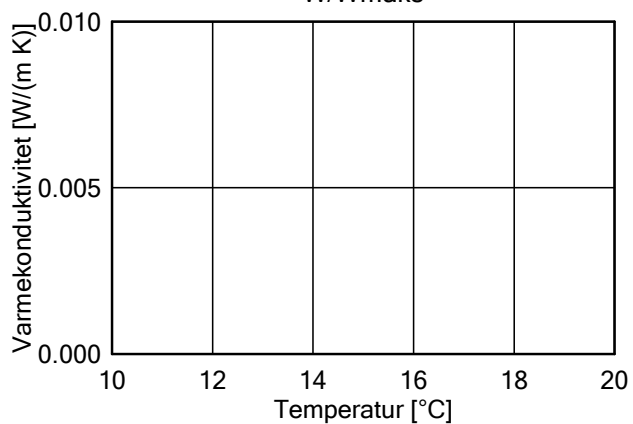
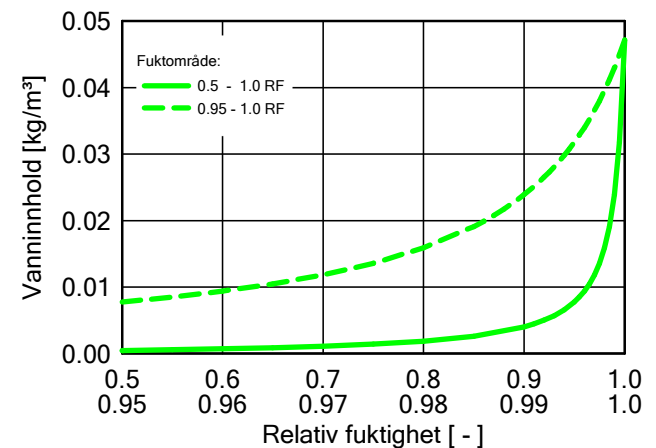
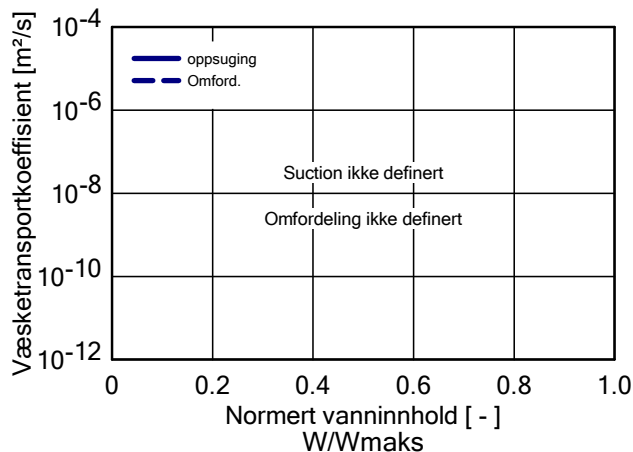
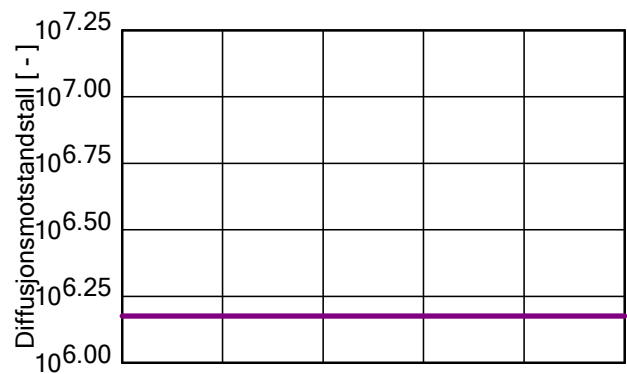
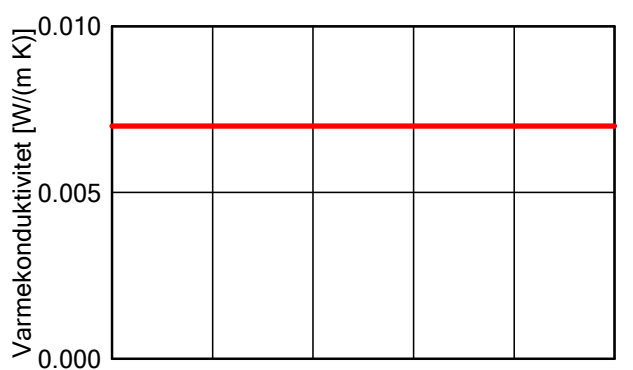




# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K)

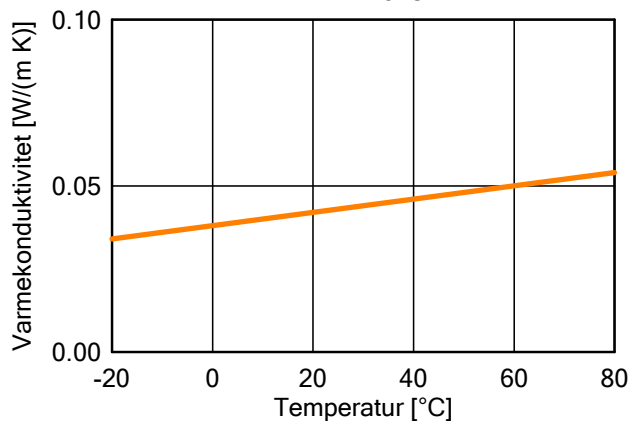
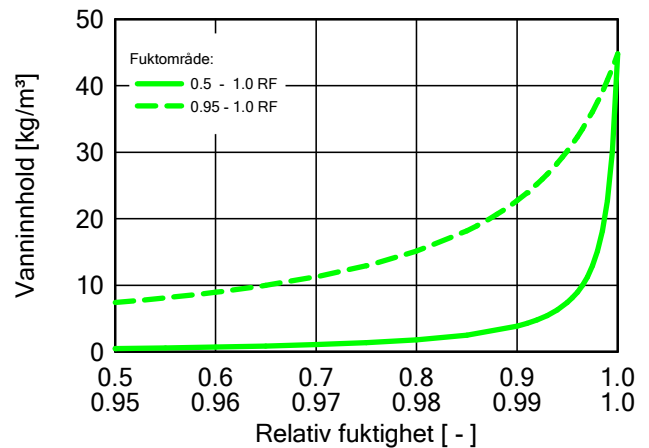
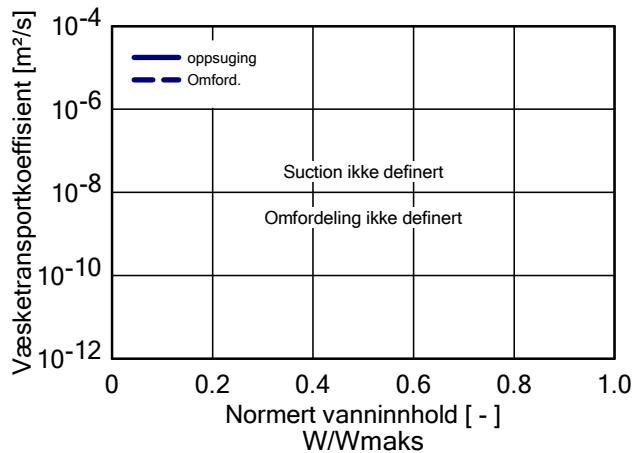
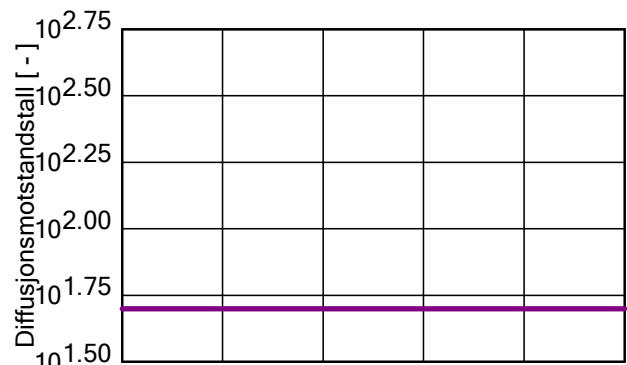
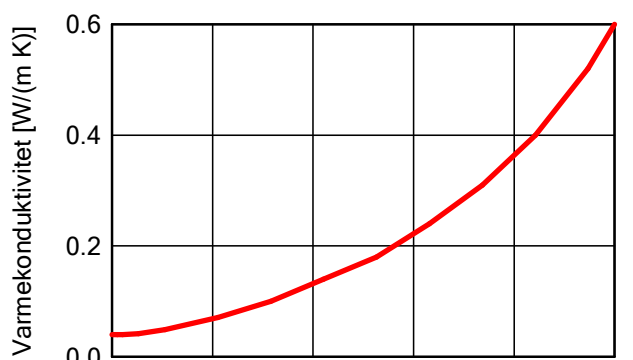
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	200
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	800
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.007
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	1500000



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>)

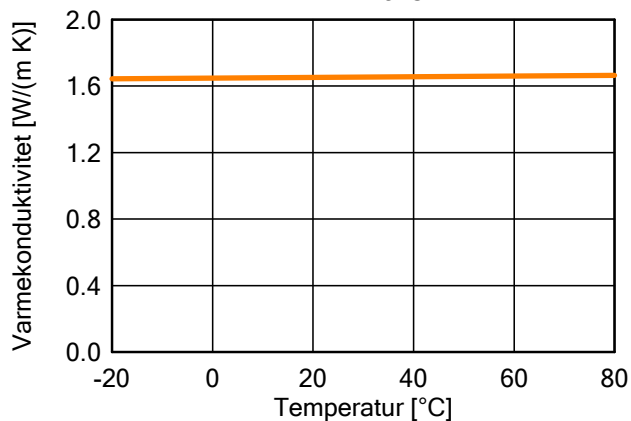
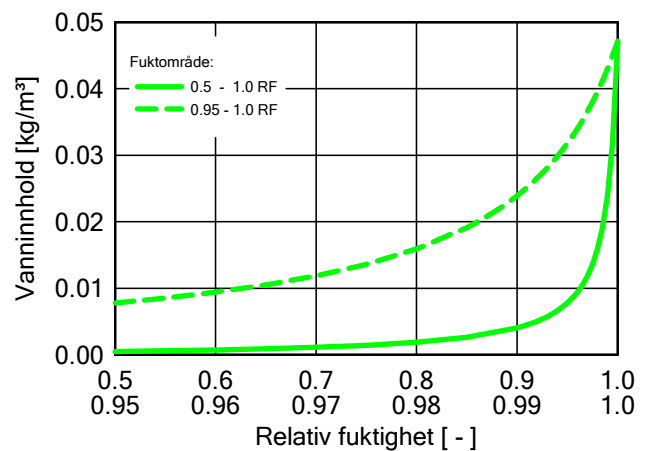
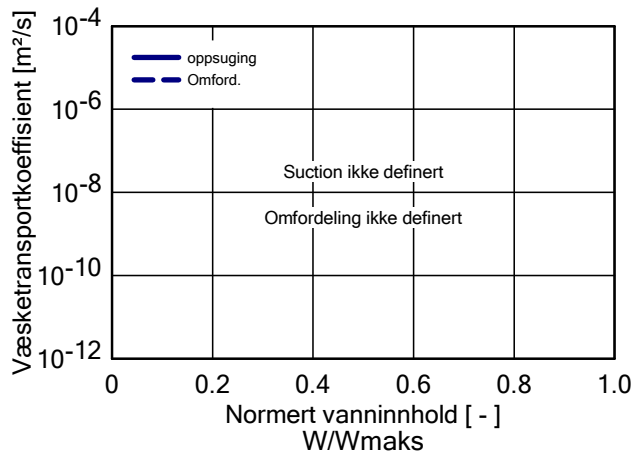
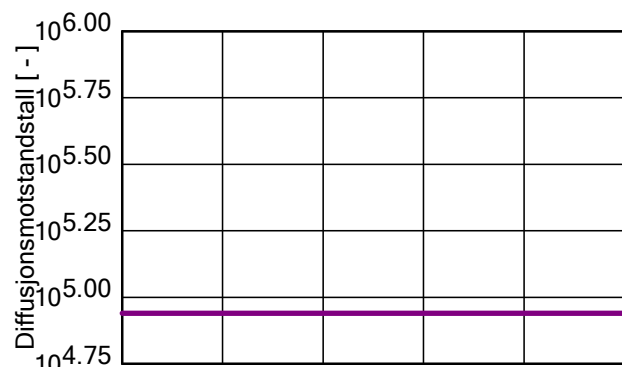
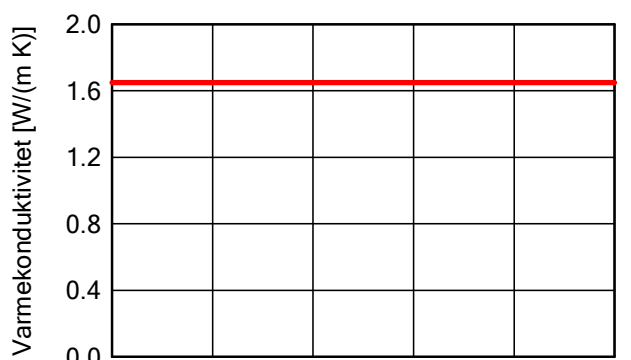
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	30
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekoduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	50
Temp.-avh. varmekodukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

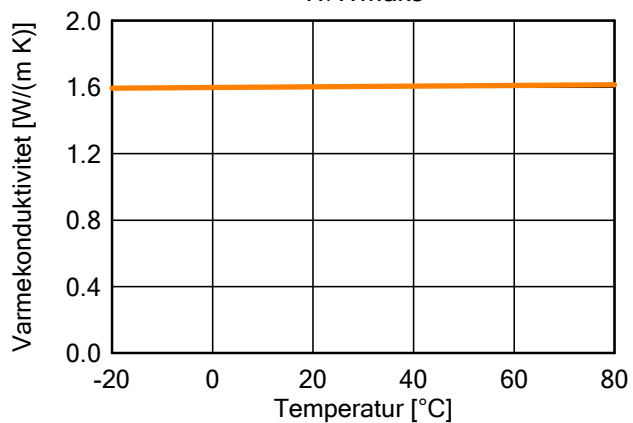
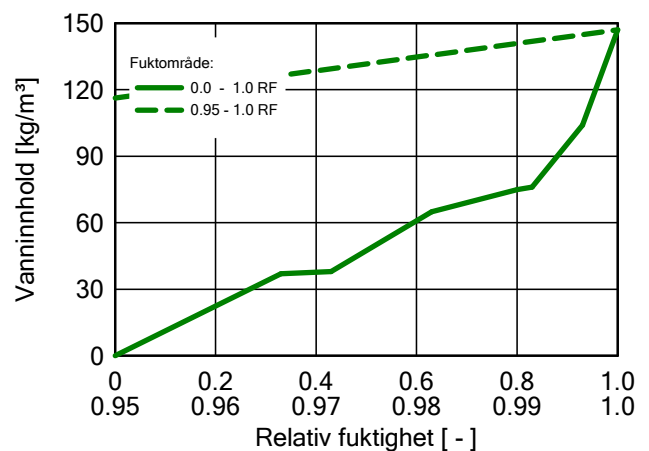
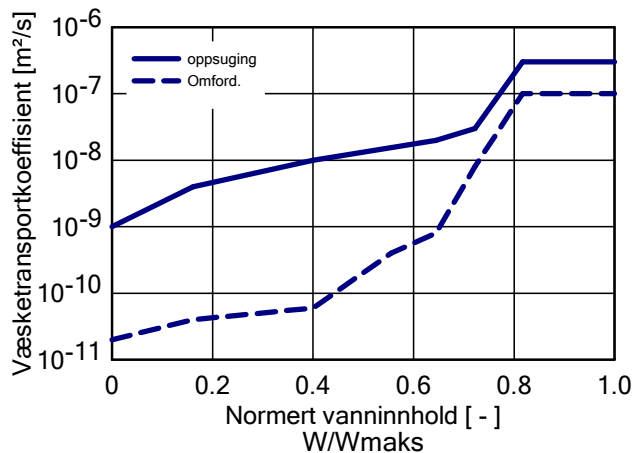
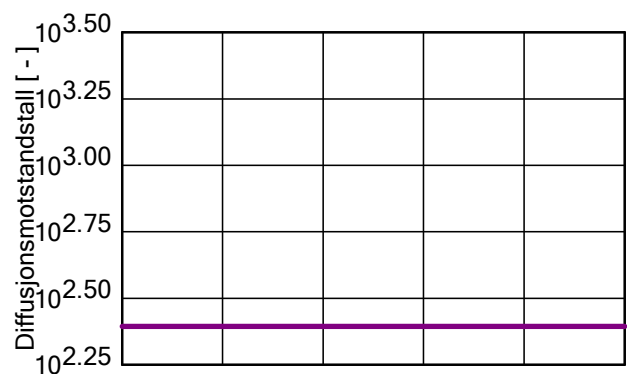
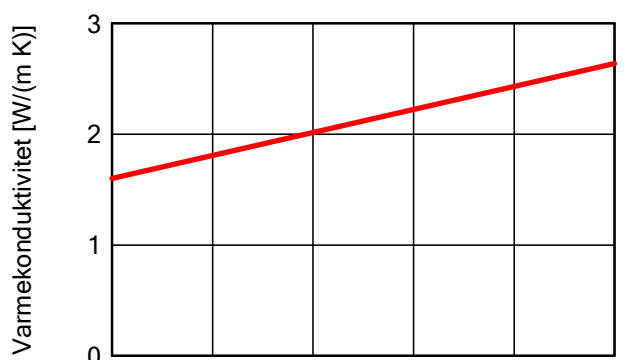
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## Randvilkår

## Ute (venstre side)

Sted for klima: Trondheim; NBI / NTNU  
 Temperaturforskyvning: 0.0 °C  
 Orientering / Helning: Vest / 0 °  
 Avkjøling ved stråling om natten: nei

## Inne (høyre side)

Inneklima: EN 13788  
 Fuktklasse 3; Temperatur: 20 °C

## Overflaters overgangskoeffisient

## Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Lys	[-]	0.2
Langbølget strålingsemissivitet	Lys	[-]	0.9
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1,0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

## Inne (høyre side)

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

## Resultater fra siste beregning

## Status for beregning

Dato/tid for beregning	03.05.2019 08:41:03
Regnetid	1 min,45 sek.
Begynn / Avslutt beregning	01.01.2019 / 01.01.2023
Antall konvergensfeil	0

## Numerisk kvalitetssjekk

Samlet fukttransport, utv. (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,69 -1,4
Samlet fukttransport, innv. (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	14,19 0,3
Balanse 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-15,21
Balanse 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-15,2

Vanninnhold [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	Slutt	Min.	Maks.
Totalt vanninnhold	39,81	24,34	22,57	39,81

Vanninnhold [kg/m<sup>3</sup>]

Sjikt/Materiale	Start	Slutt	Min.	Maks.
Betong B45	147,00	137,14	117,23	148,92
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,03	0,00	0,04
PVC membrane	0,00	0,03	0,00	0,04
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,01	0,20	0,01	0,20
VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,00	0,00	0,00	0,00
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK)	1,06	1,18	1,06	1,48
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Betong B45	140,00	66,48	63,94	140,03

## Tidsintegralet av strømningsstetthetene

Varmestrømstetthet, venstre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-1017,42
Varmestrømstetthet, høyre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-348,06
Fuktstrømmer, venstre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,78
Fuktstrømmer, høyre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	14,7

## Hygrotermiske kilder

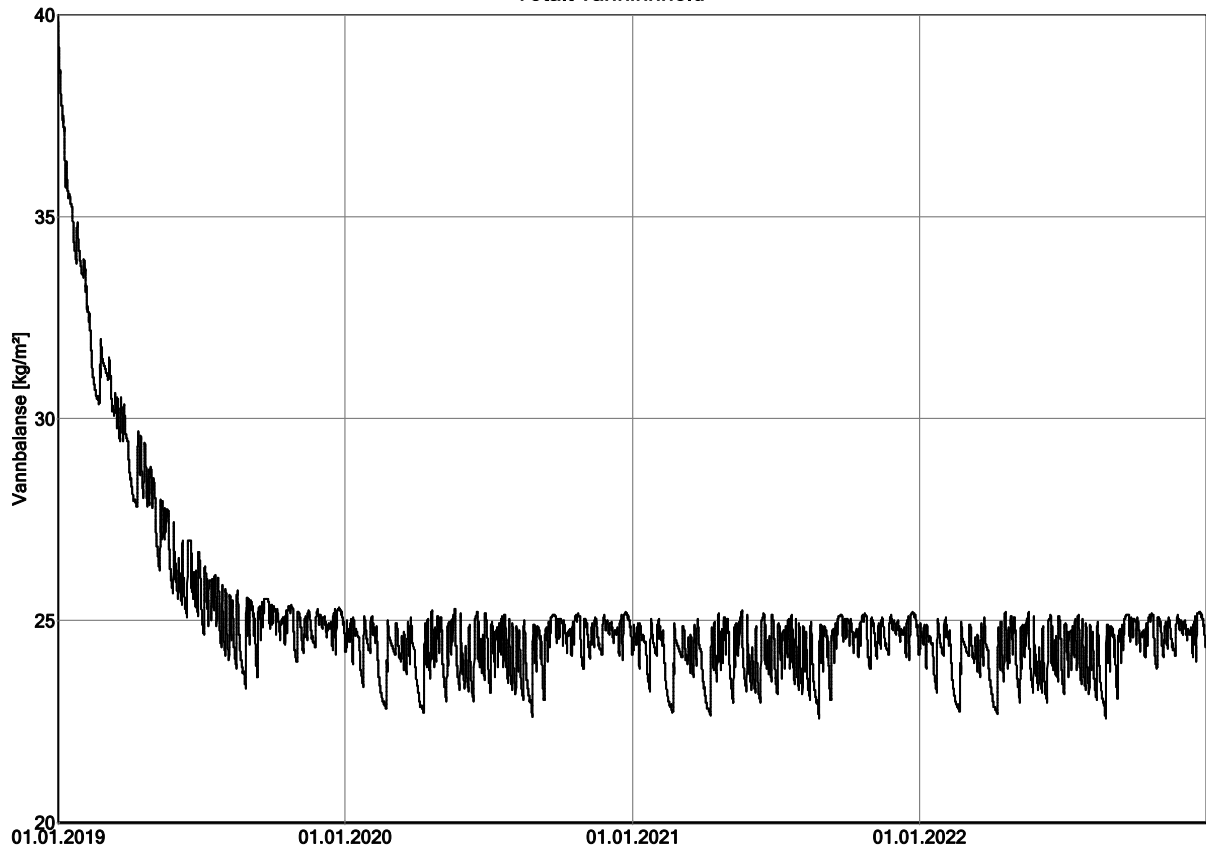
Varmekilder	[MJ/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0

## WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### Hygrotermiske kilder (Fortsett)

Begrensete fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
-----------------------	----------------------	-----

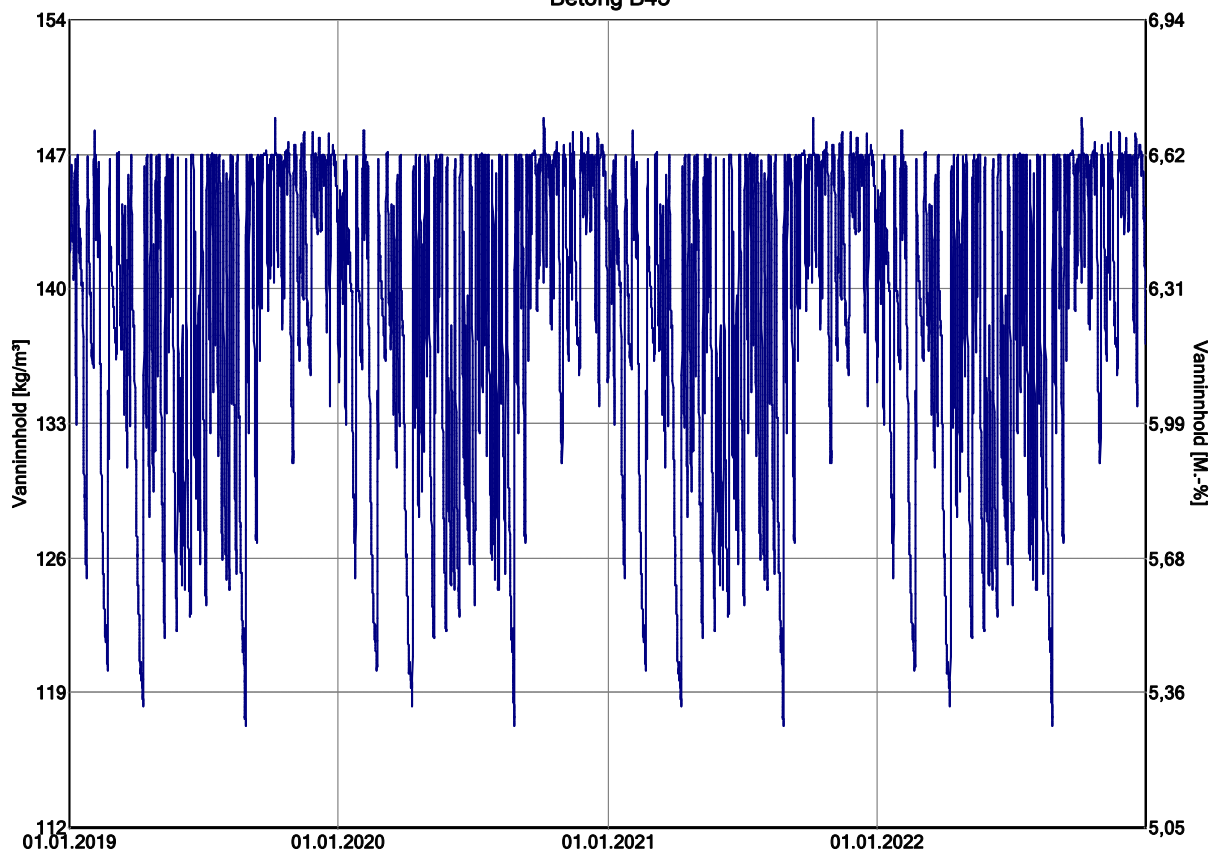
### Totalt vanninnhold



WUFI® Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### Betong B45

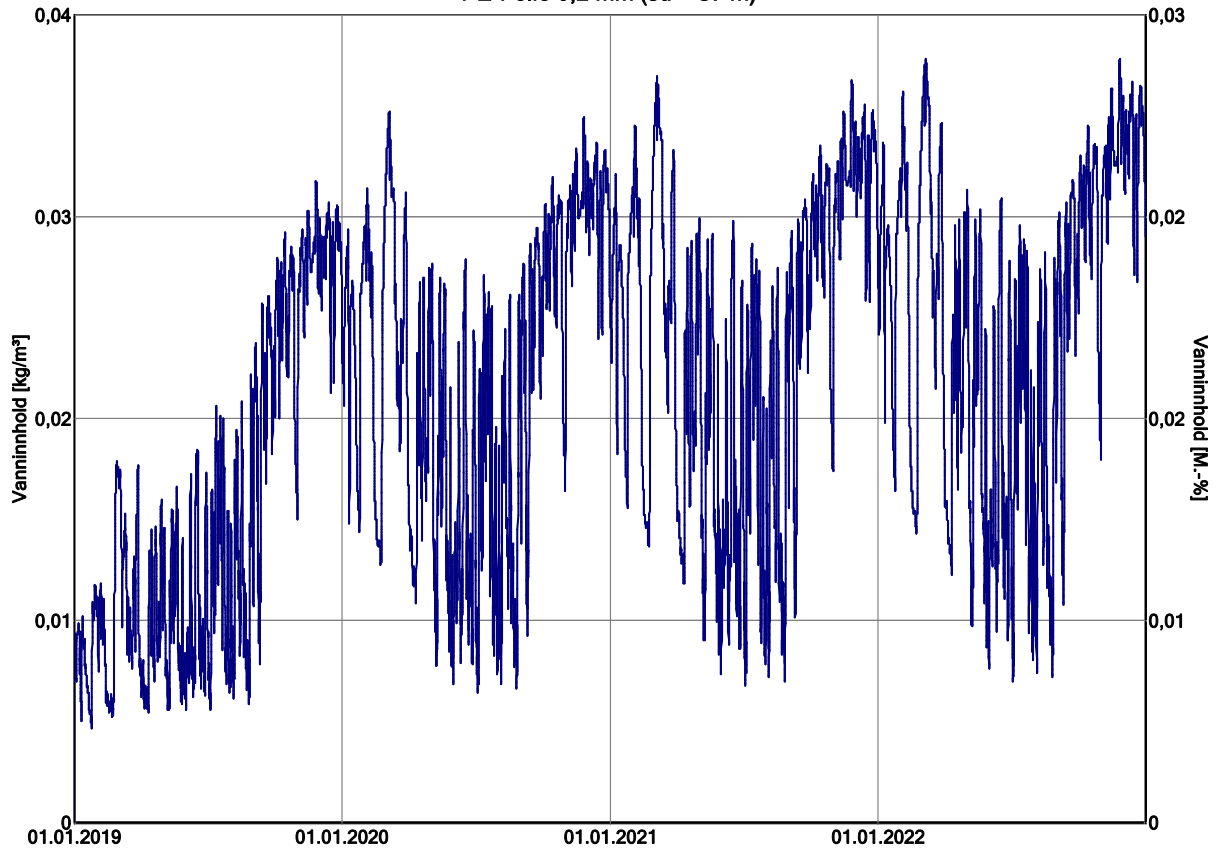


WUFI® Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



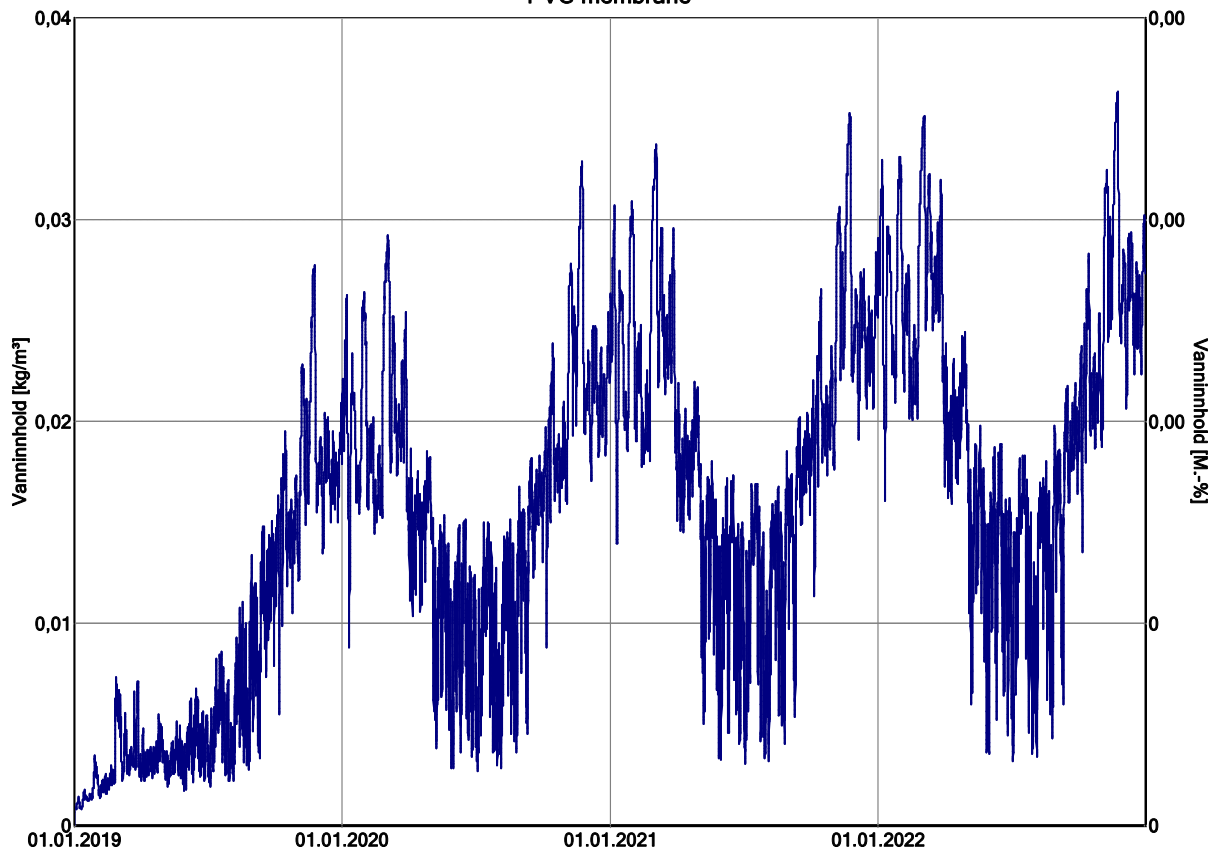
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekket mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

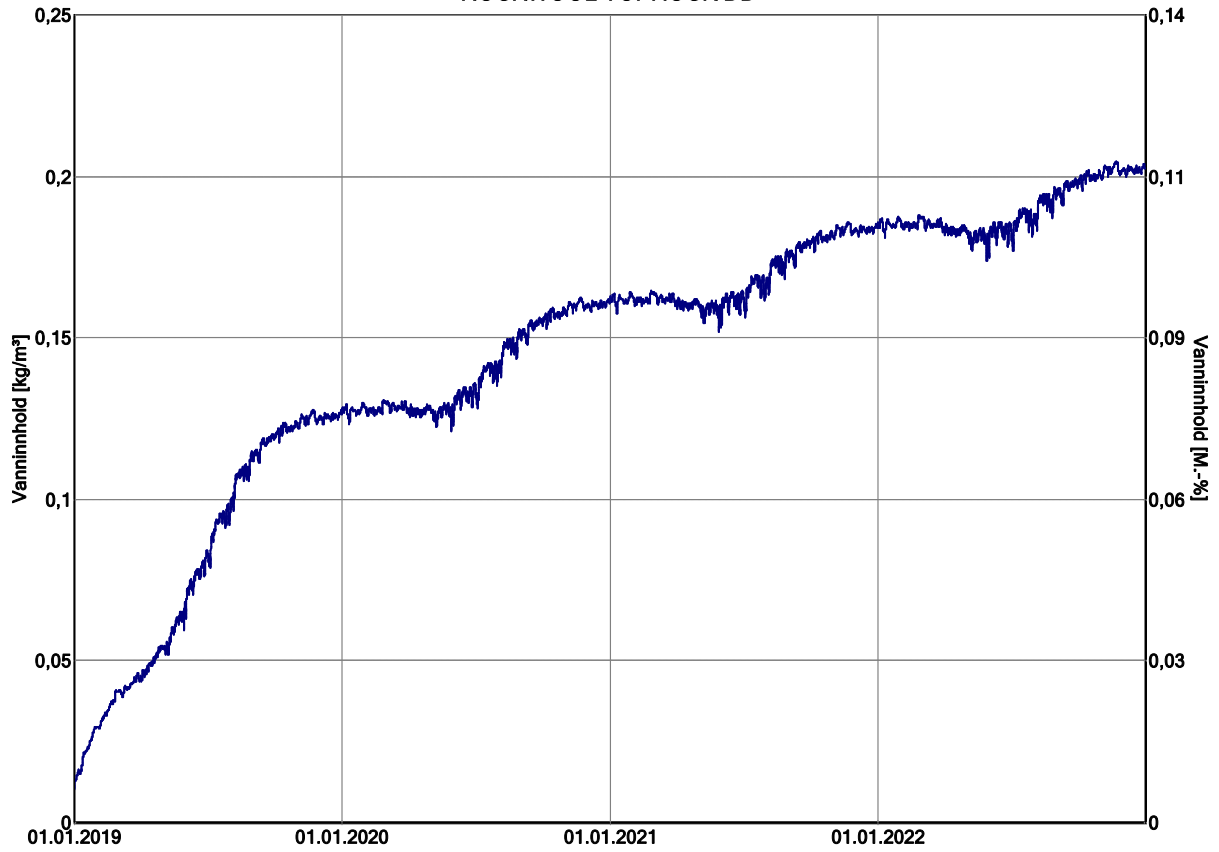
PVC membrane



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekket mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

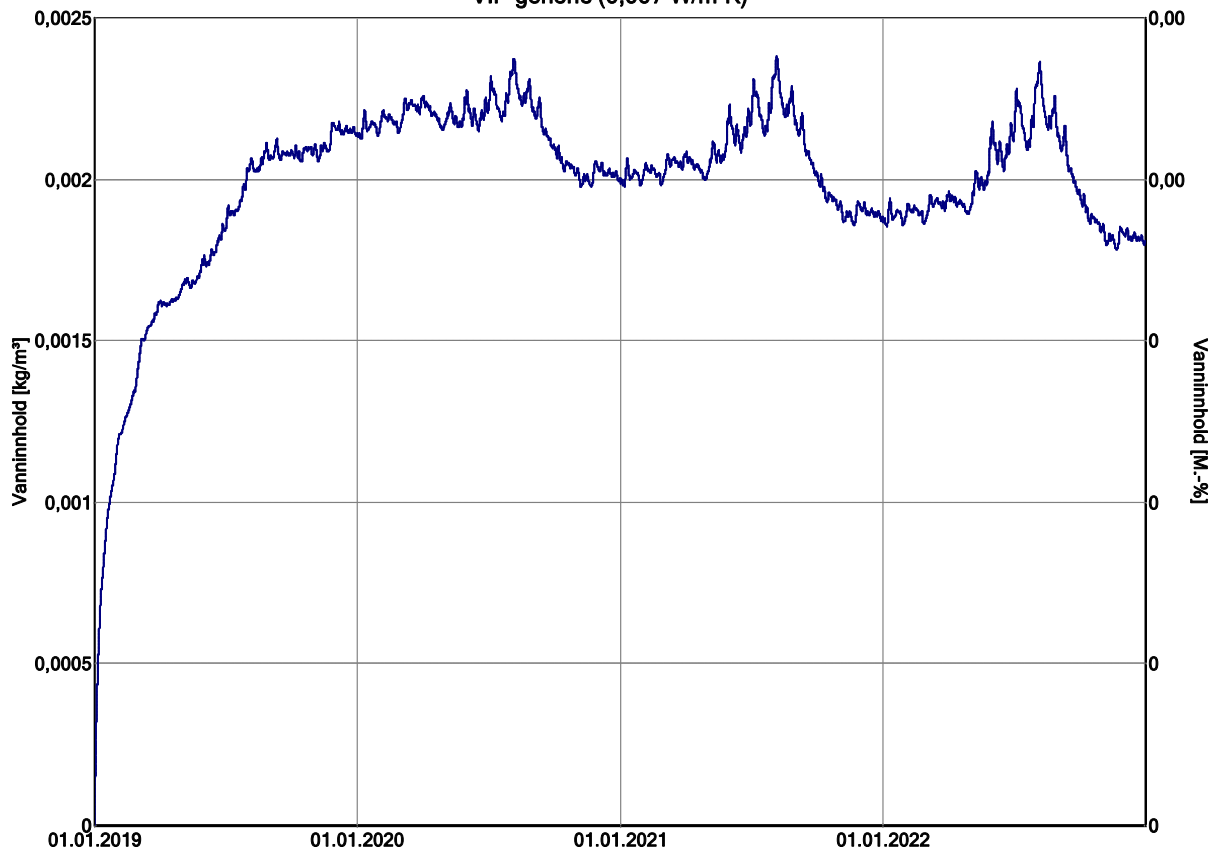
### ROCKWOOL TOPROCK DD



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

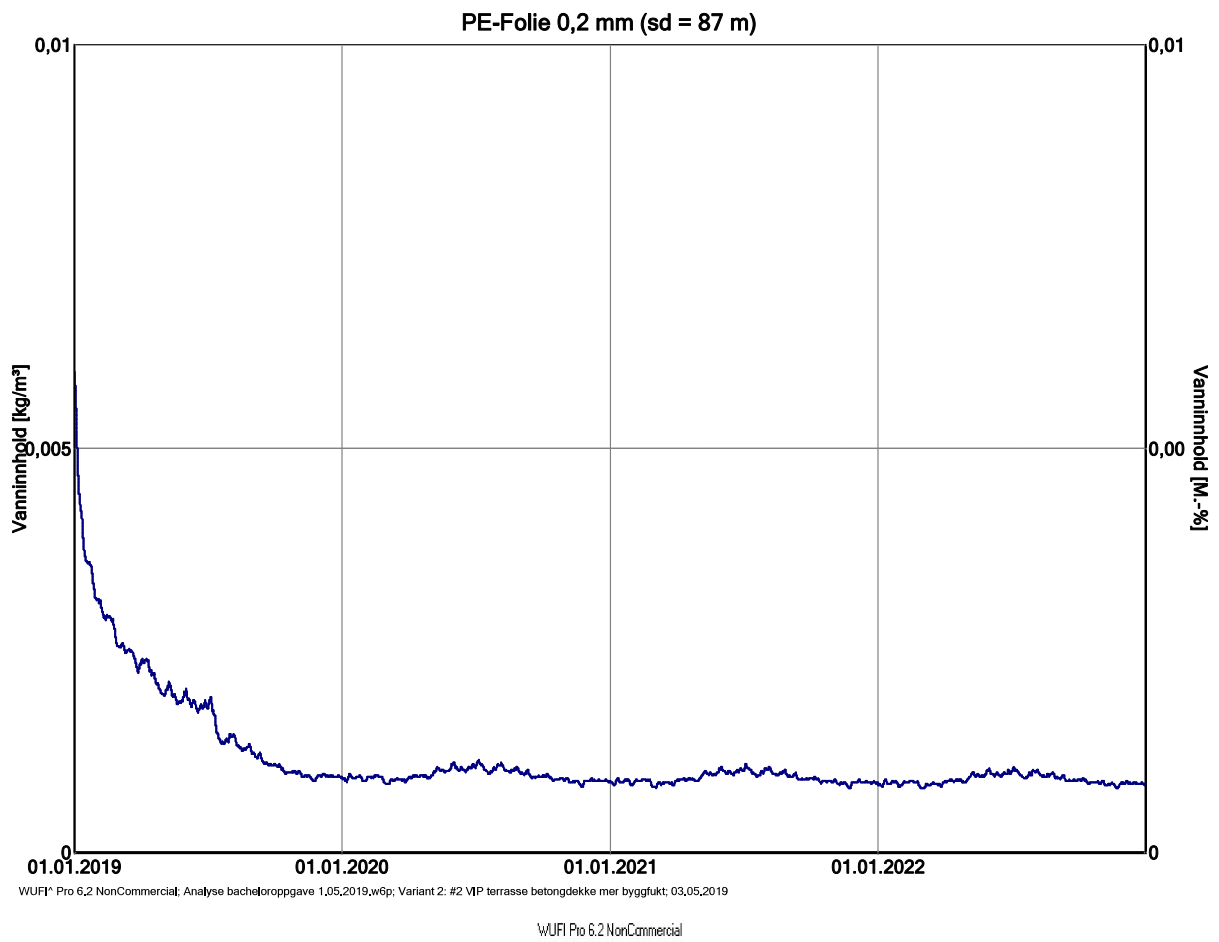
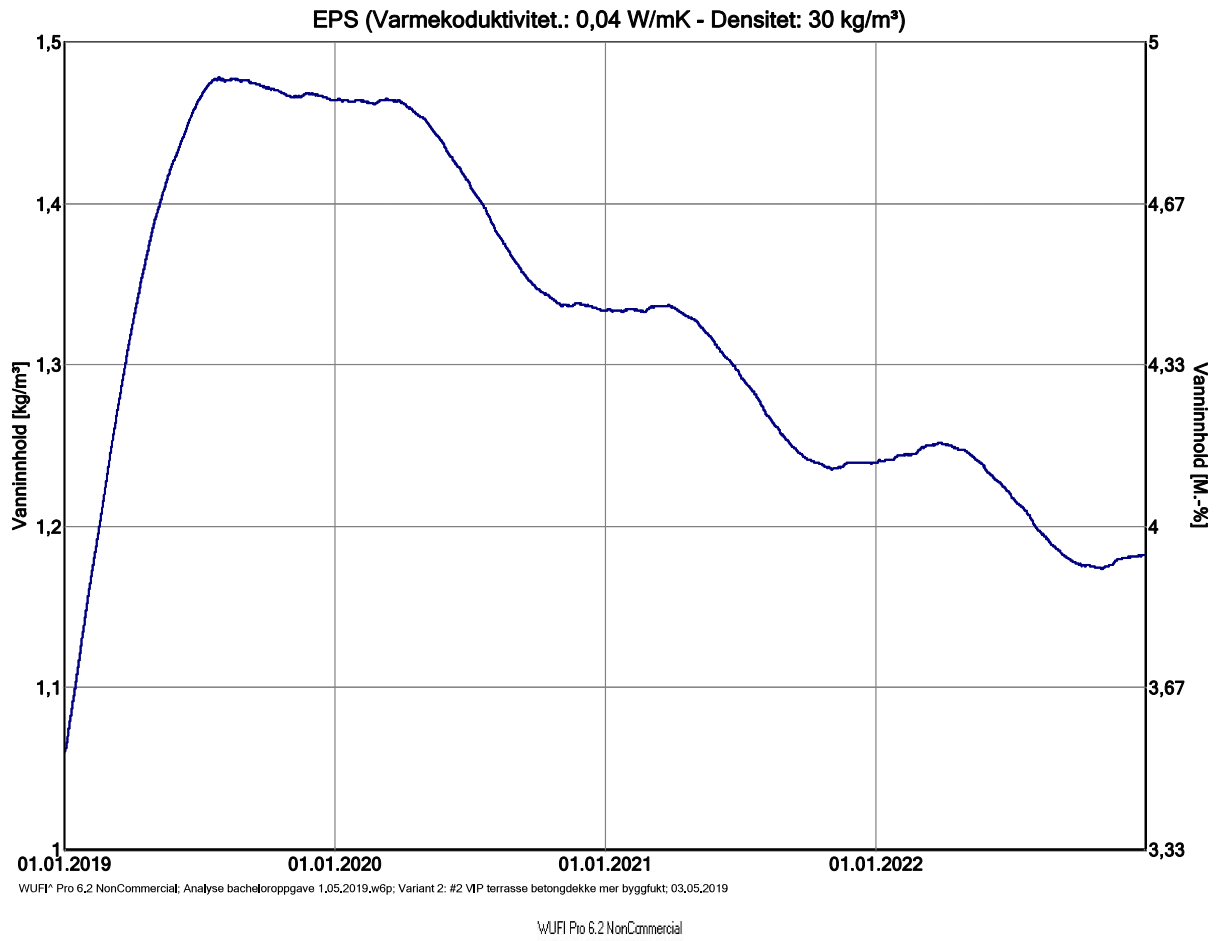
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### VIP generic (0,007 W/m²K)

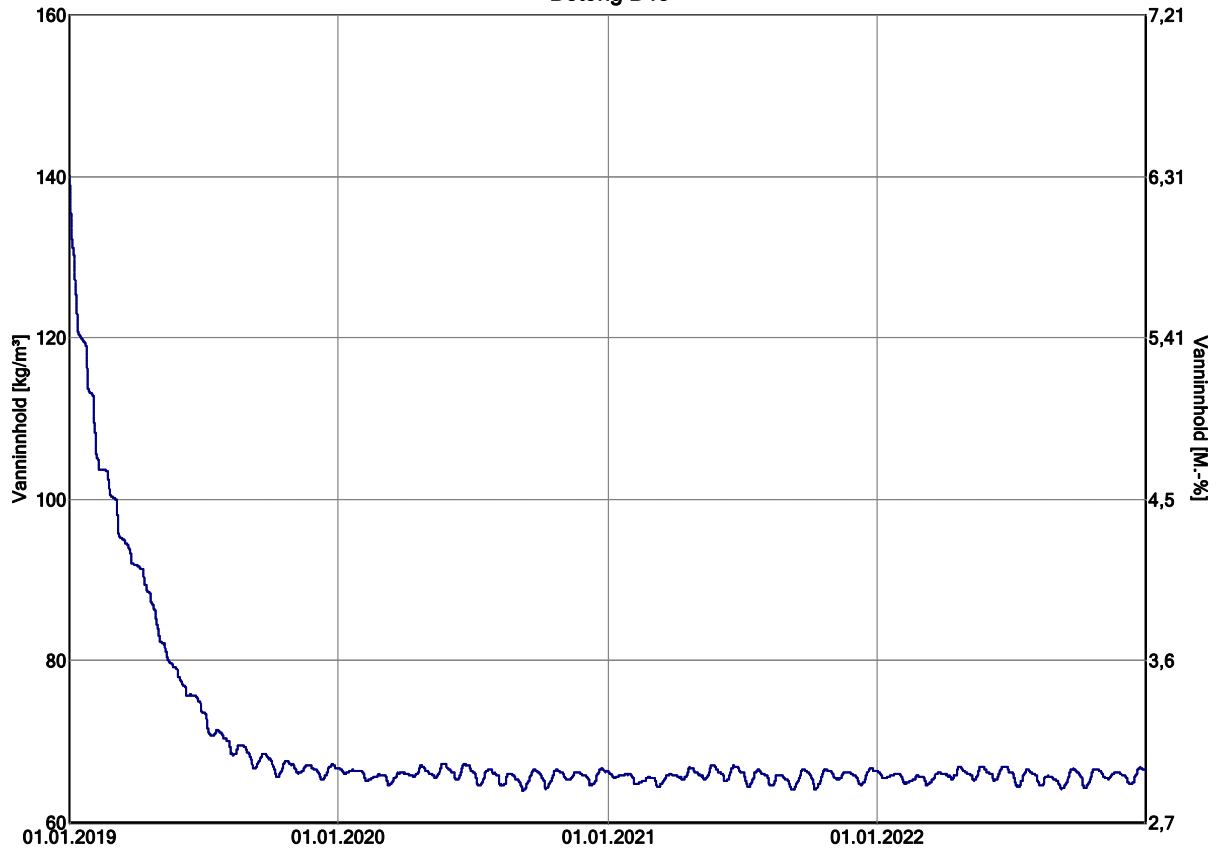


WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



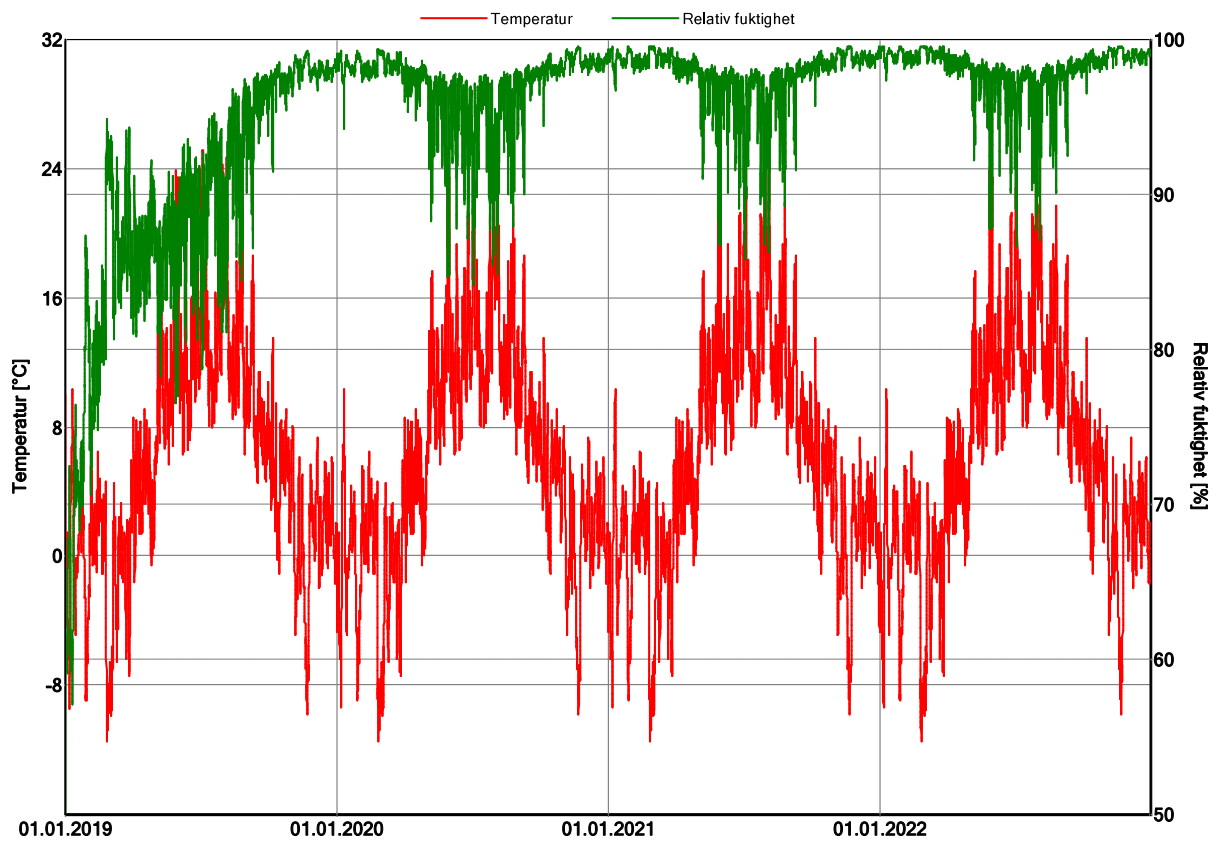
### Betong B45



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

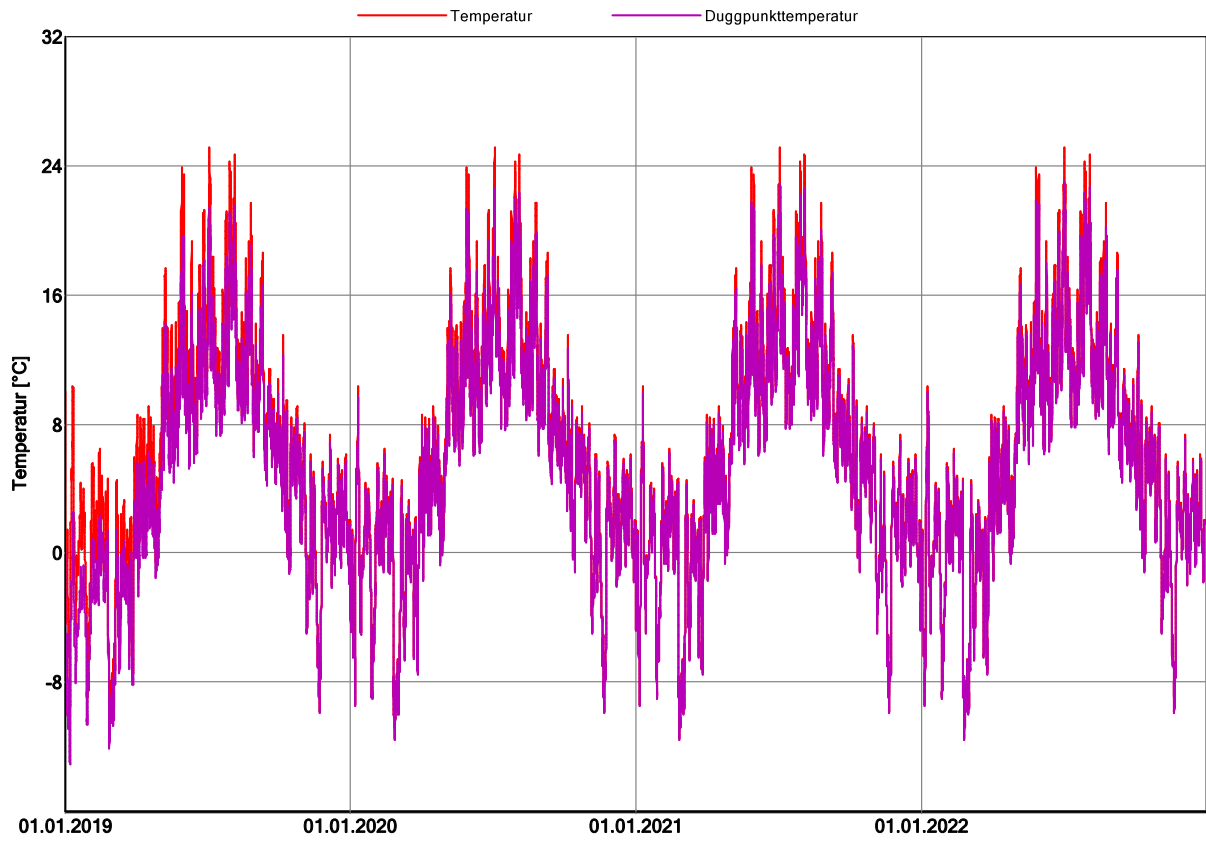
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000118 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

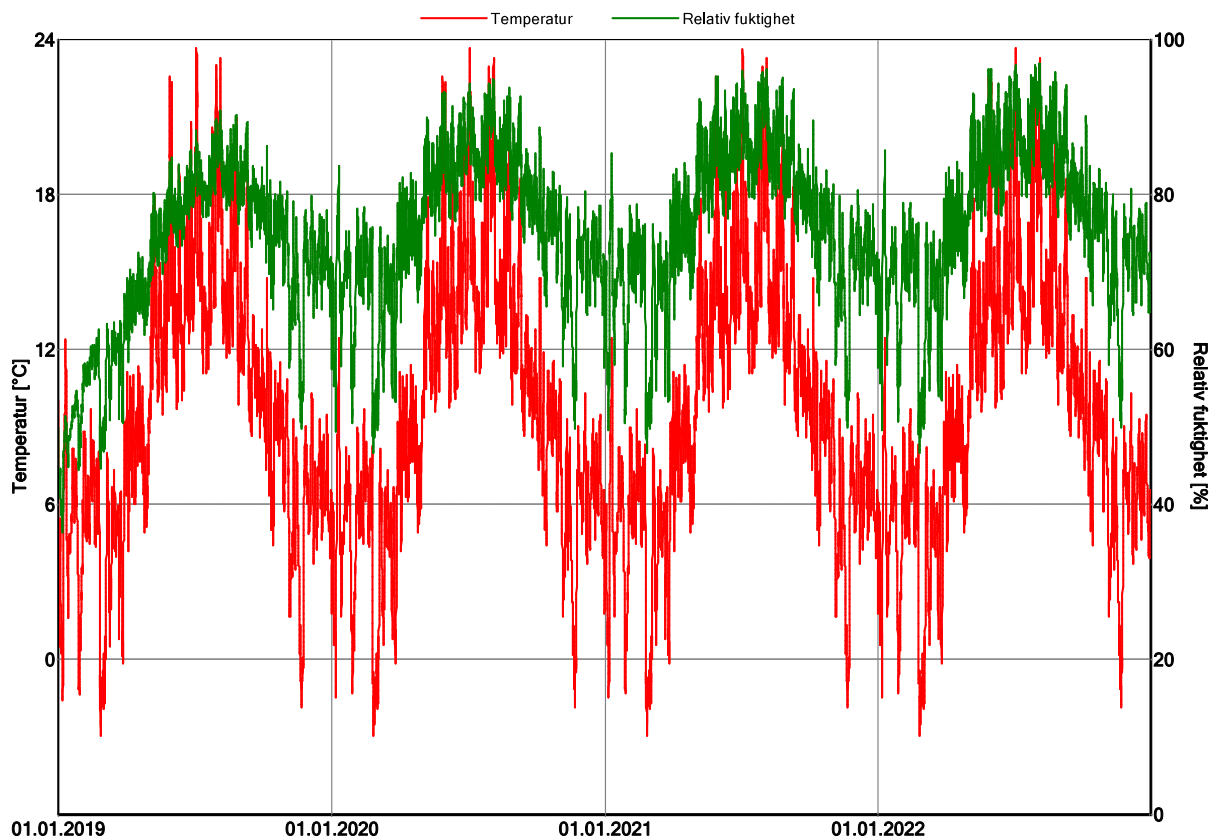
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000118 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekket mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

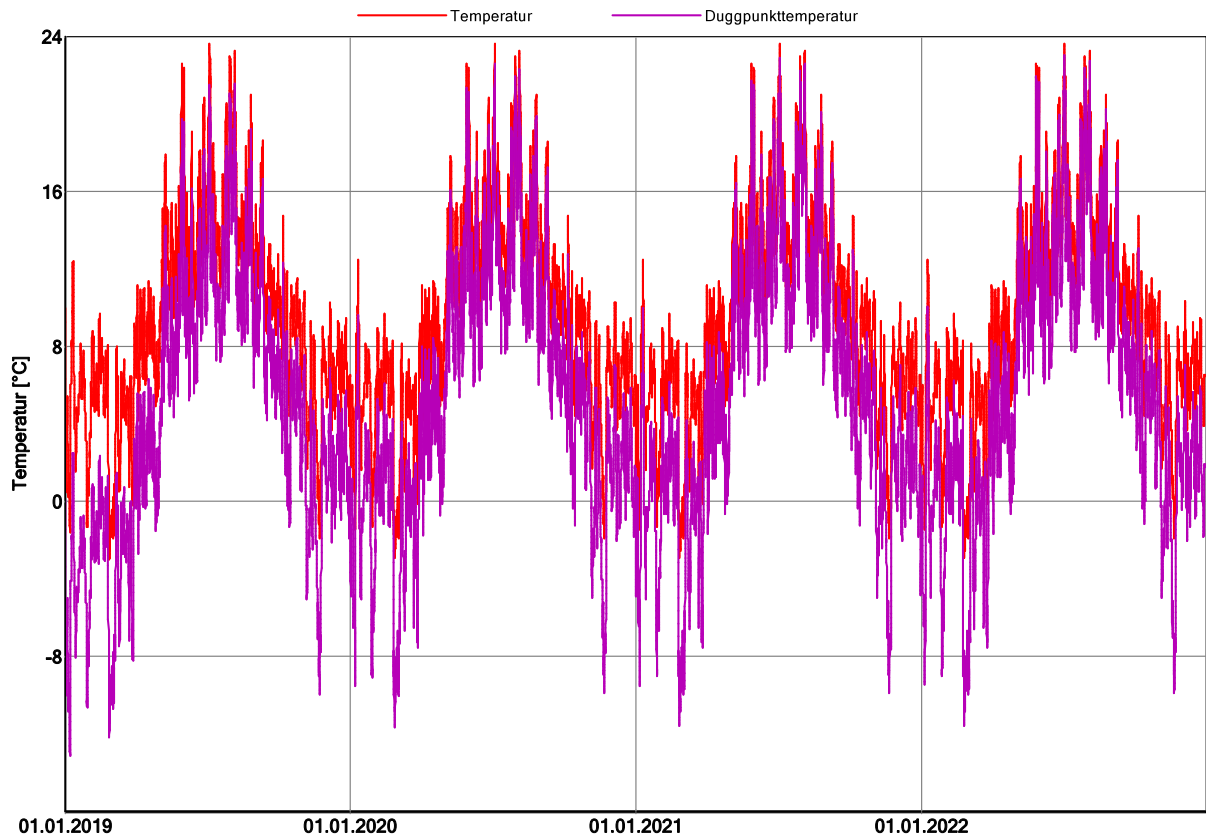
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,050757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekket mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

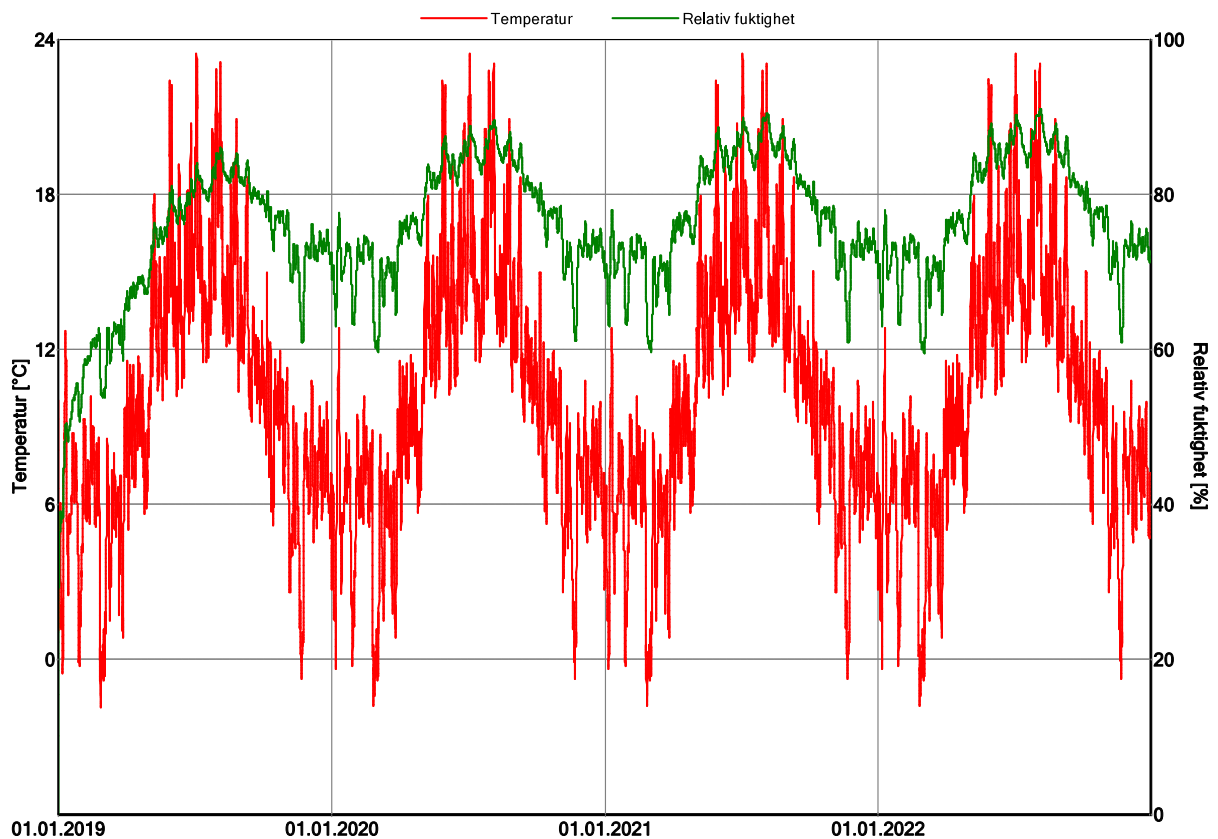
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,050757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

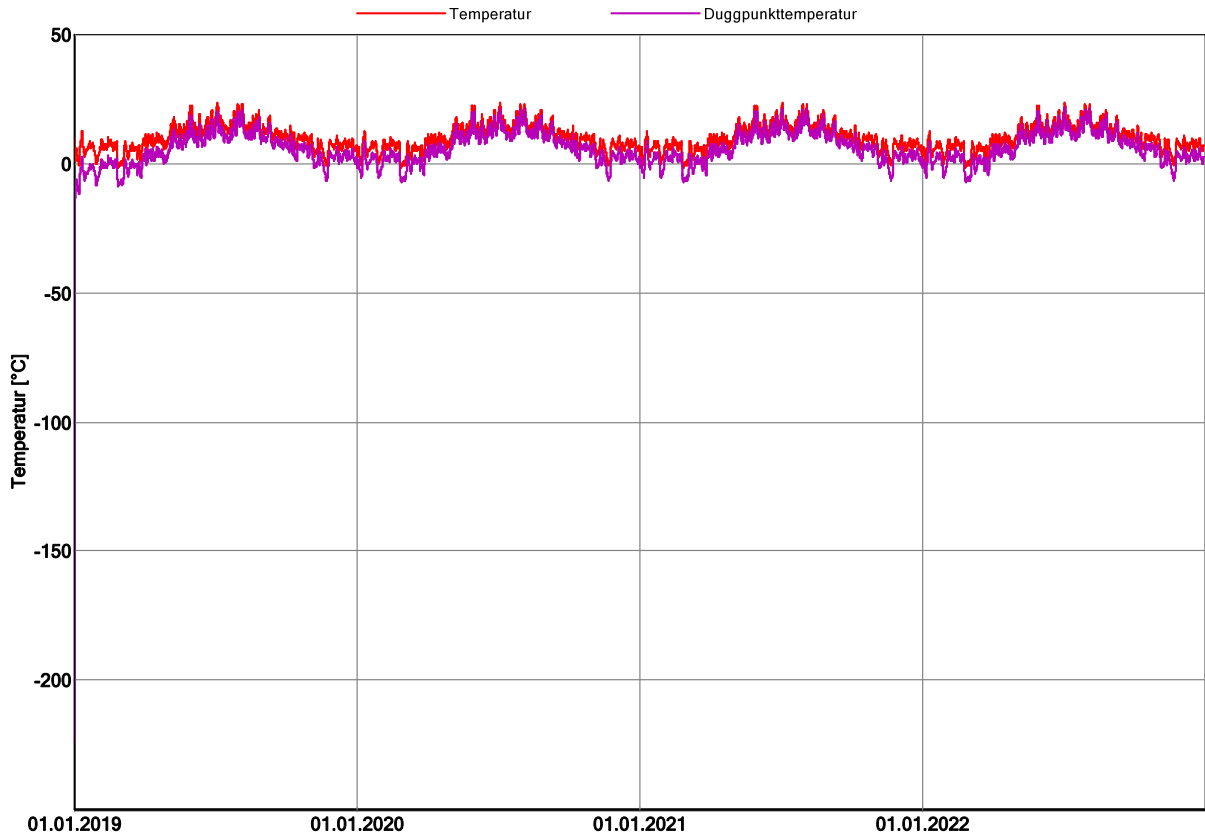
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,001243 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

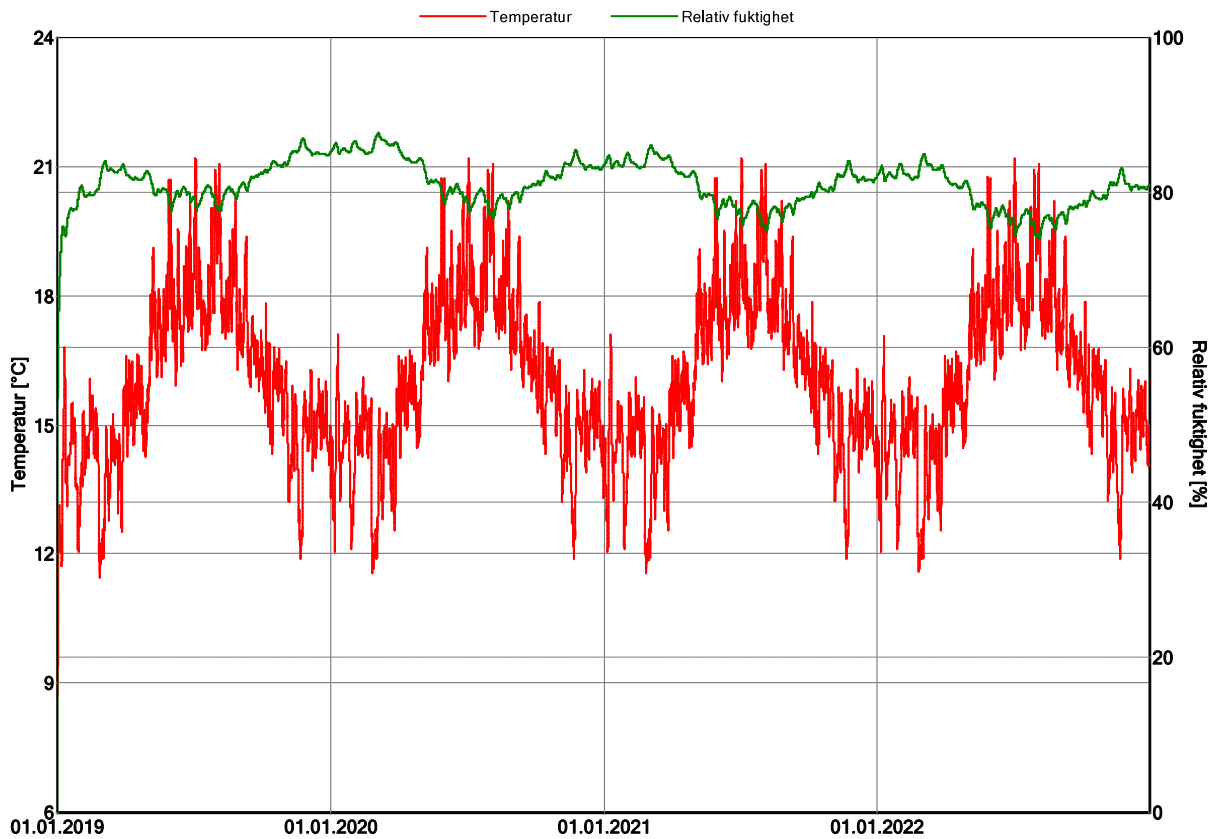
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,001243 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

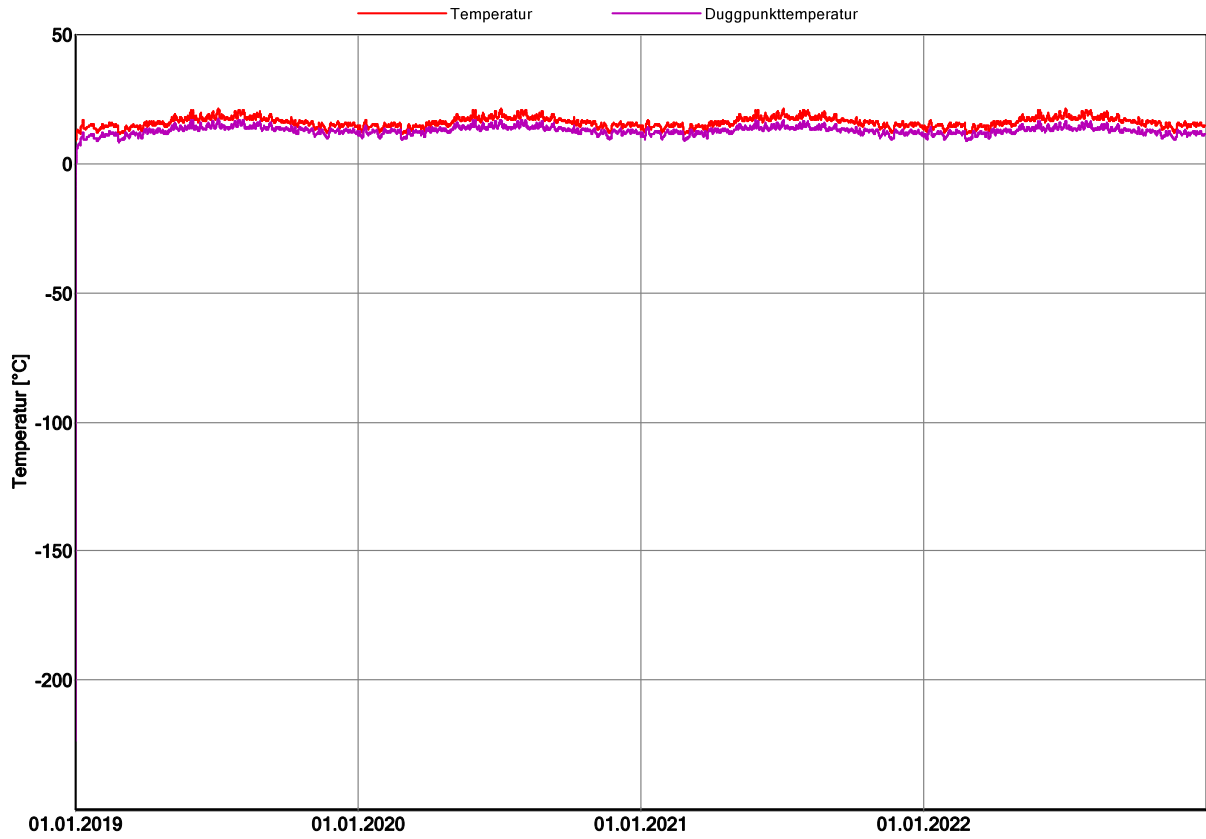
### VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,018757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

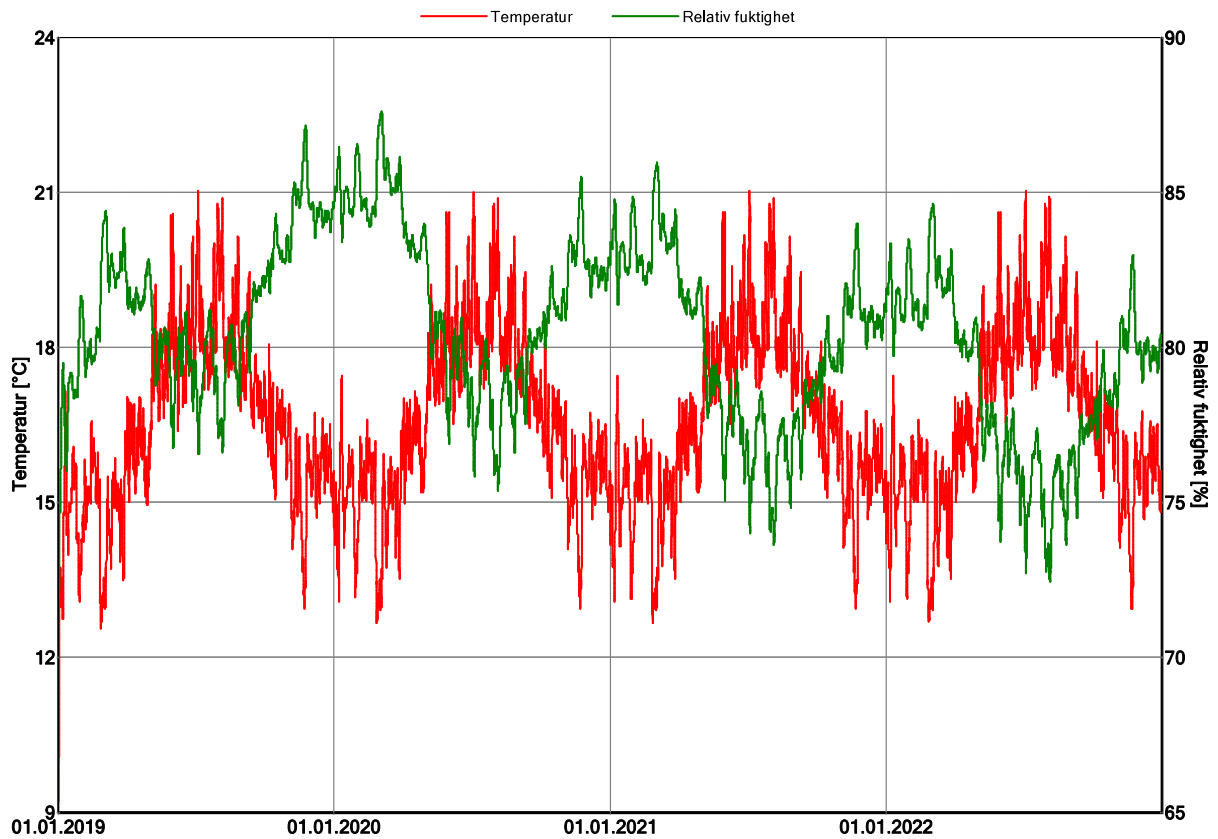
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,018757 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,001243 m)

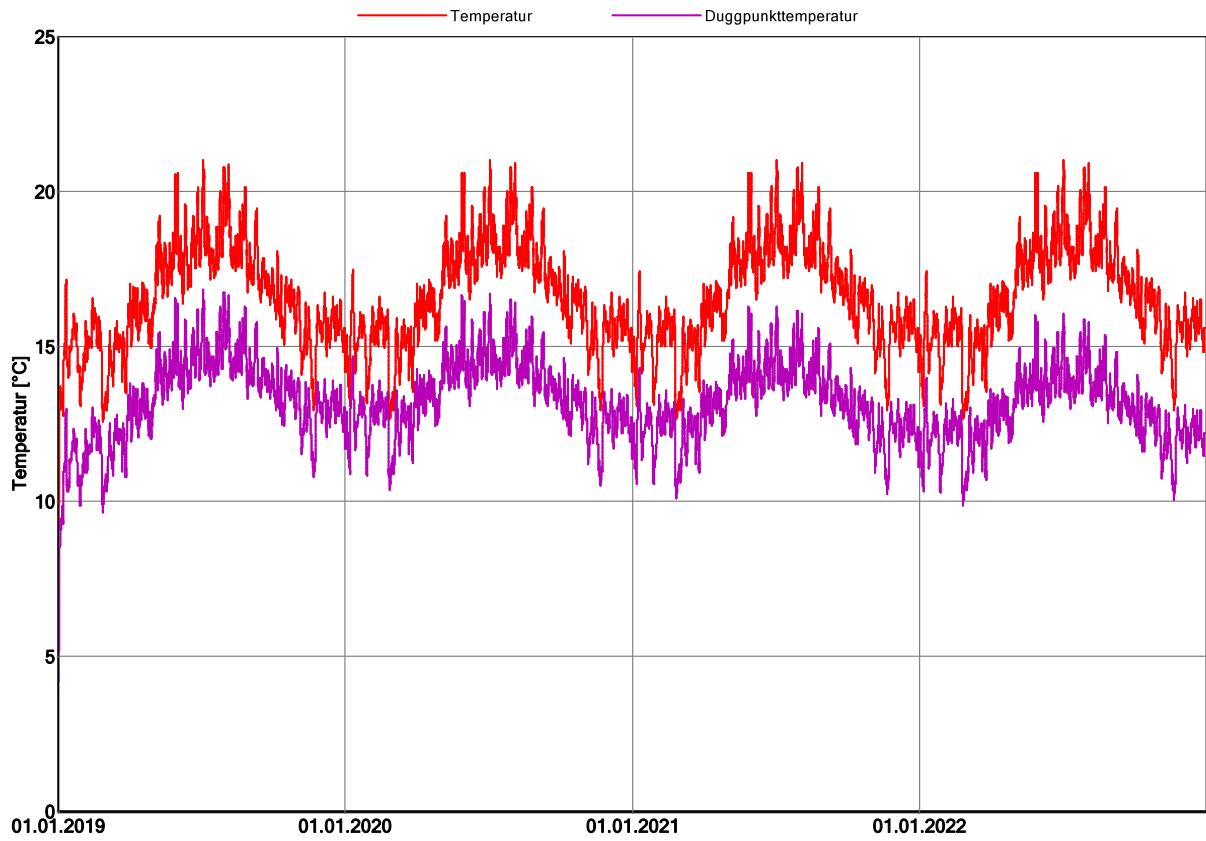


WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



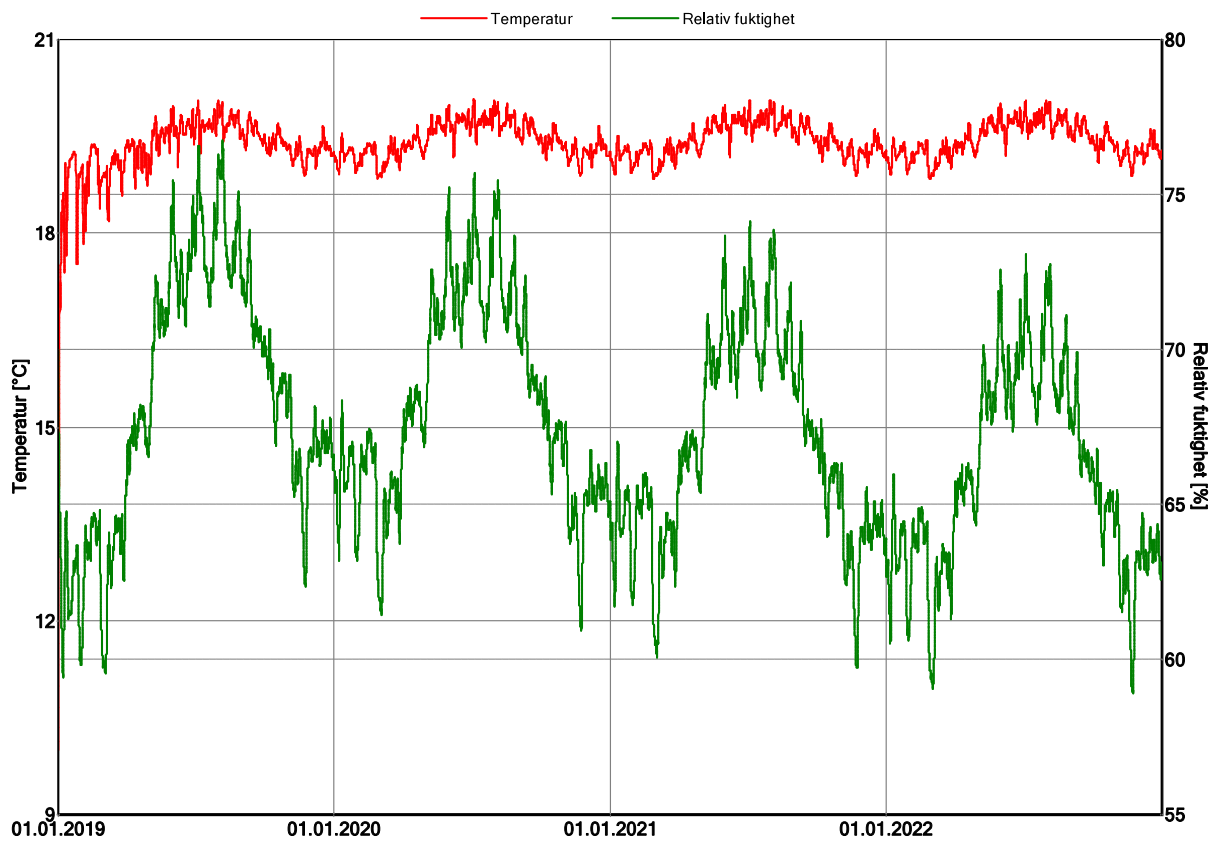
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,001243 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekket mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

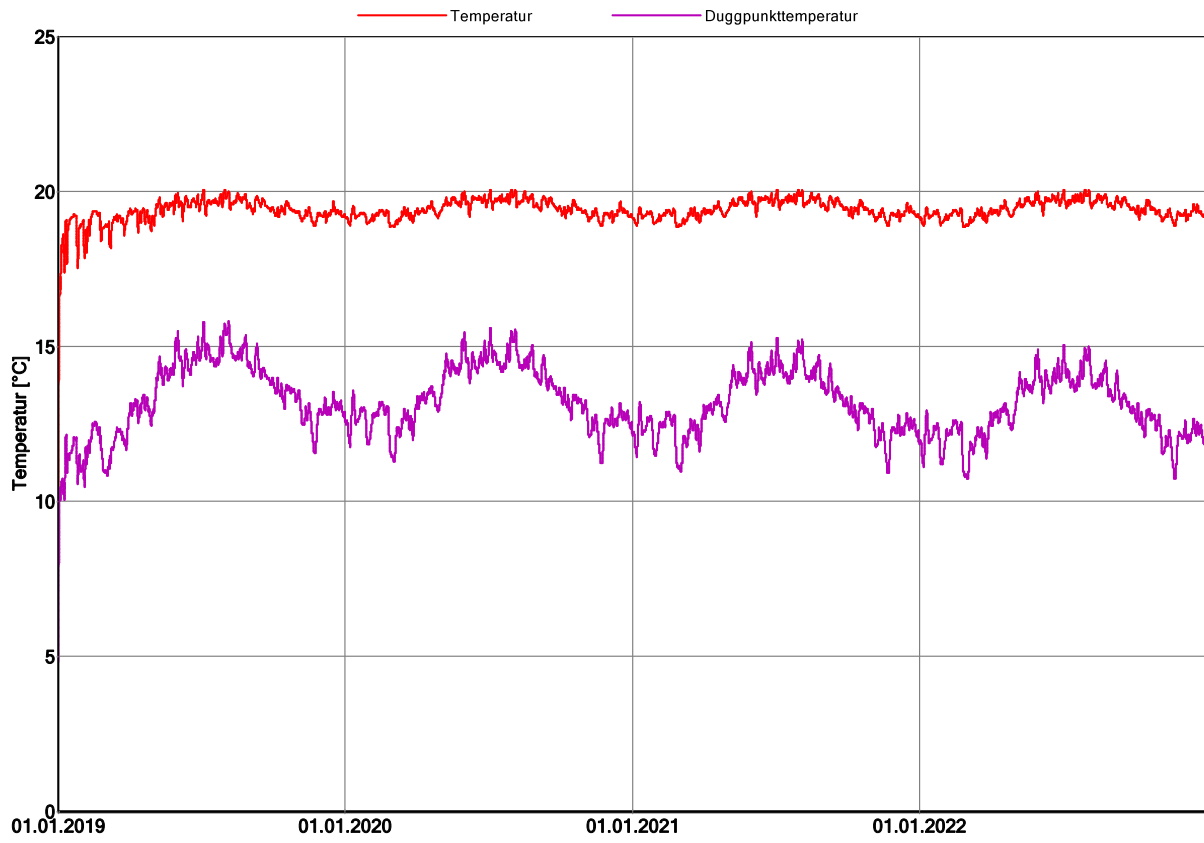
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049922 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekket mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049922 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019.w6p; Variant 2: #2 VIP terrasse betongdekke mer byggfukt; 03,05,2019

## 5 Terrassekonstruksjon med VIP uten betongdekke, lite byggfukt

## Prosjektdata

Prosjektnavn Superisolasjon, bacheloroppgave

Prosjektnummer

Oppdragsgiver NTNU og Rambøll

Kontaktperson Frida Ulla og Ingrid Astrup

Postnr/Sted

Adresse

Tel.

Faks

E-post

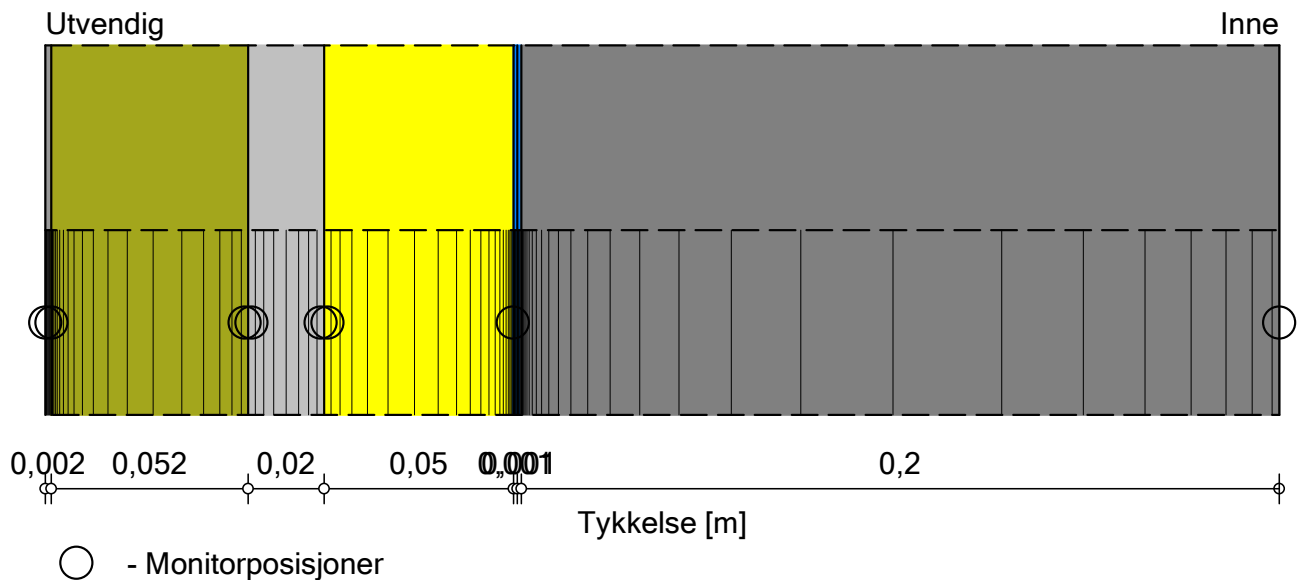
Ansvarlig Frida Ulla og Ingrid Astrup

Kommentarer Analyse av bygningsdeler med VIP eller aerogel.





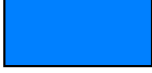
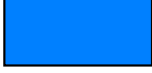

Dato 25.03.2019

## Konstruksjonsoppbygging

Variant: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt



### Materialer:

	- PVC membrane	0,002 m
	- ROCKWOOL TOPROCK DD	0,052 m
	- VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,02 m
	- EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- Betong B45	0,2 m

Samlet tykkelse: 0,326 m

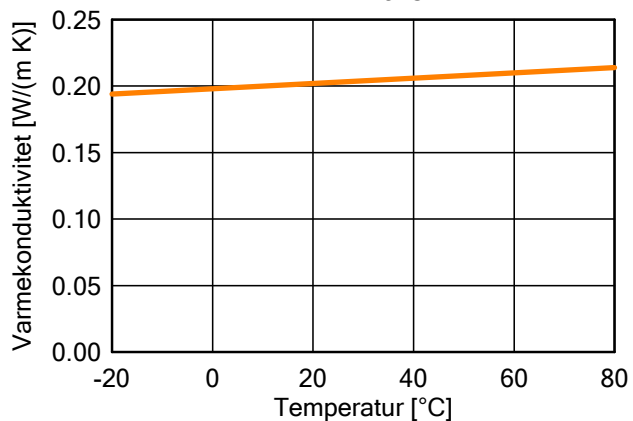
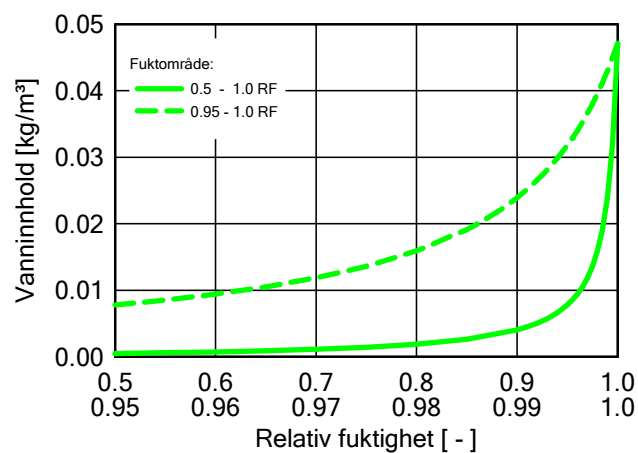
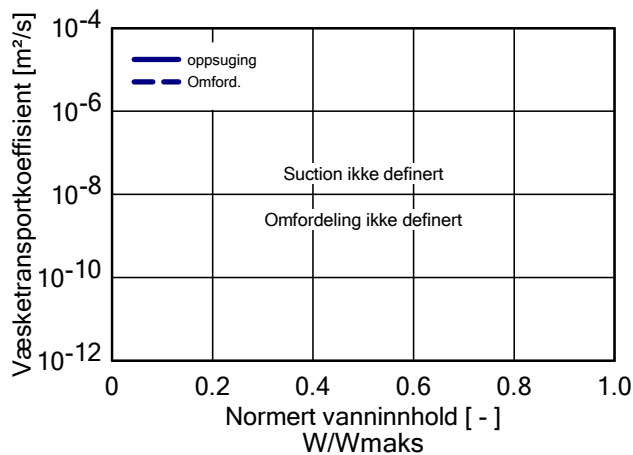
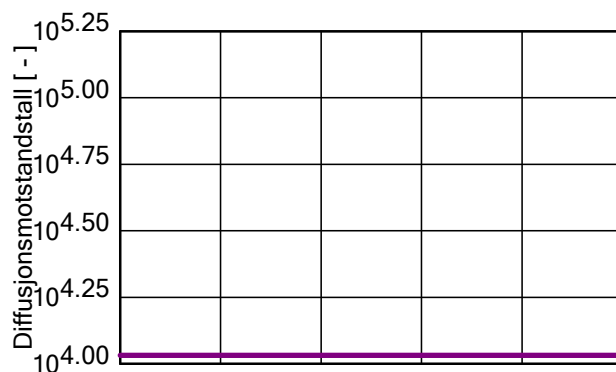
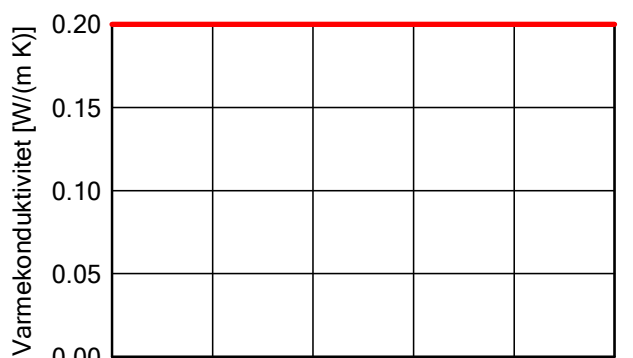
Varmemotstand: 5,66 (m<sup>2</sup> K)/W

U-verdi: 0,171 W/(m<sup>2</sup> K)

# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: PVC membrane

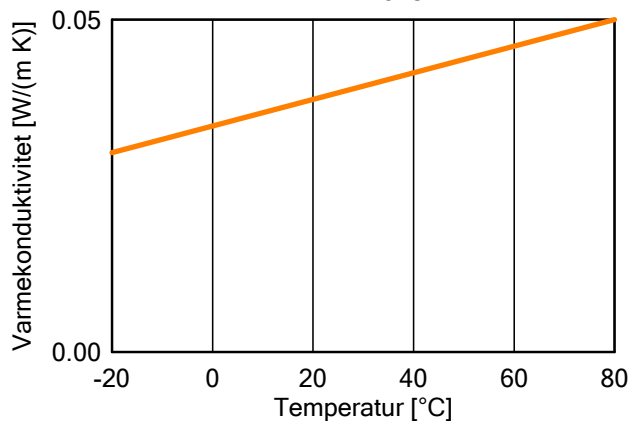
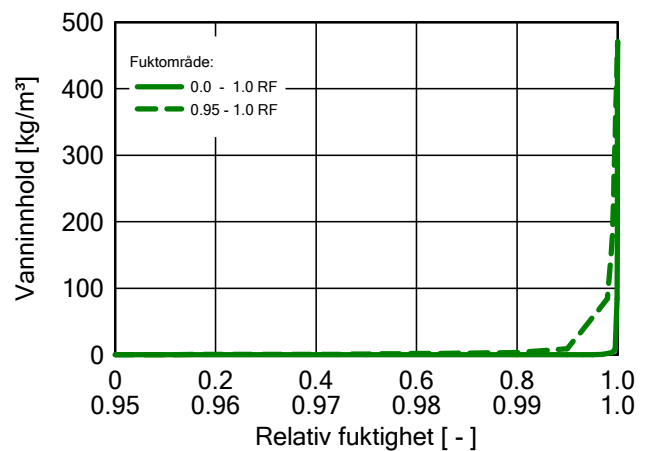
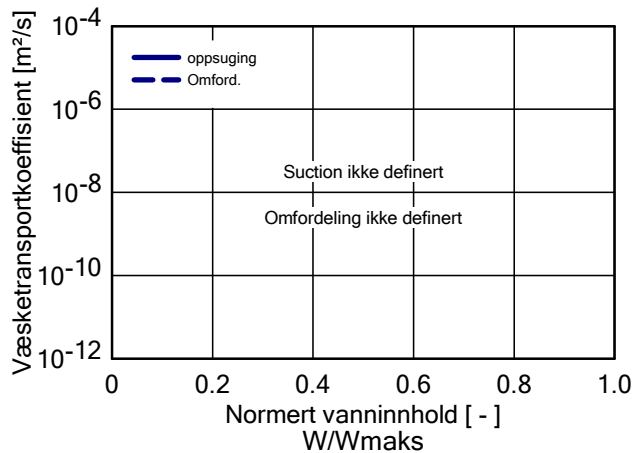
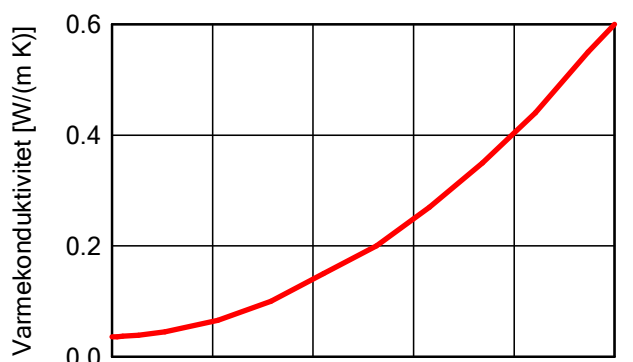
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	10761
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL TOPROCK DD

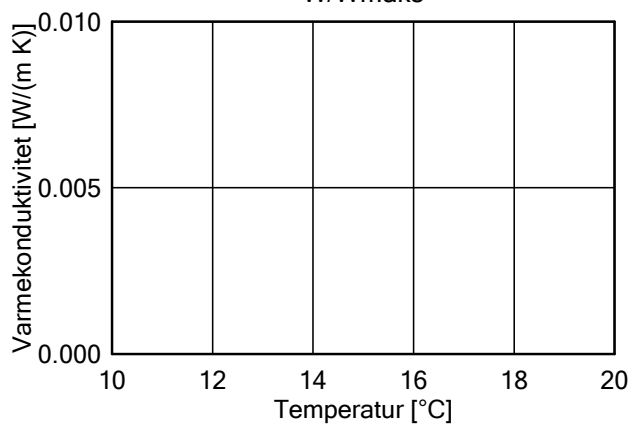
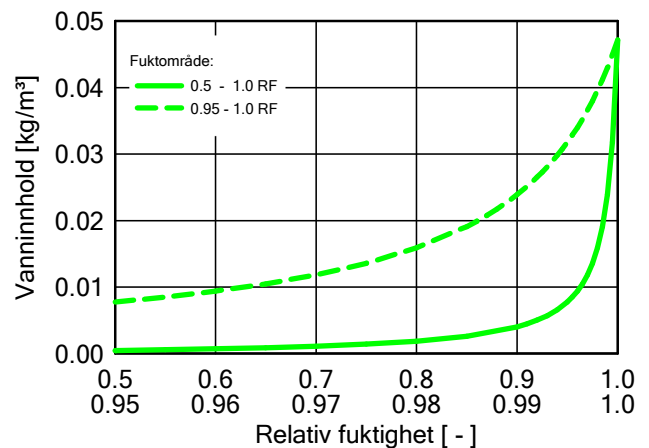
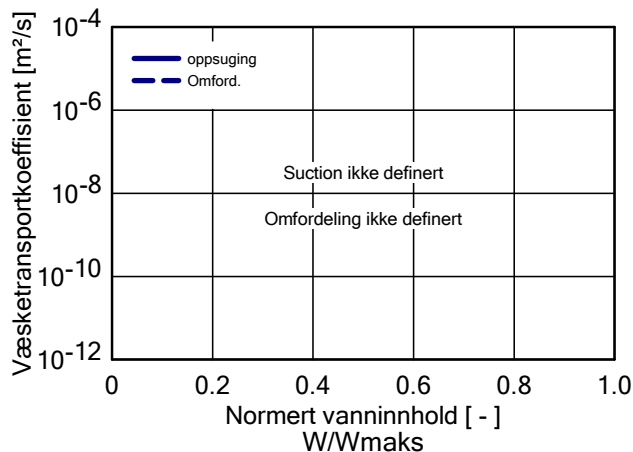
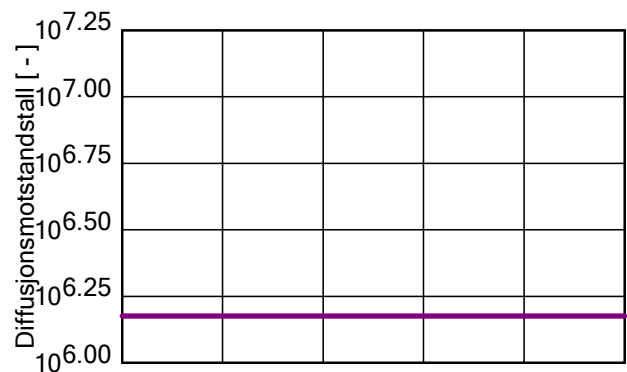
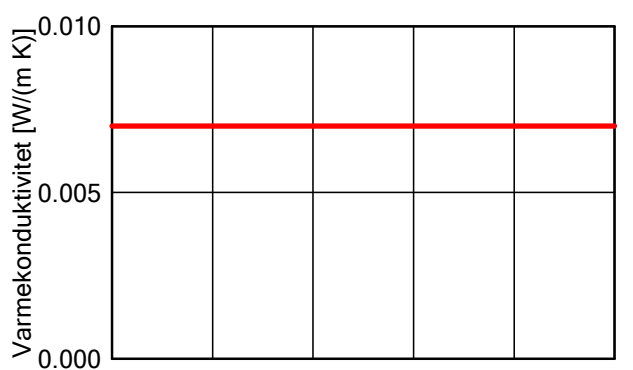
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	176
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	1.2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K)

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	200
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	800
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.007
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	1500000

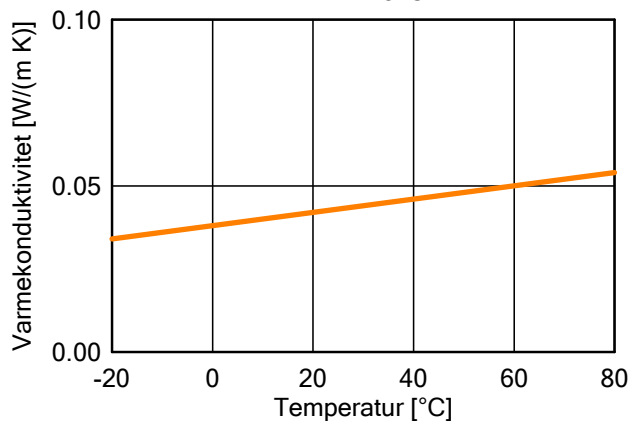
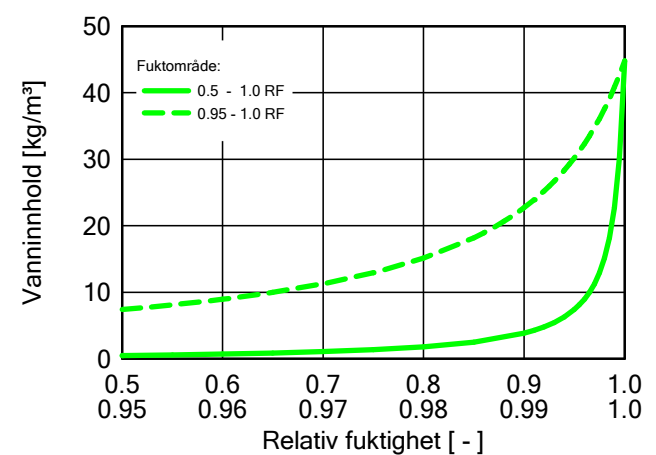
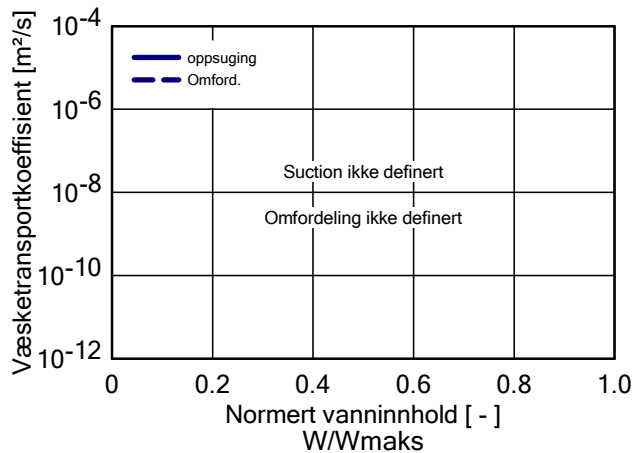
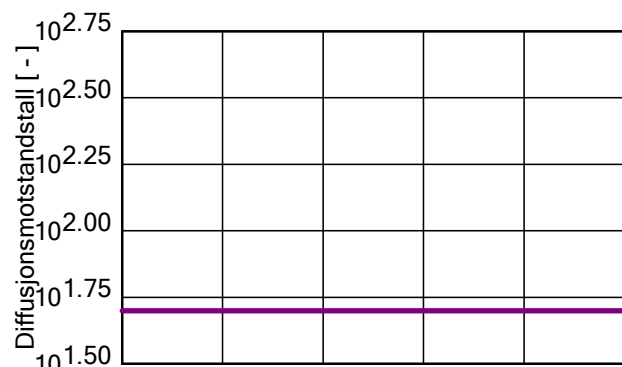
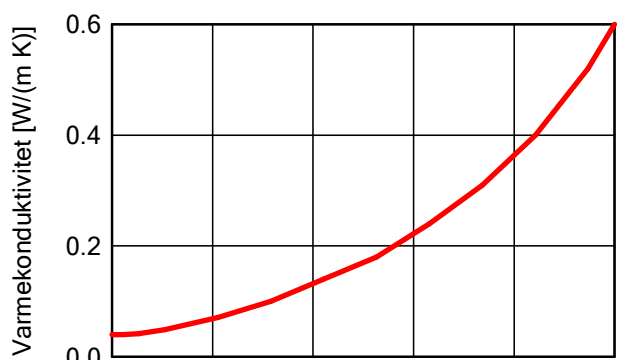




# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>)

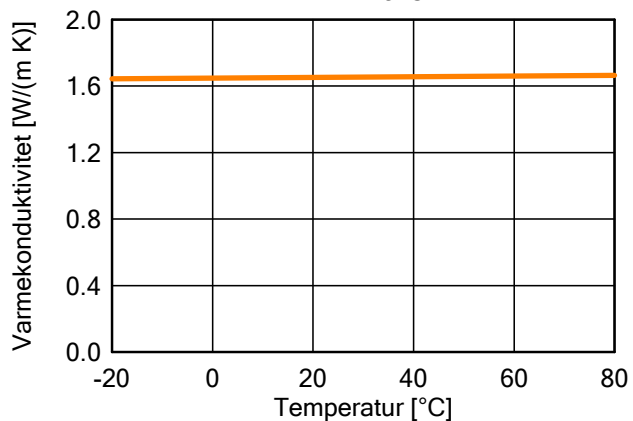
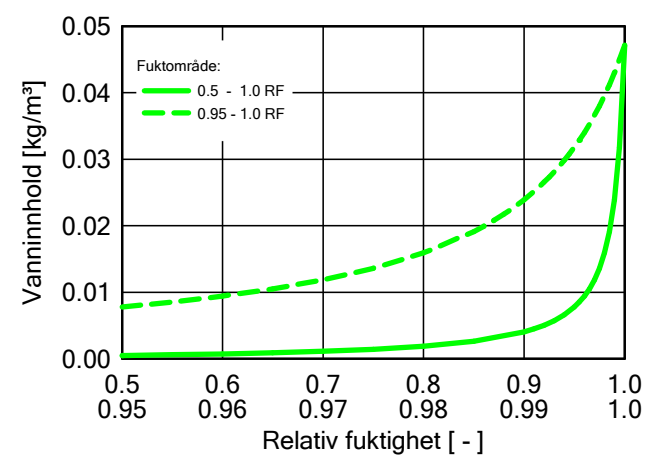
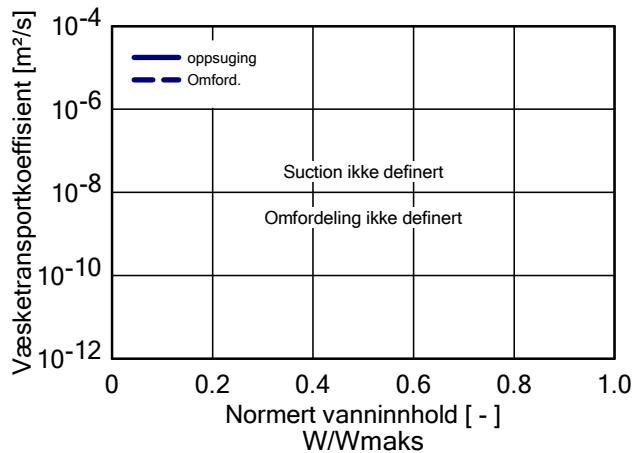
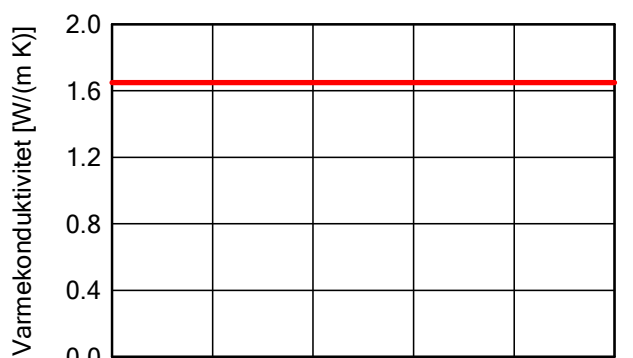
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	30
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekoduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	50
Temp.-avh. varmekodukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

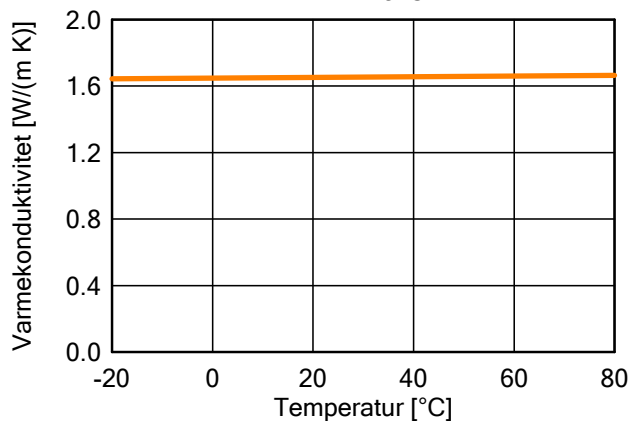
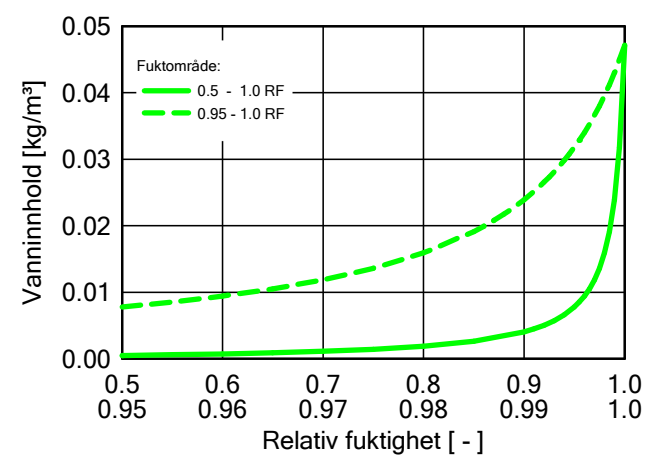
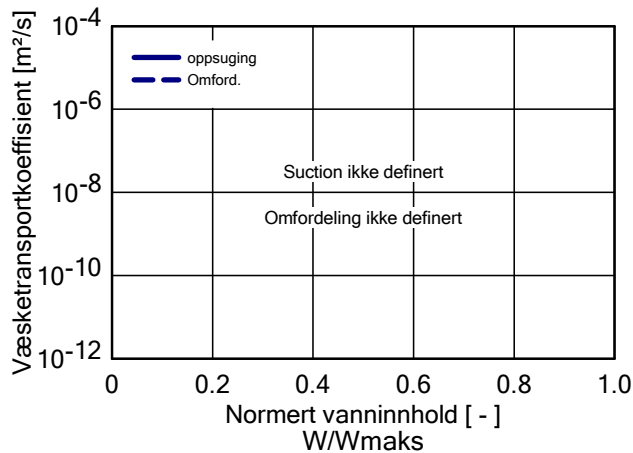
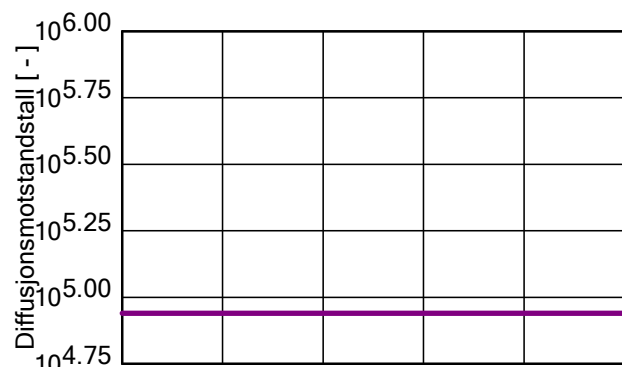
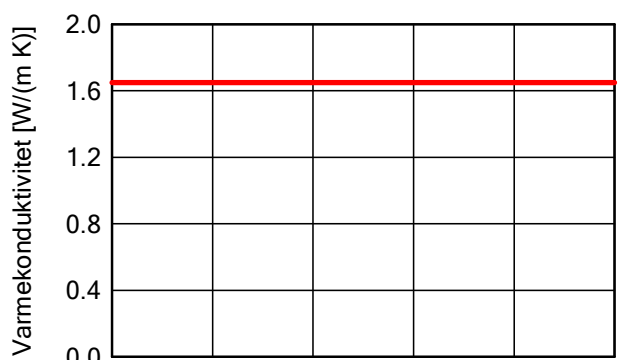
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

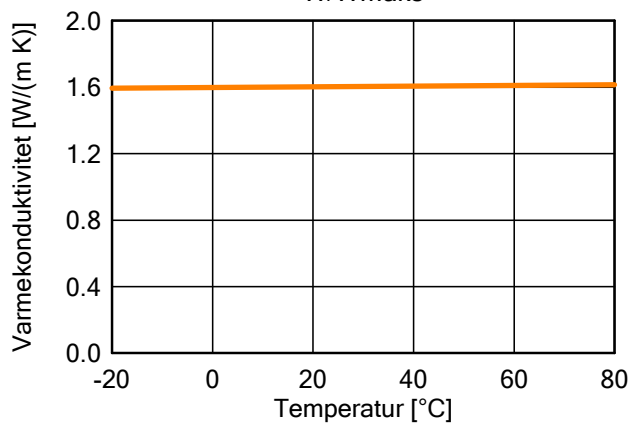
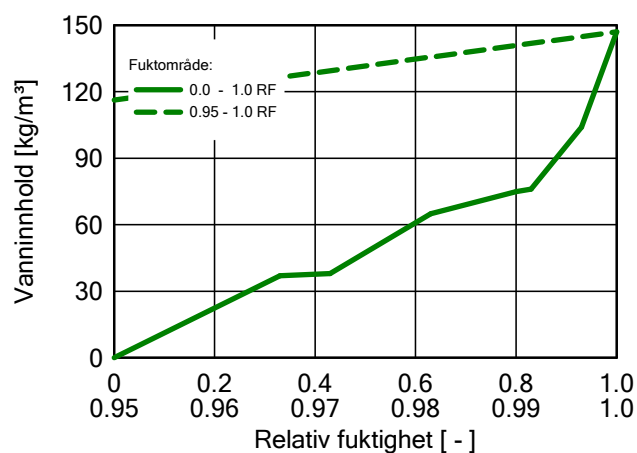
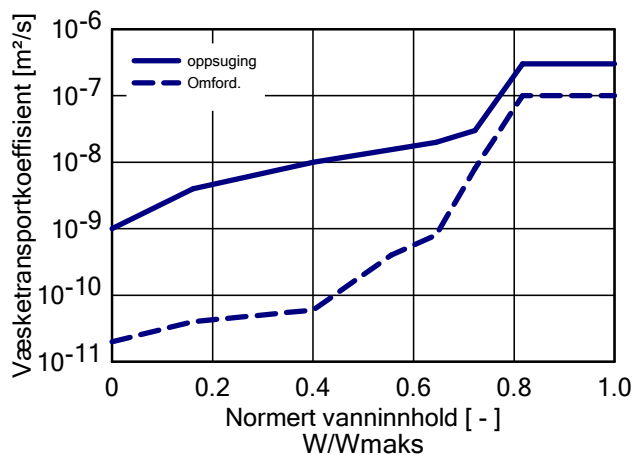
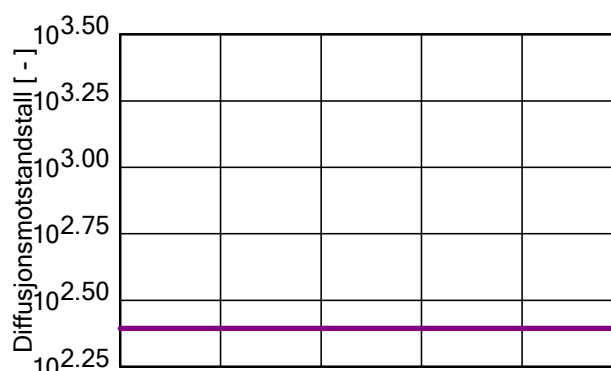
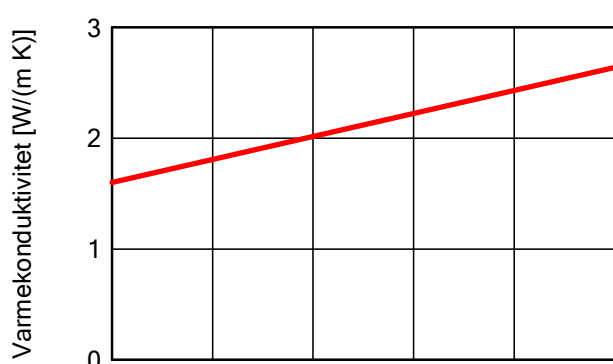
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## Randvilkår

## Ute (venstre side)

Sted for klima: Trondheim; NBI / NTNU  
 Temperaturforskyvning: 0.0 °C  
 Orientering / Helning: Vest / 0 °  
 Avkjøling ved stråling om natten: nei

## Inne (høyre side)

Inneklima: EN 13788  
 Fuktklasse 3; Temperatur: 20 °C

## Overflaters overgangskoeffisient

## Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Lys	[-]	0.2
Langbølget strålingsemissivitet	Lys	[-]	0.9
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1,0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

## Inne (høyre side)

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

## Resultater fra siste beregning

## Status for beregning

Dato/tid for beregning	03.05.2019 08:42:50
Regnetid	1 min,44 sek.
Begynn / Avslutt beregning	01.01.2019 / 01.01.2023
Antall konvergensfeil	0

## Numerisk kvalitetssjekk

Samlet fukttransport, utv. (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 0,0
Samlet fukttransport, innv. (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	9,39 2,39
Balanse 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,78
Balanse 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,78

Vanninnhold [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	Slutt	Min.	Maks.
Totalt vanninnhold	28,02	16,09	16,07	28,03

Vanninnhold [kg/m<sup>3</sup>]

Sjikt/Materiale	Start	Slutt	Min.	Maks.
PVC membrane	0,00	0,00	0,00	0,01
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,00	0,06	0,00	0,07
VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,00	0,00	0,00	0,00
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK)	0,46	2,00	0,46	2,00
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,00
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Betong B45	140,00	79,95	79,83	140,03

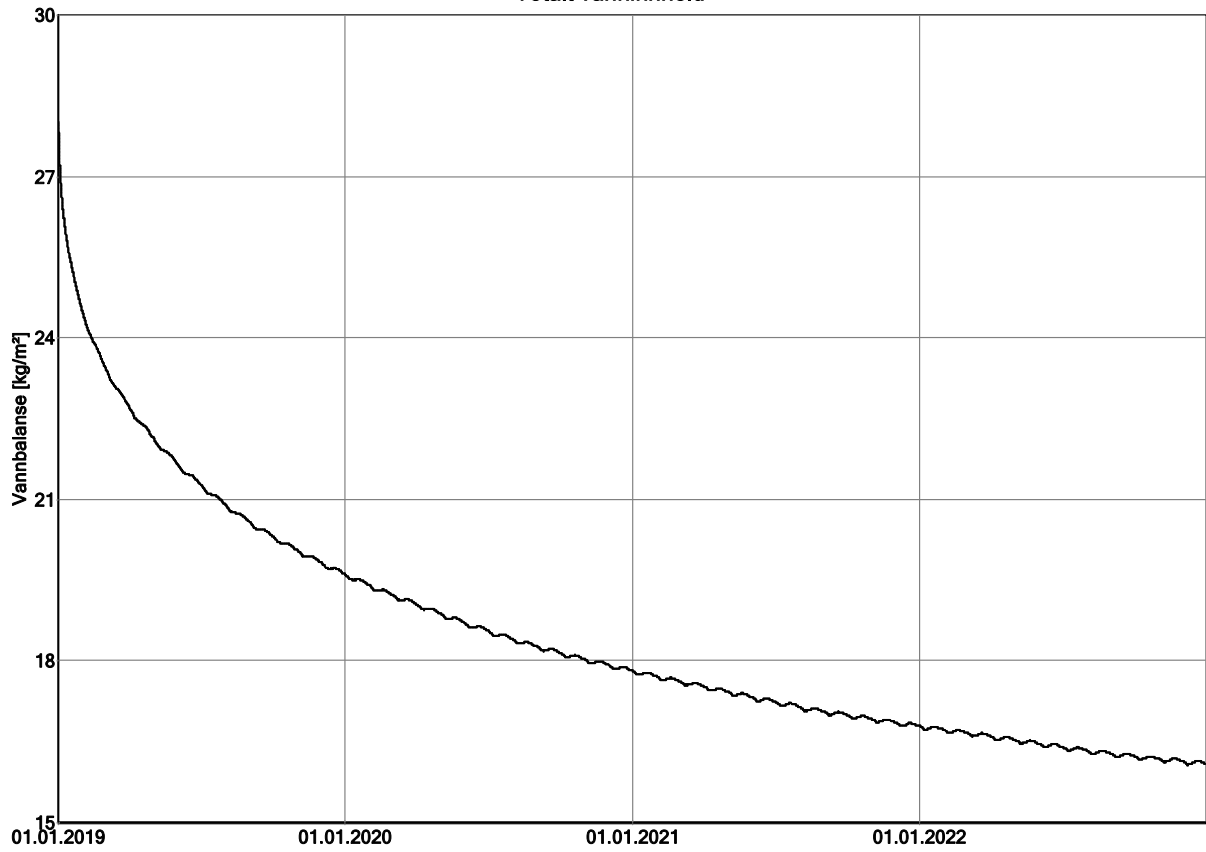
## Tidsintegralet av strømingstetthetene

Varmestrømstetthet, venstre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-2033,93
Varmestrømstetthet, høyre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-334,24
Fuktstrømmer, venstre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktstrømmer, høyre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	11,93

## Hygrotermiske kilder

Varmekilder	[MJ/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
Begrensete fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0

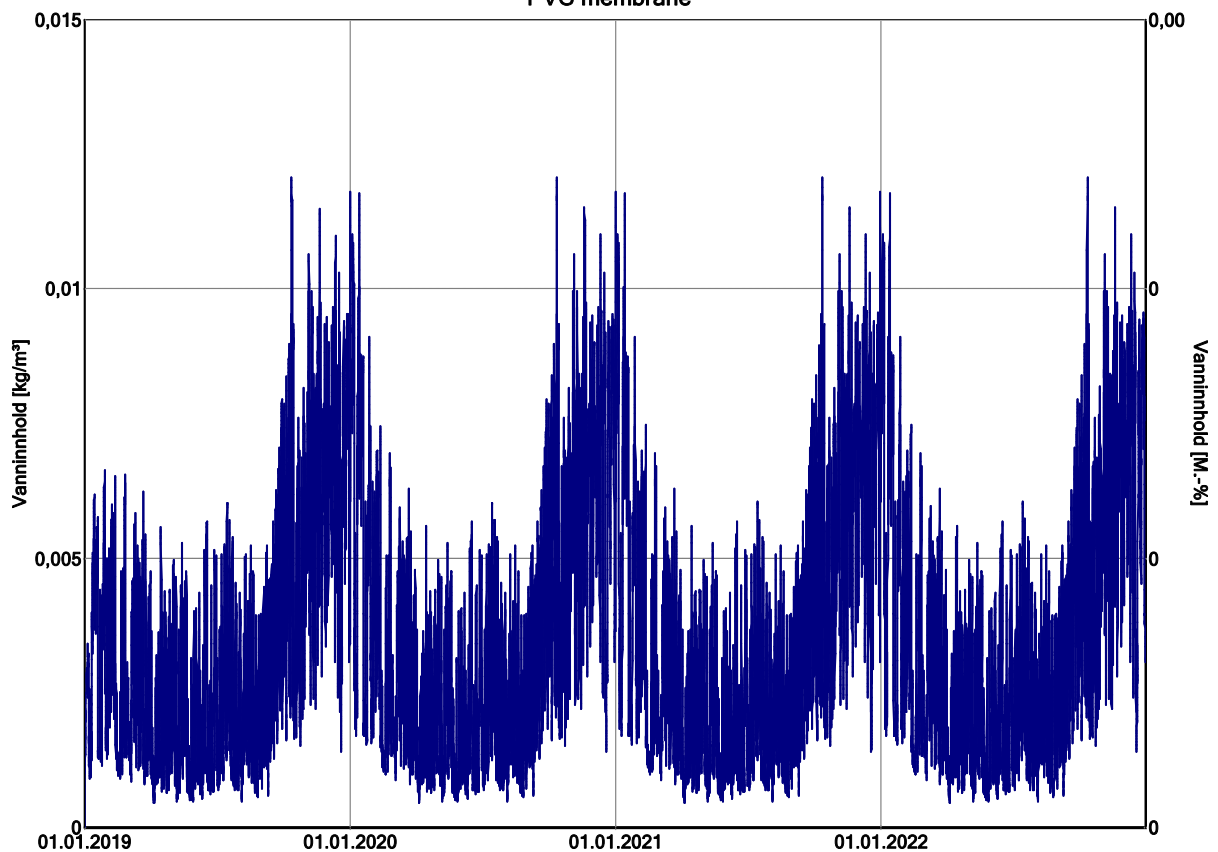
### Totalt vanninnhold



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

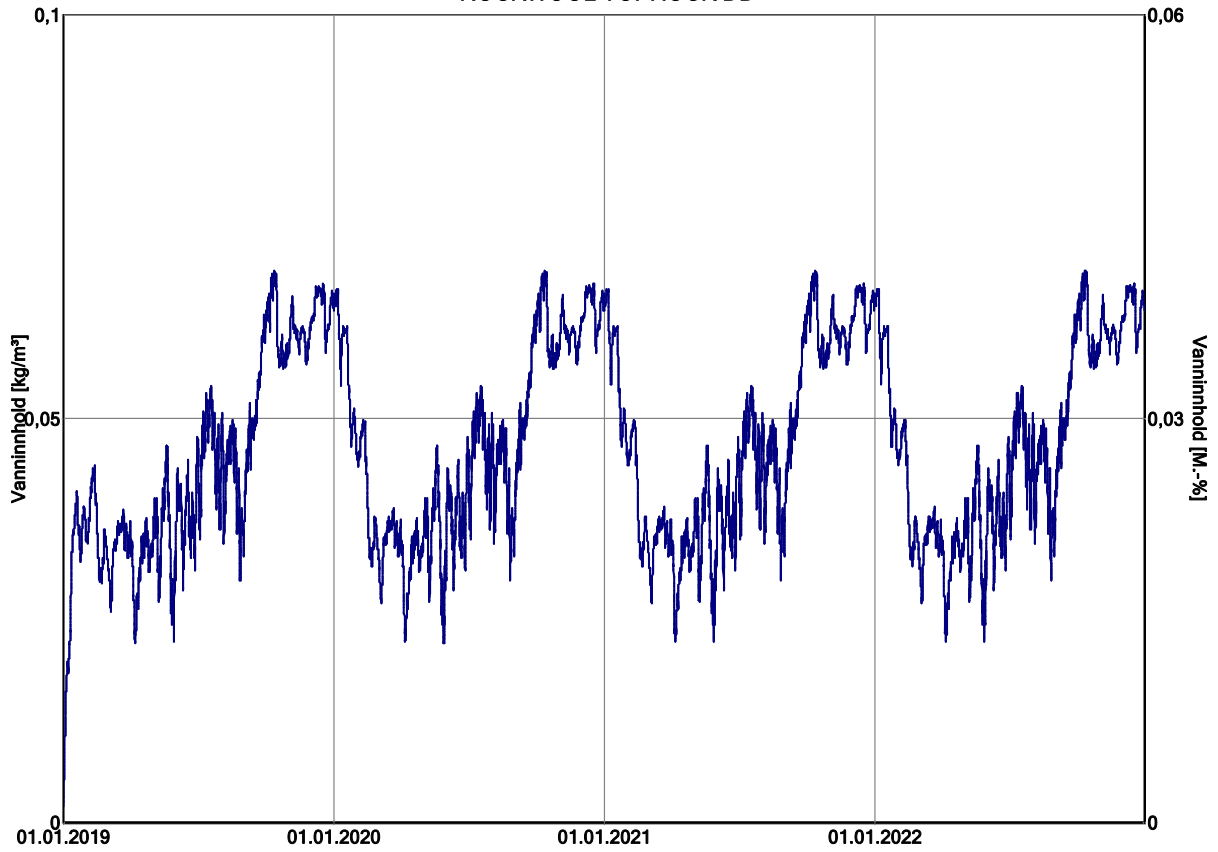
### PVC membrane



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

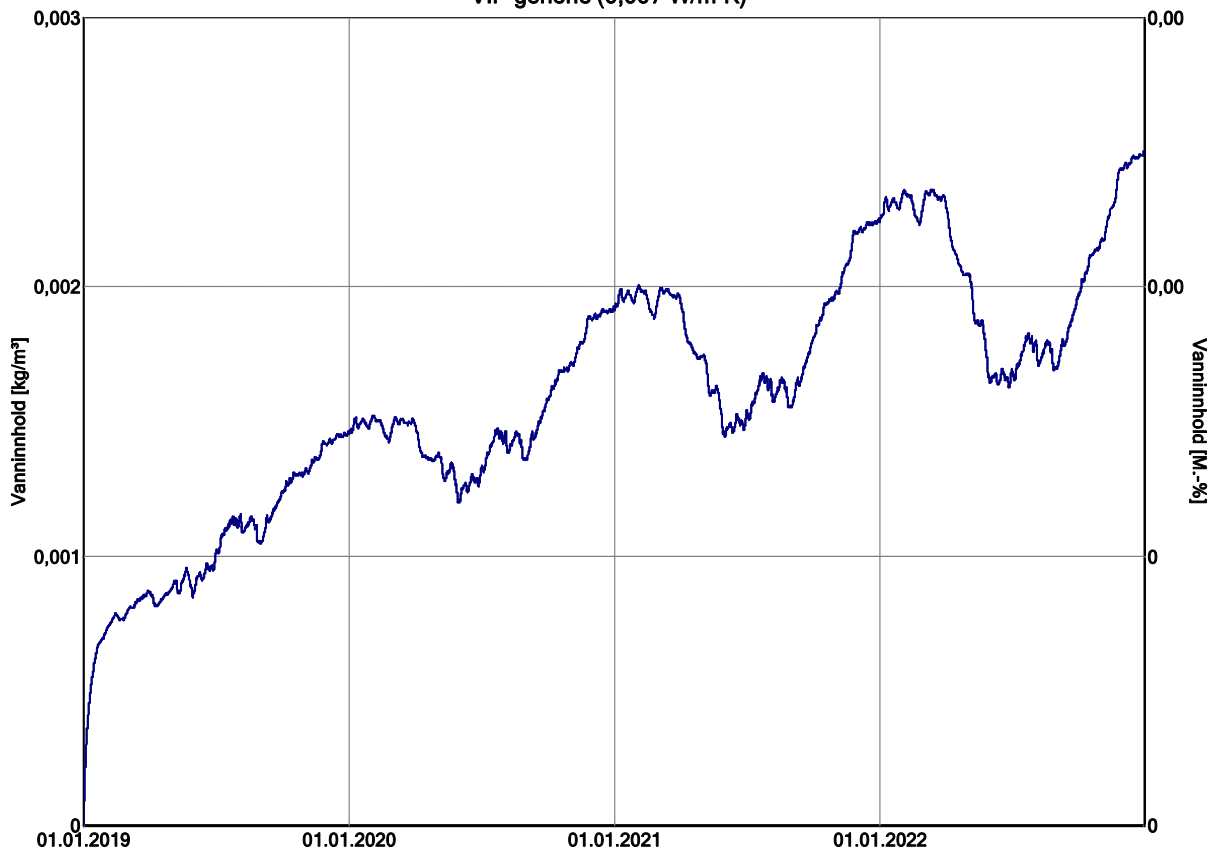
### ROCKWOOL TOPROCK DD



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

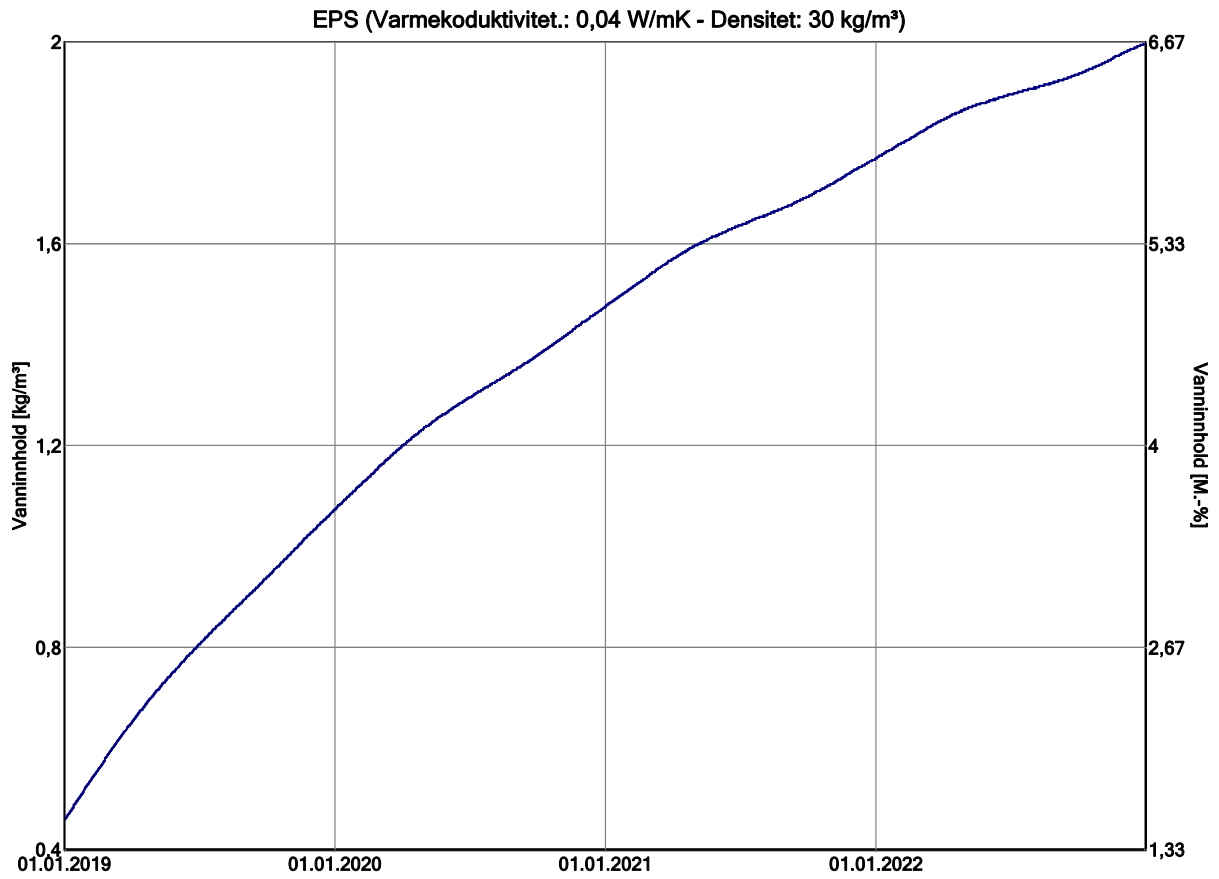
### VIP generic (0,007 W/m²K)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

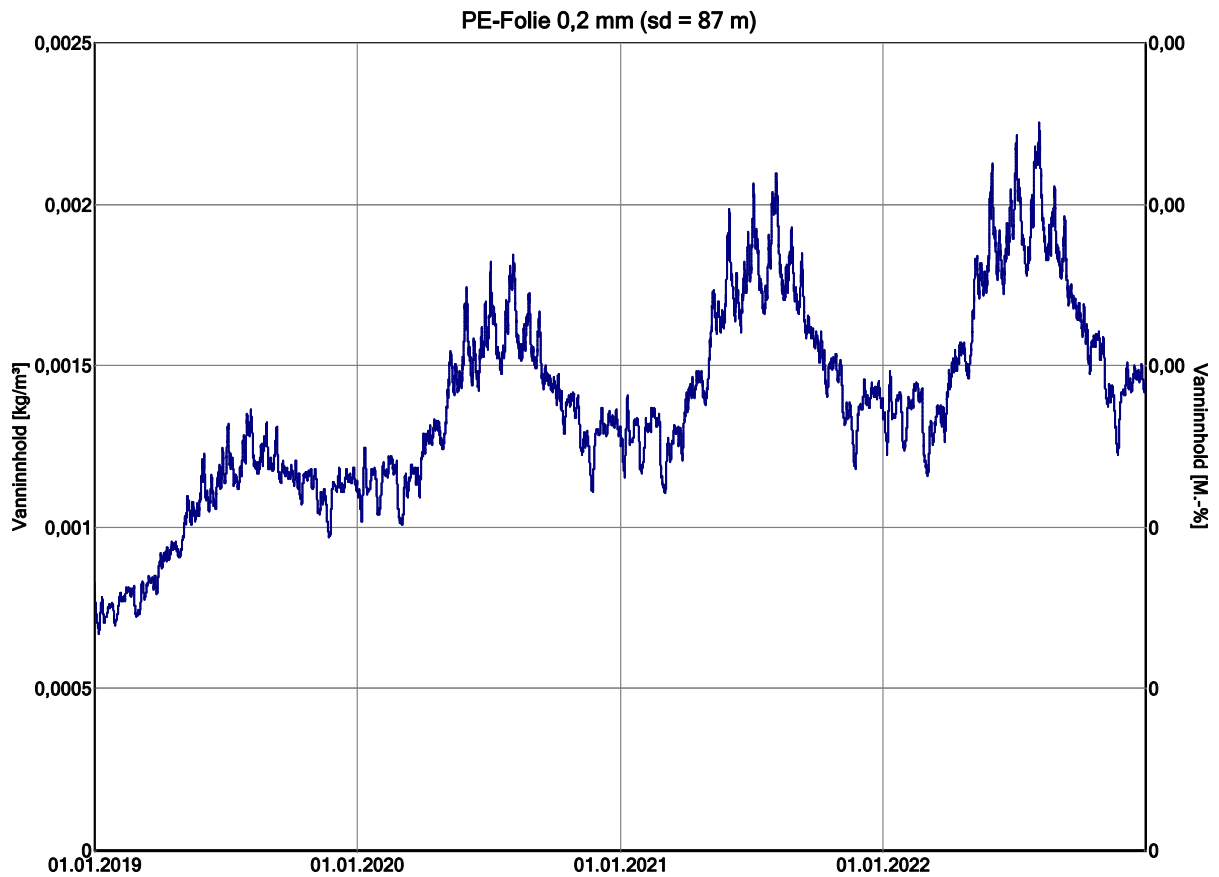
WUFI Pro 6.2 NonCommercial





WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019,w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03,05,2019

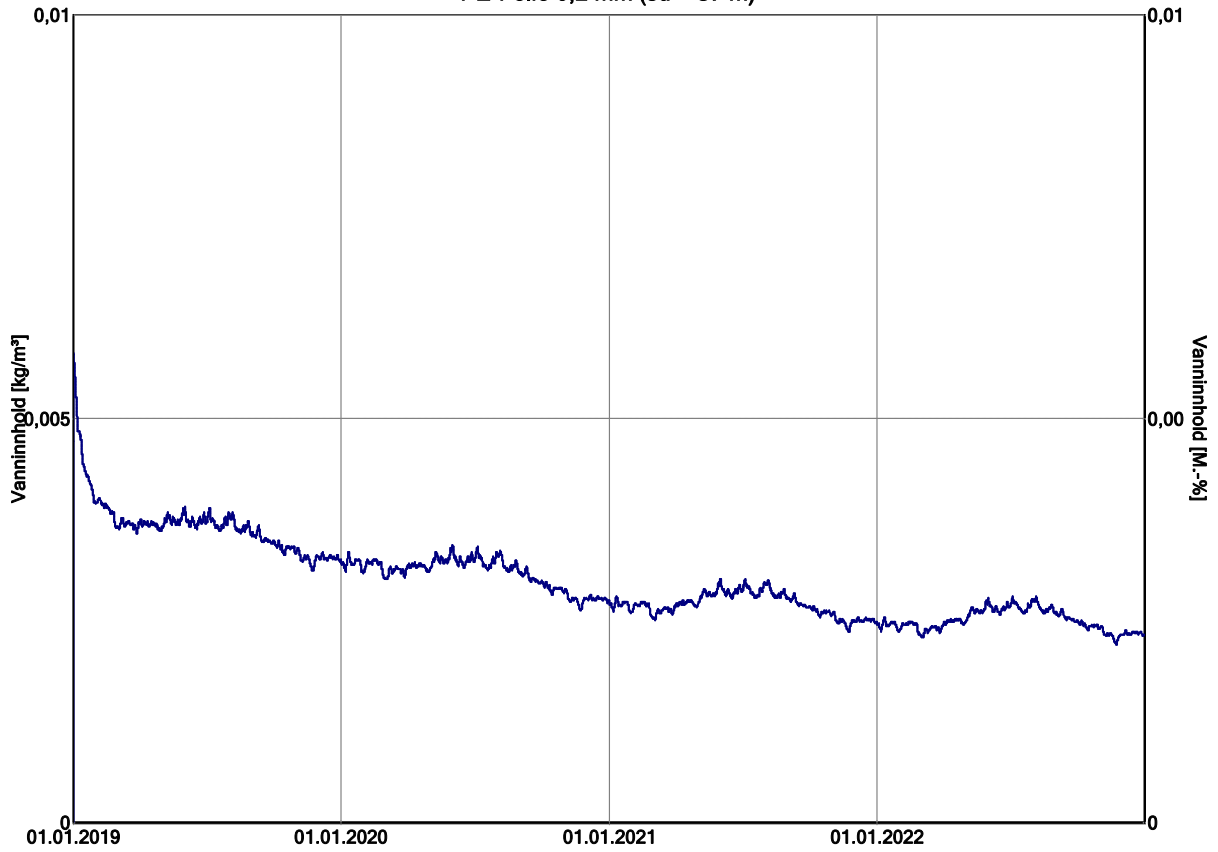
WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019,w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

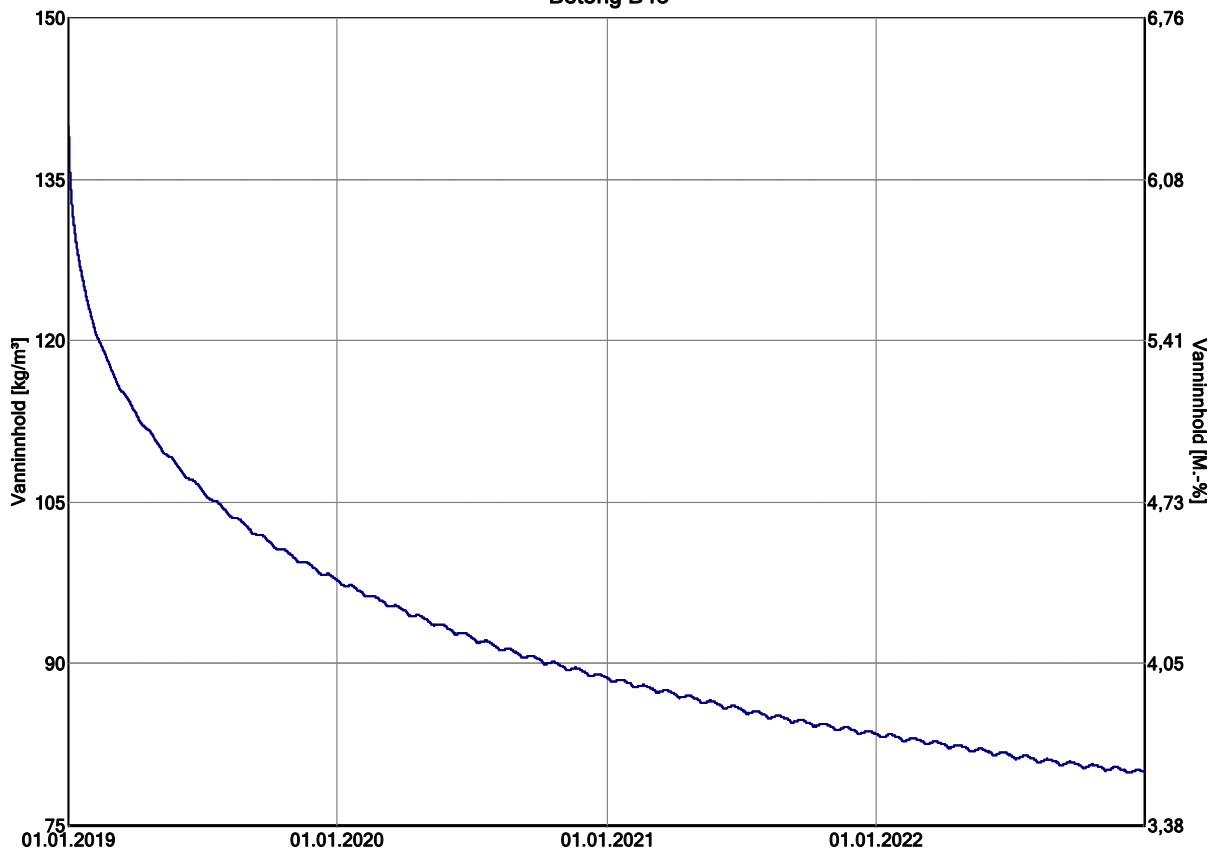
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

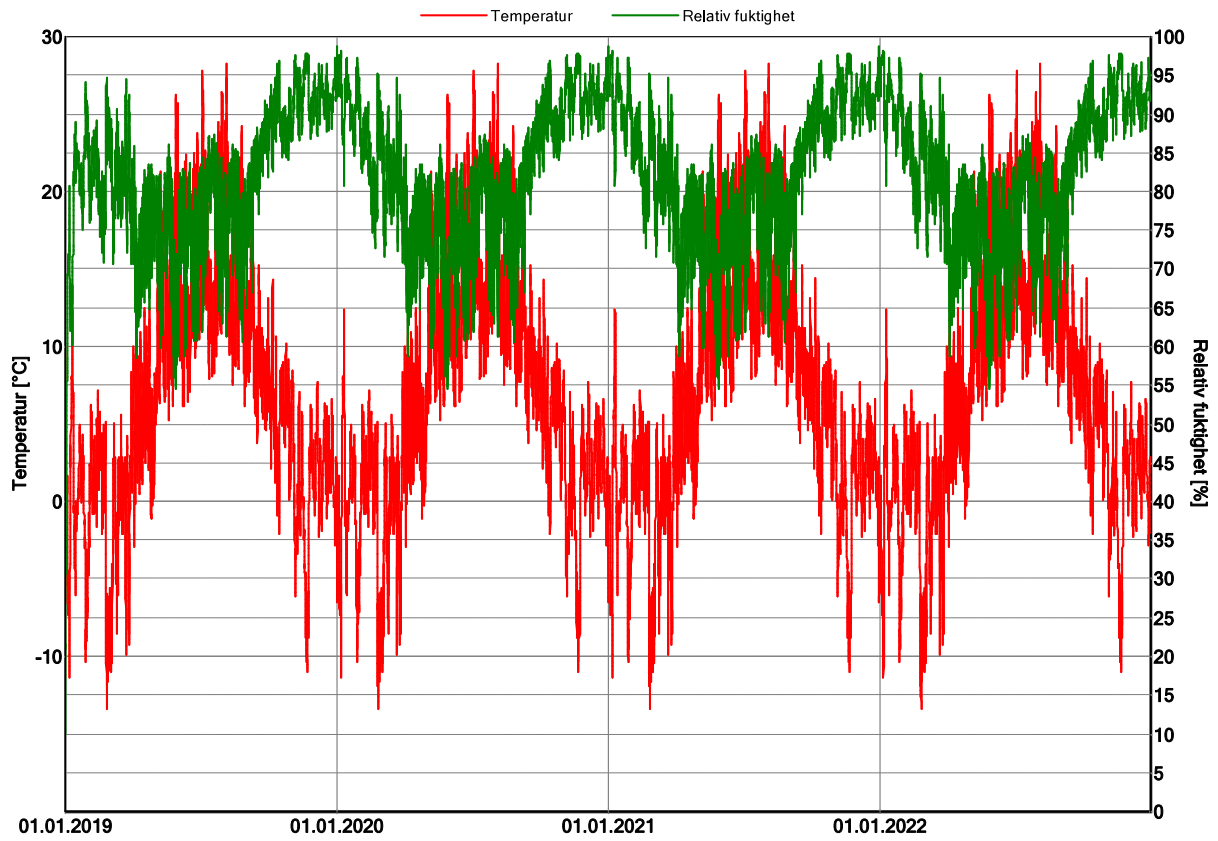
Betong B45



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

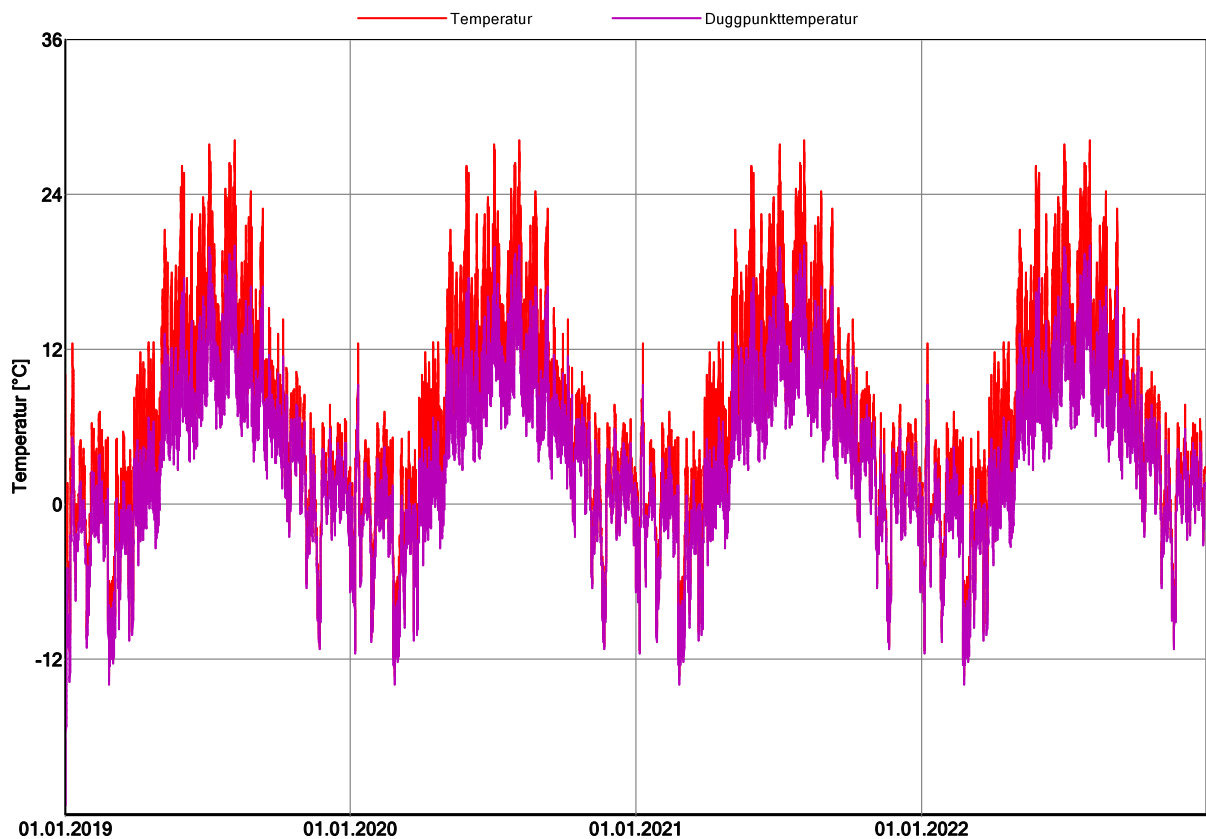
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000083 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

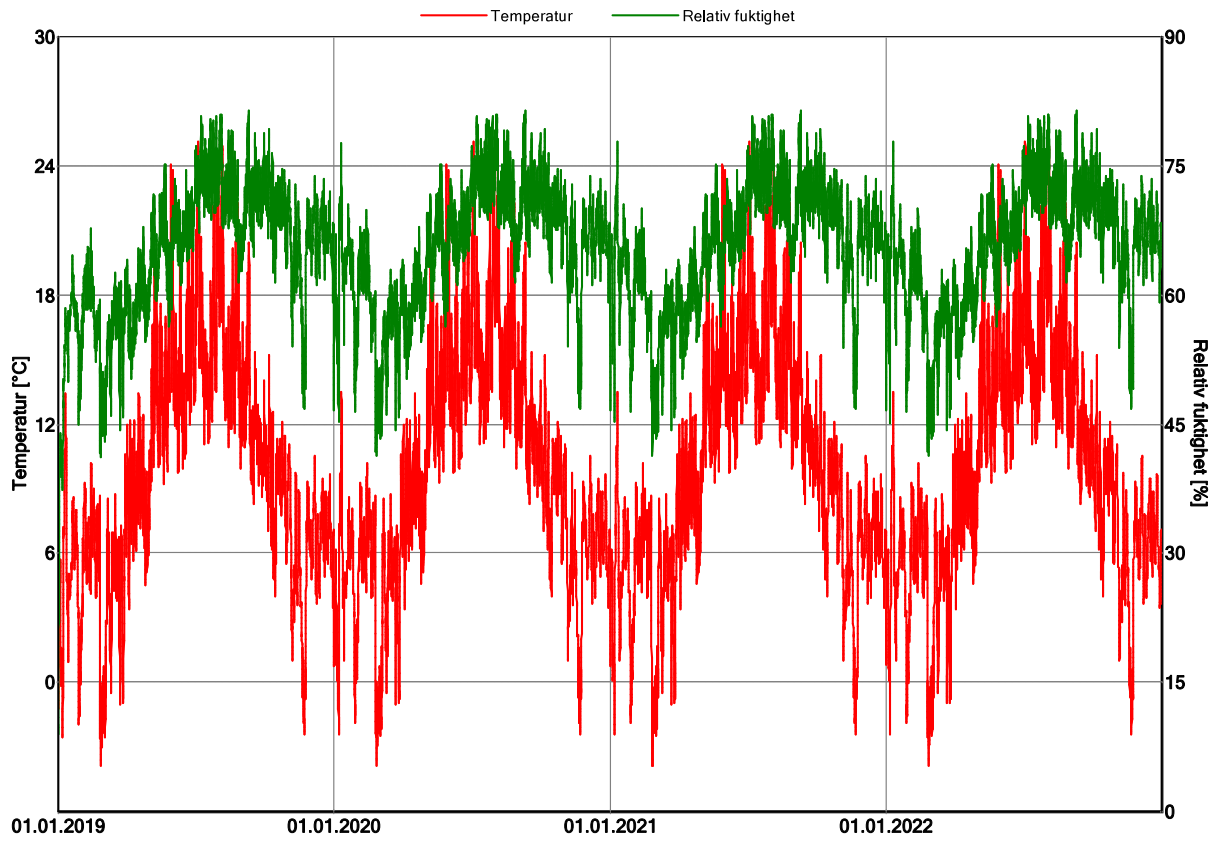
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000083 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

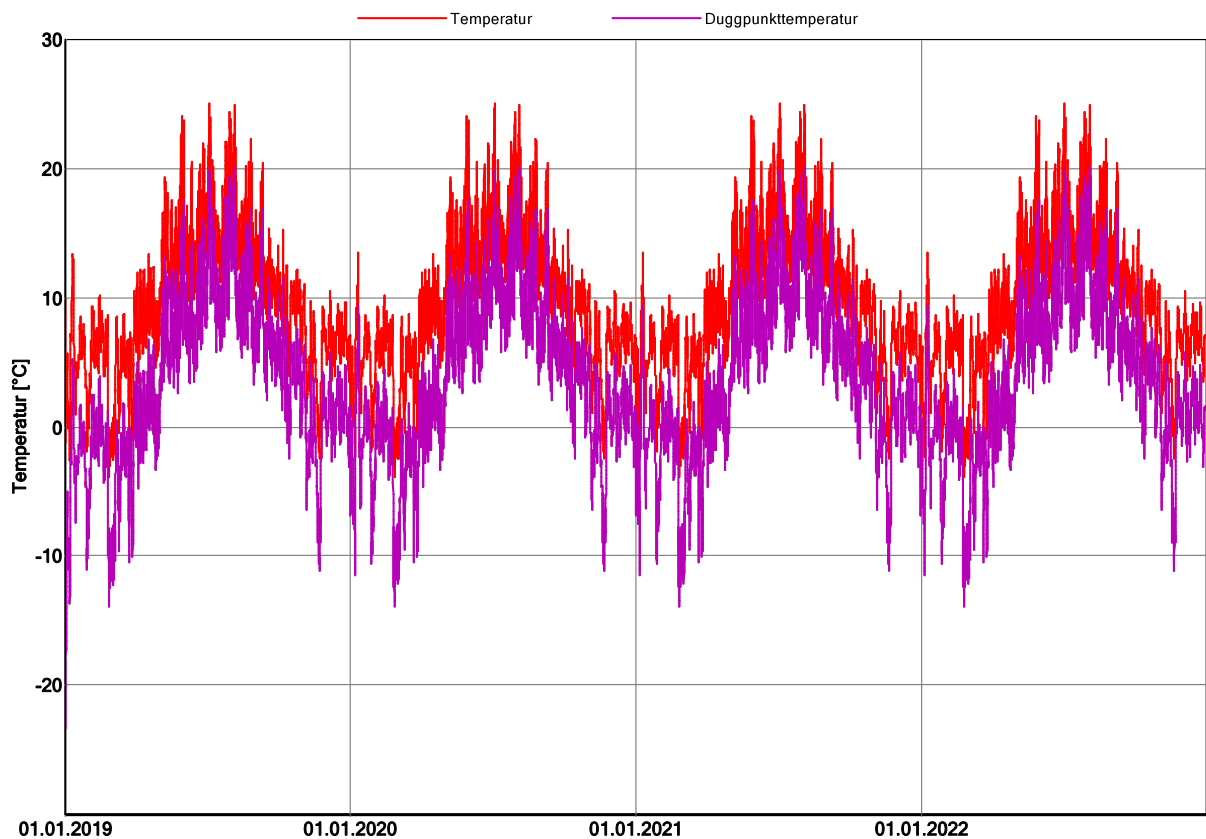
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,051086 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

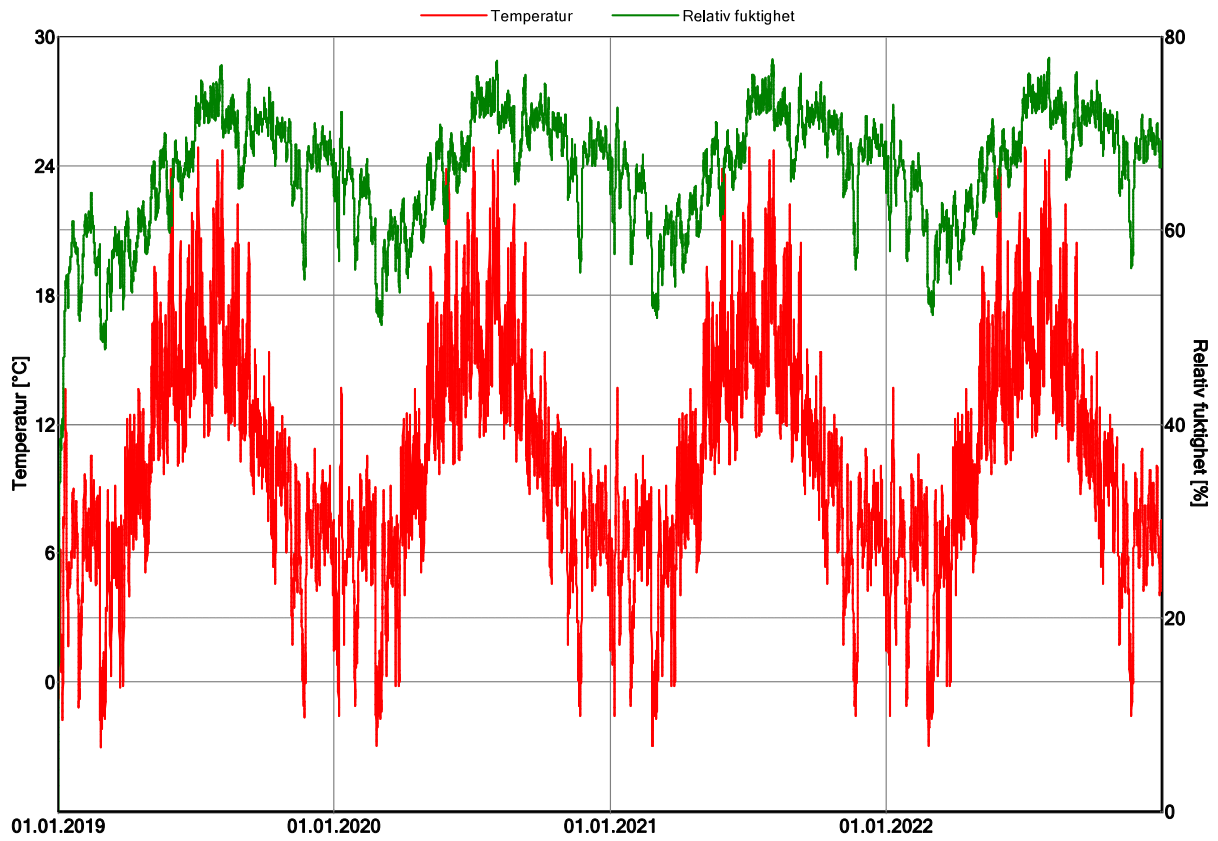
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,051086 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

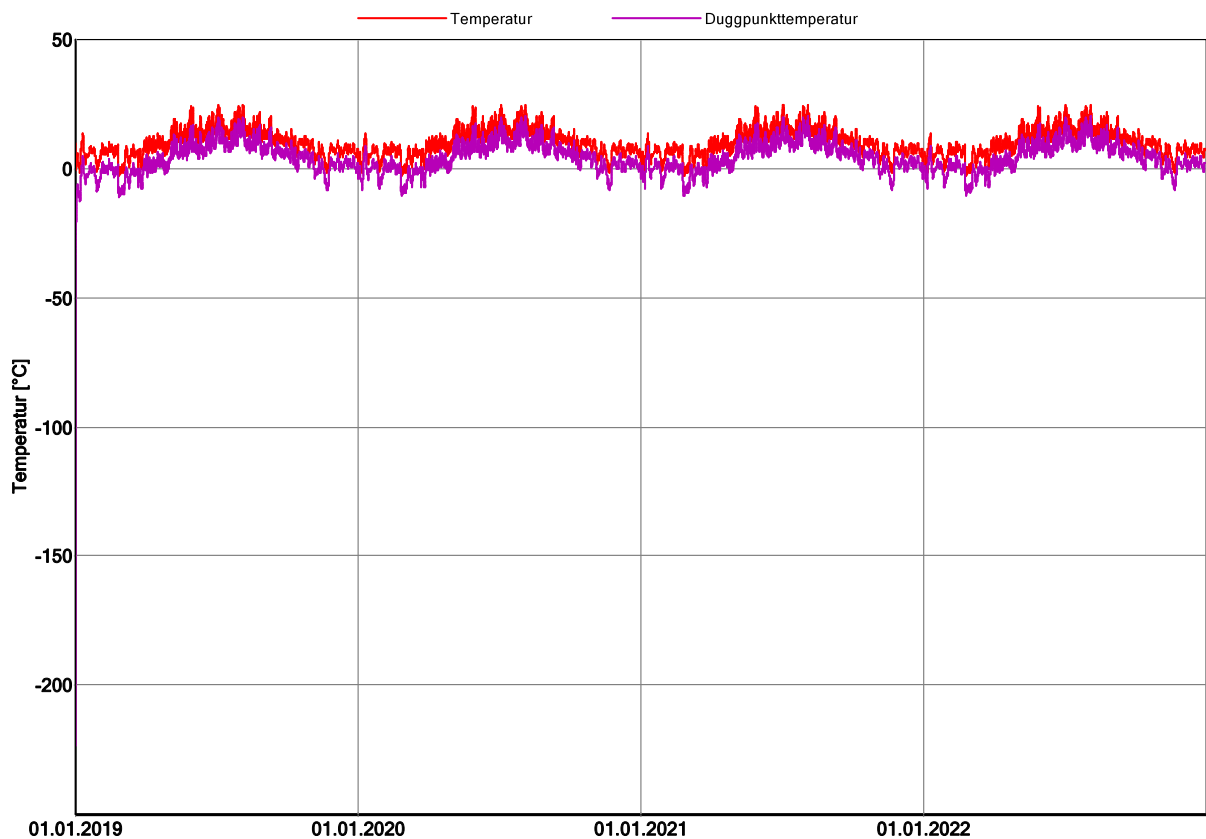
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,000914 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

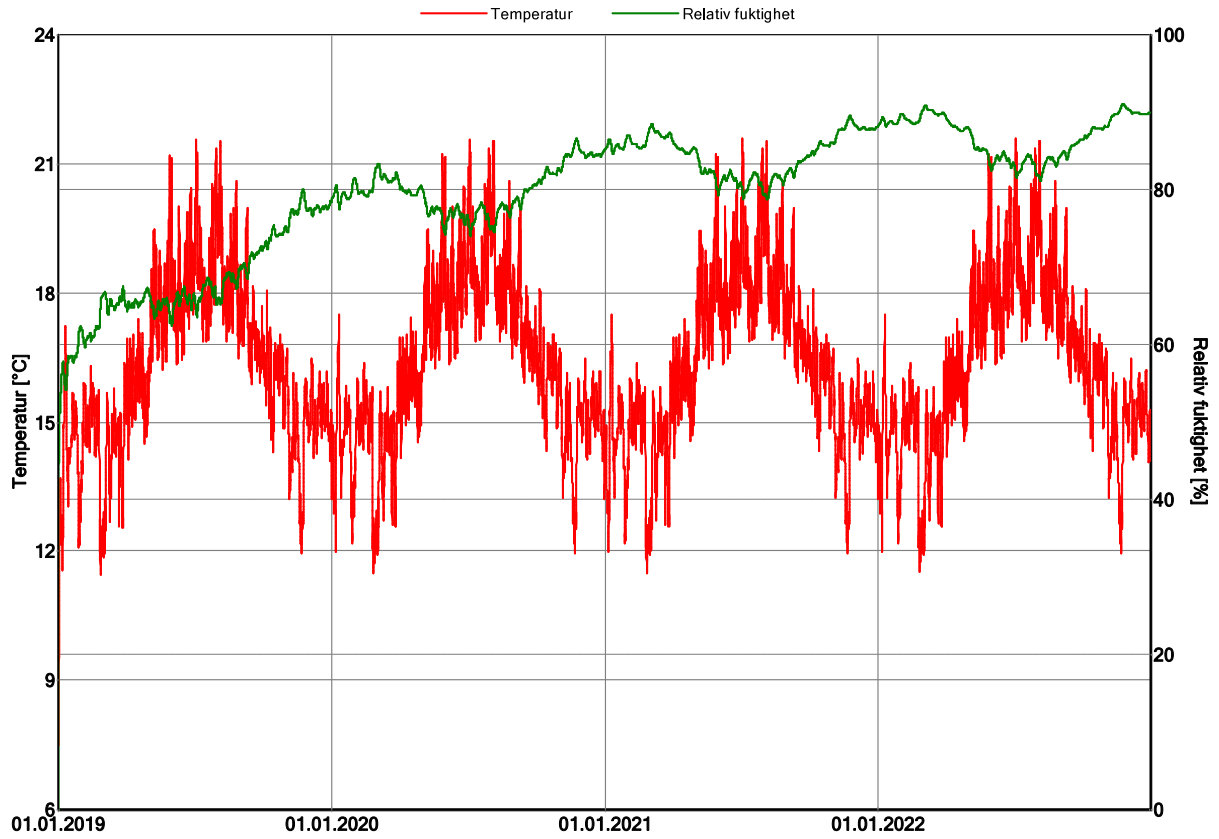
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,000914 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

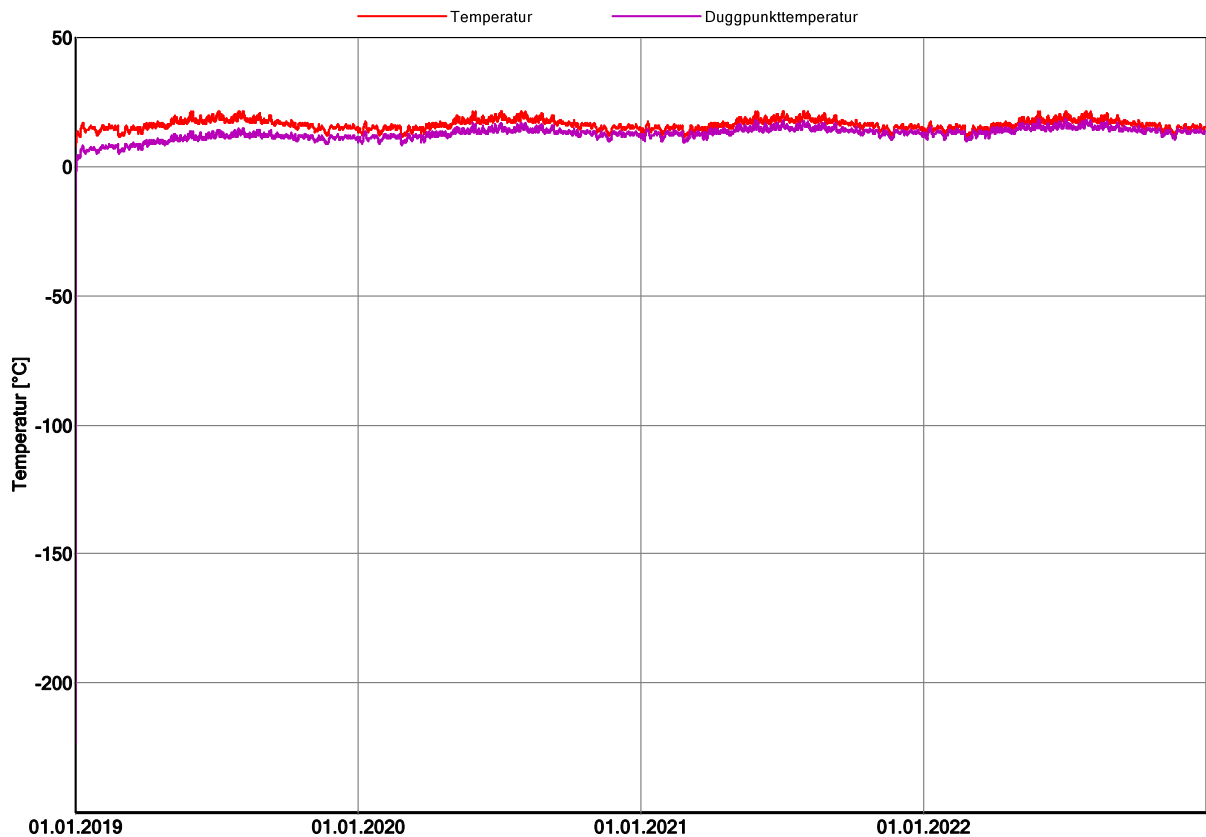
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,019086 m)



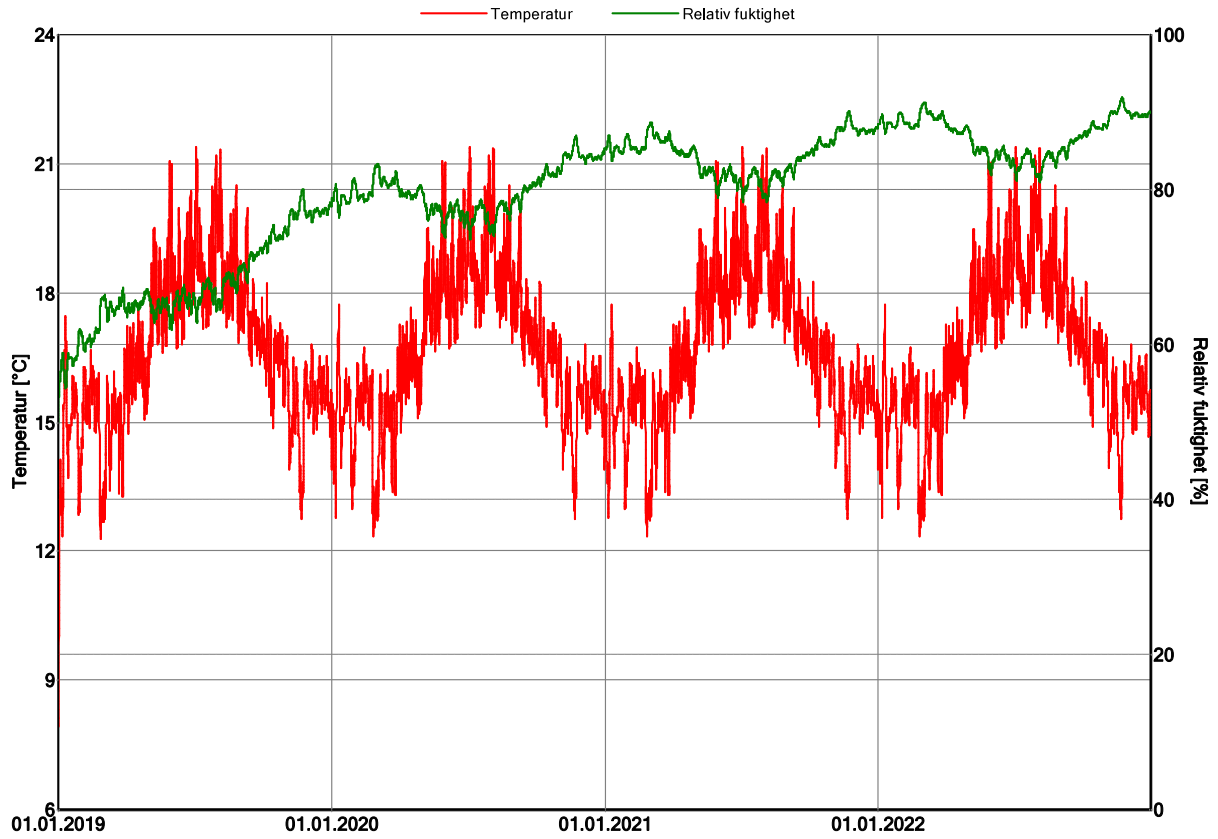
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,019086 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial

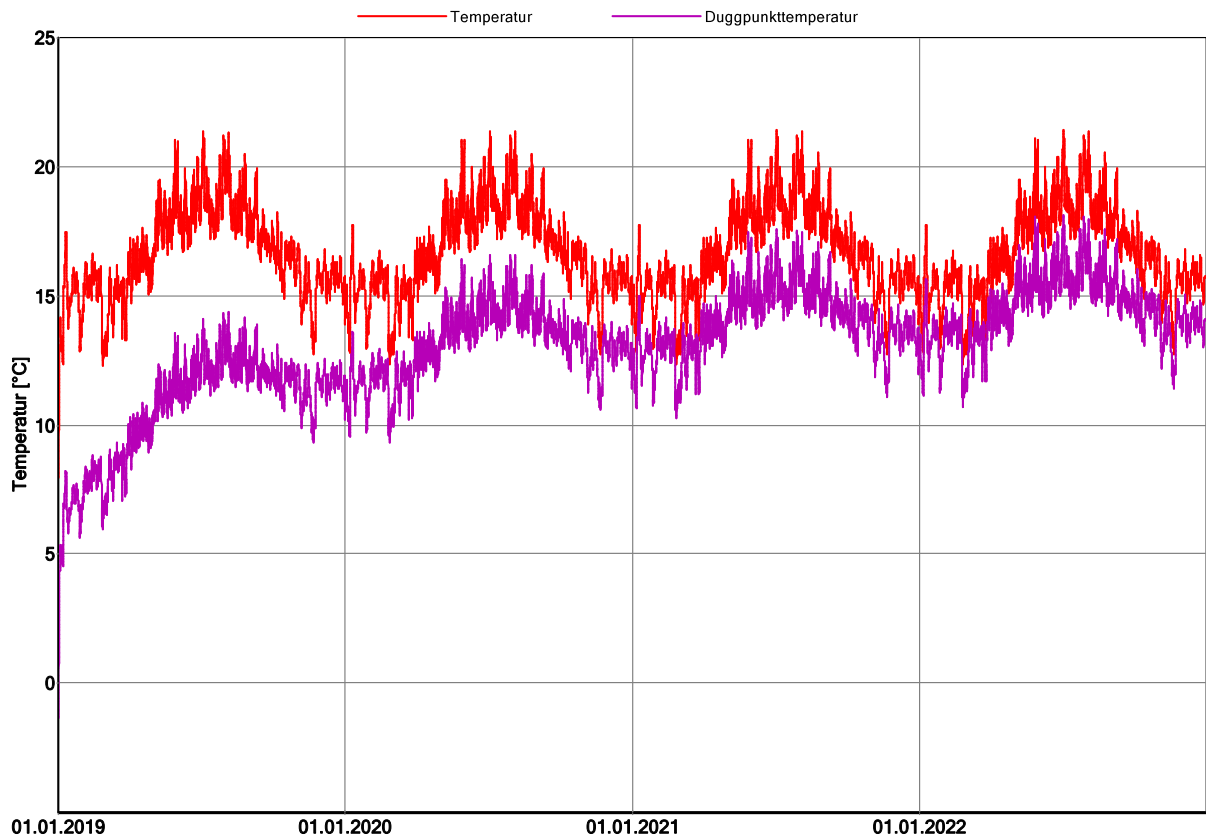
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,000914 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

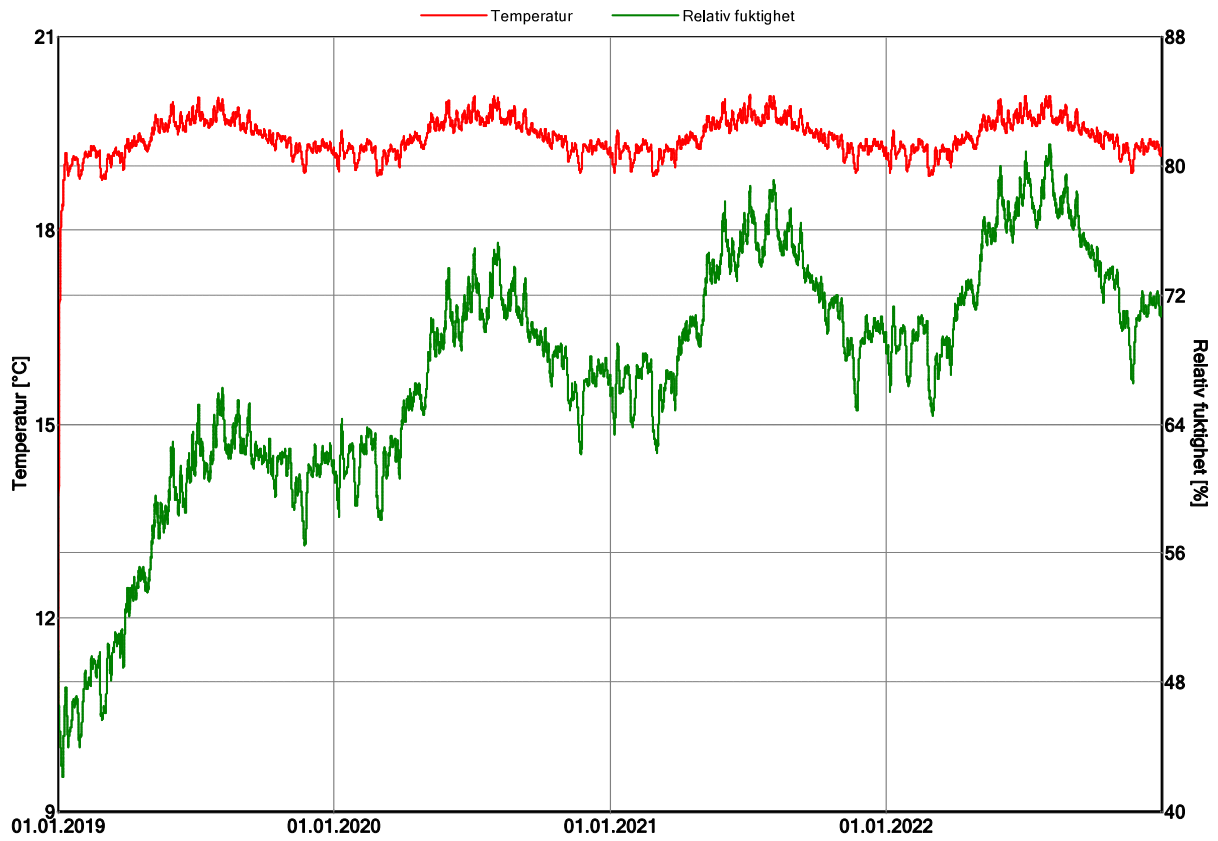
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,000914 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

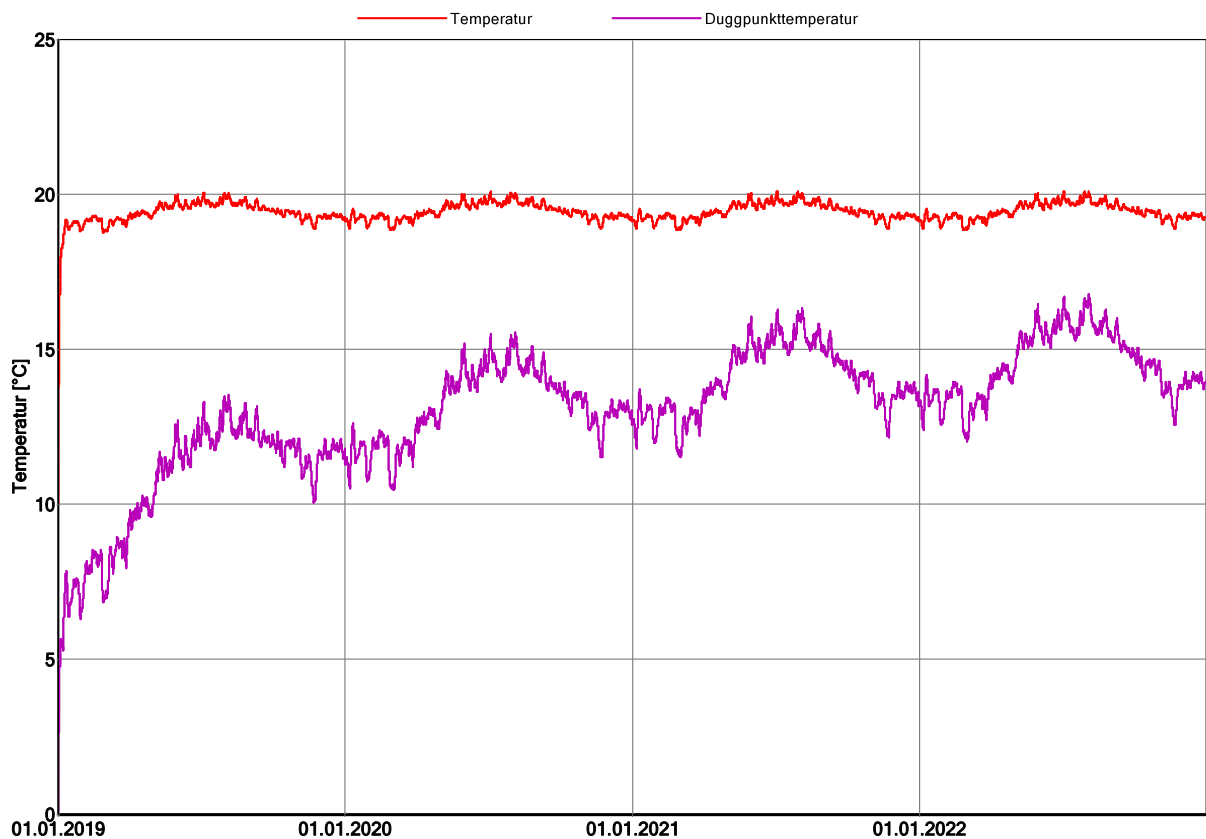
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049818 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049818 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 3: #3 VIP terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



## 6 Terrassekonstruksjon med VIP uten betongdekke, mer byggfukt

## Prosjektdata

Prosjektnavn Superisolasjon, bacheloroppgave

Prosjektnummer

Oppdragsgiver NTNU og Rambøll

Kontaktperson Frida Ulla og Ingrid Astrup

Postnr/Sted

Adresse

Tel.

Faks

E-post

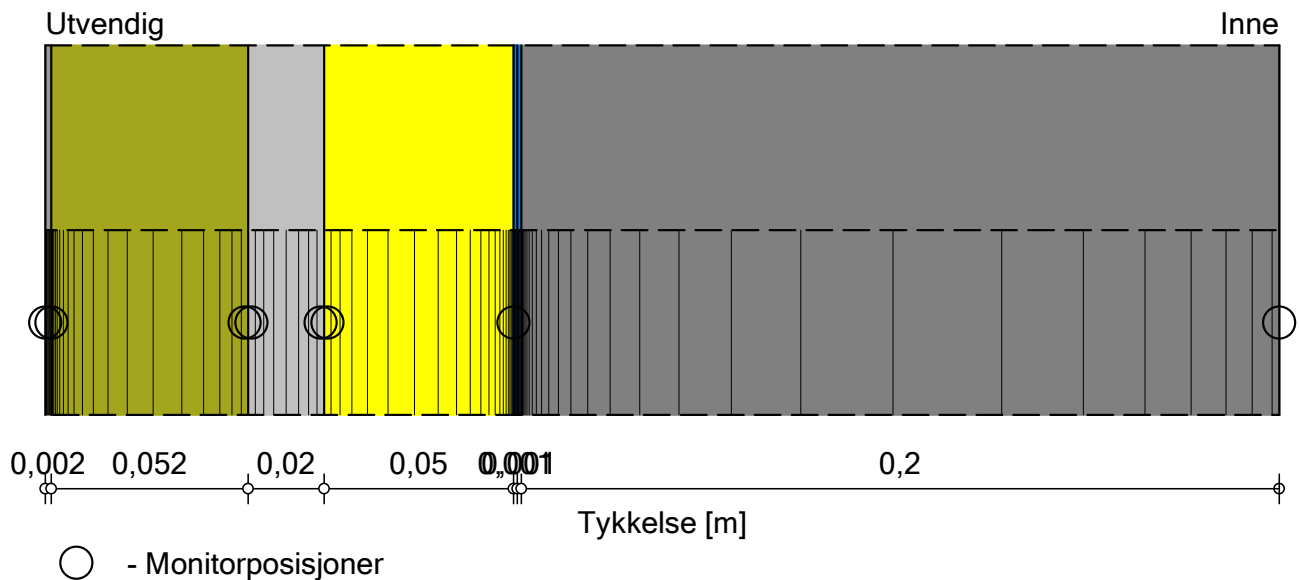
Ansvarlig Frida Ulla og Ingrid Astrup

Kommentarer Analyse av bygningsdeler med VIP eller aerogel.





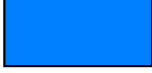
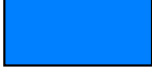

Dato 25.03.2019

## Konstruksjonsoppbygging

Variant: #4 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt



### Materialer:

	- PVC membrane	0,002 m
	- ROCKWOOL TOPROCK DD	0,052 m
	- VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,02 m
	- EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- Betong B45	0,2 m

Samlet tykkelse: 0,326 m

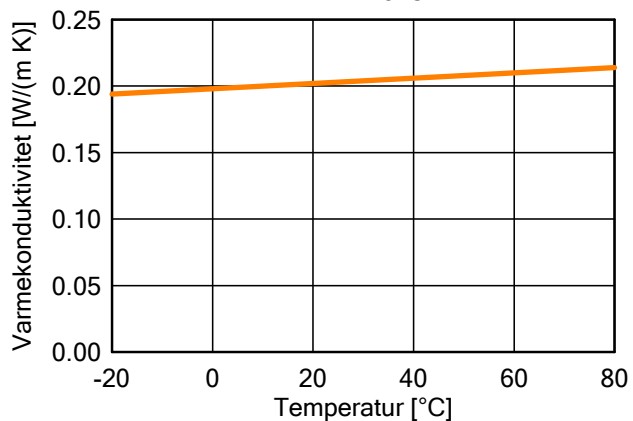
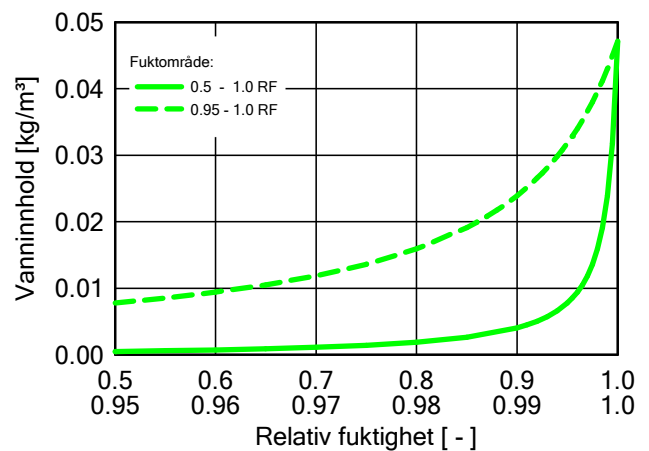
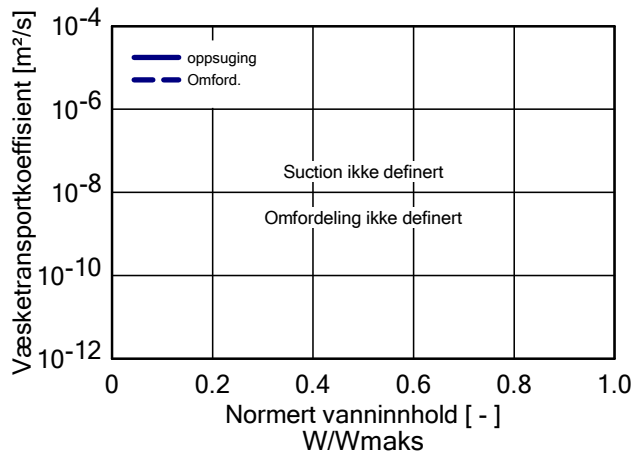
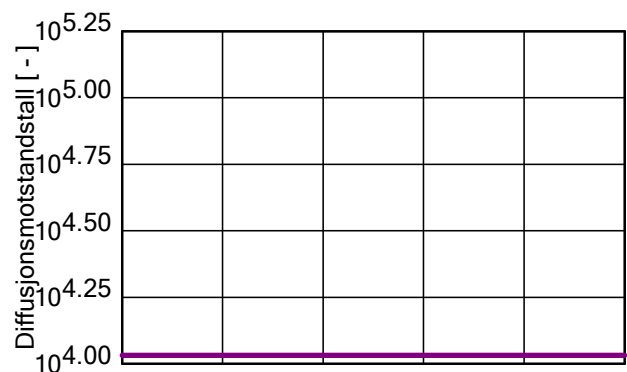
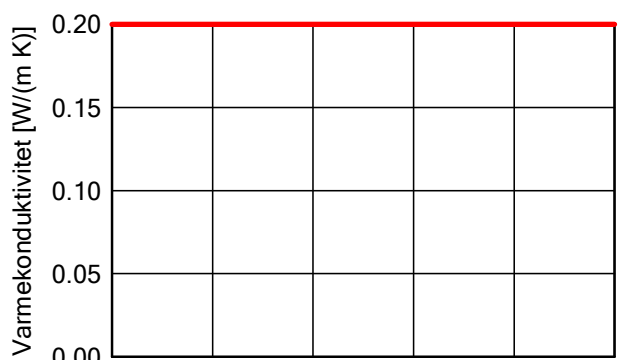
Varmemotstand: 5,66 (m<sup>2</sup> K)/W

U-verdi: 0,171 W/(m<sup>2</sup> K)

# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: PVC membrane

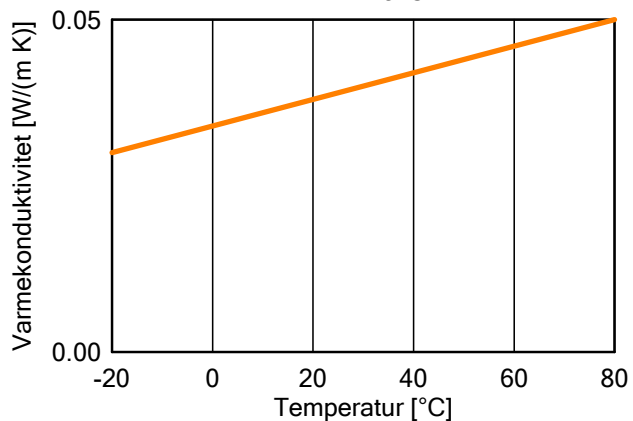
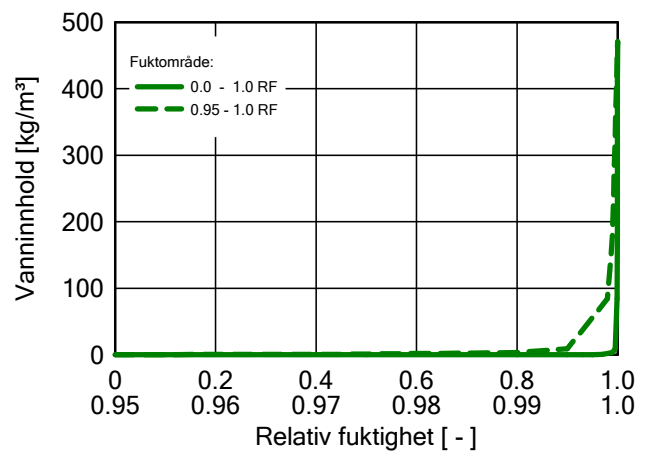
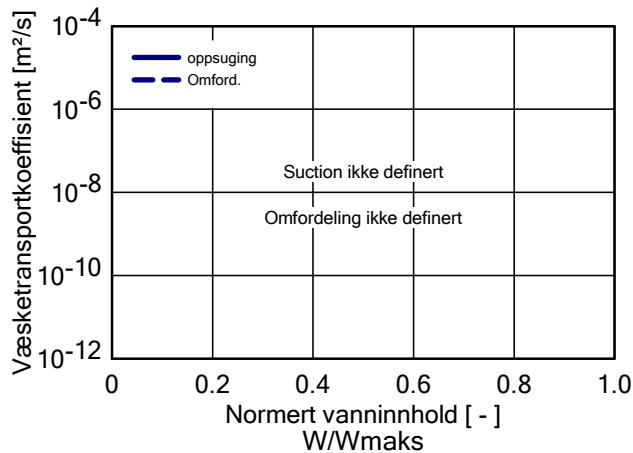
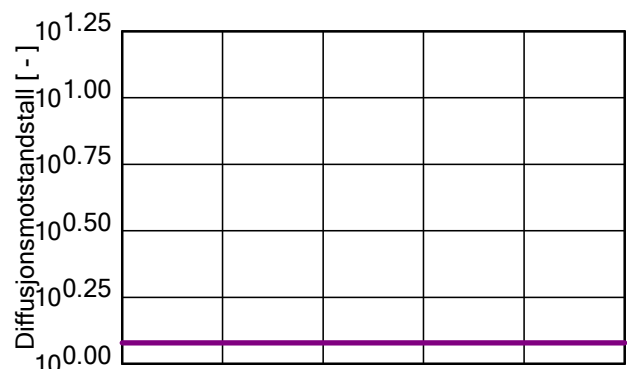
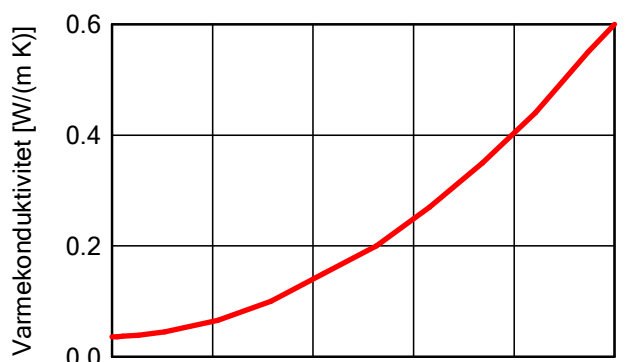
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	10761
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL TOPROCK DD

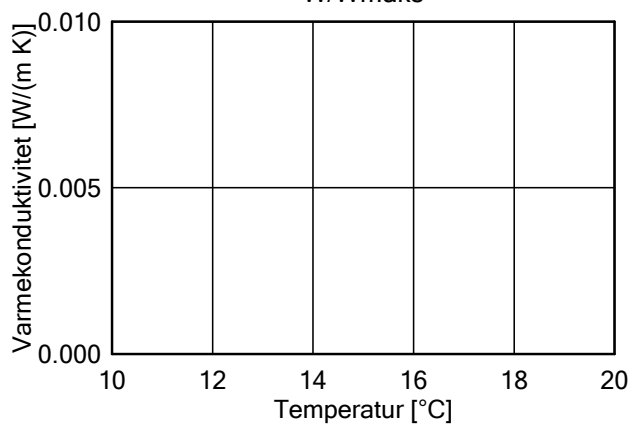
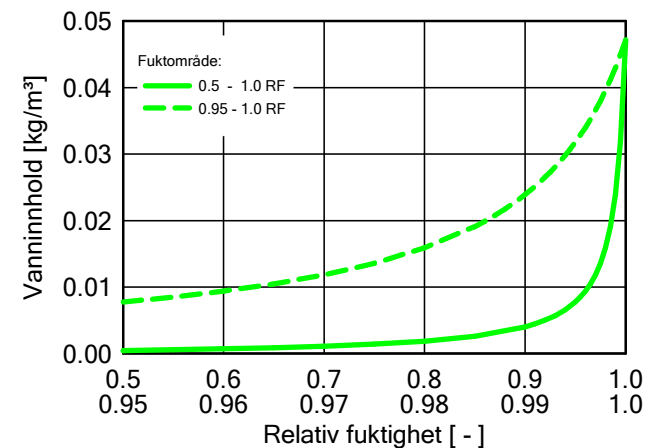
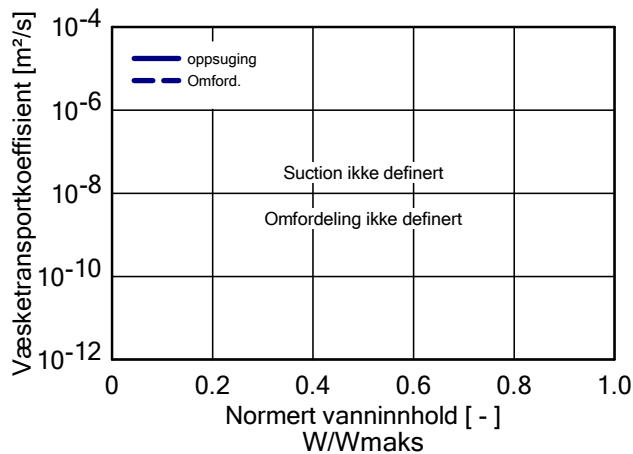
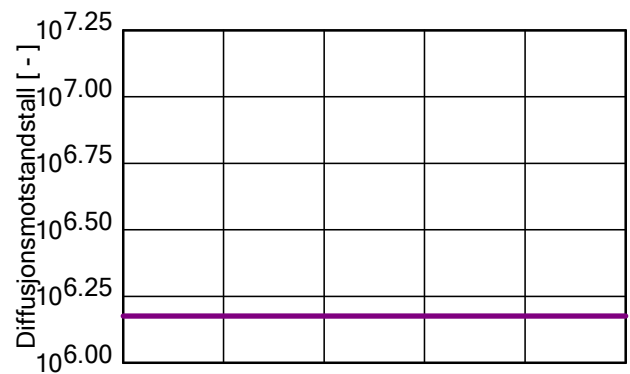
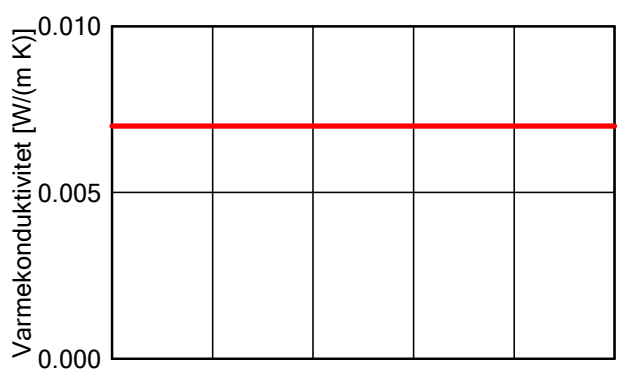
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	176
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	1.2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K)

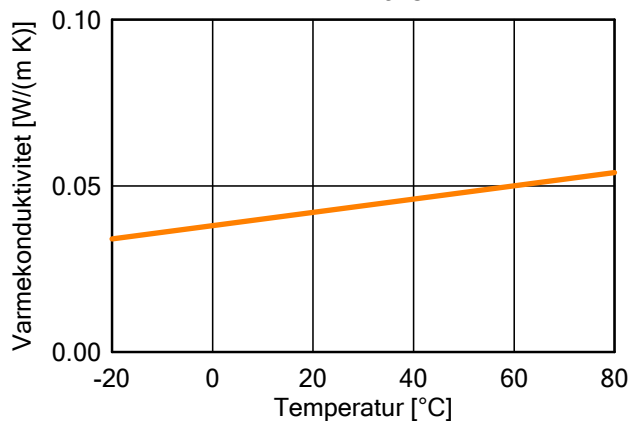
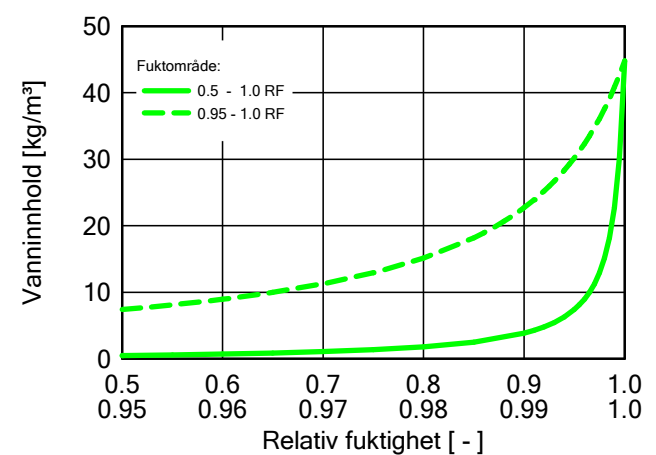
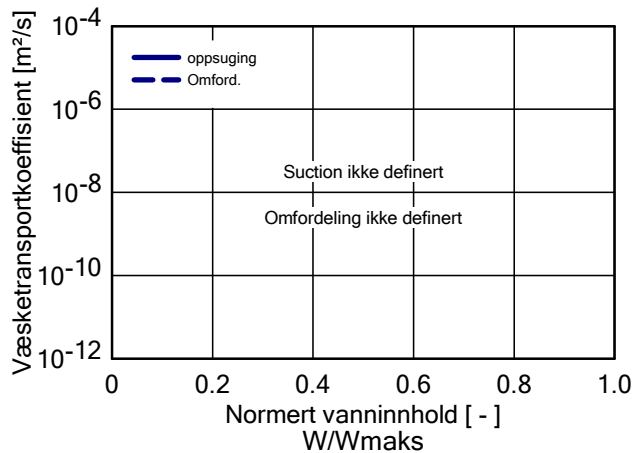
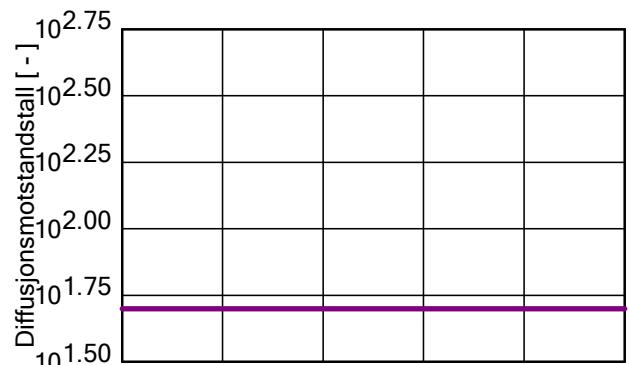
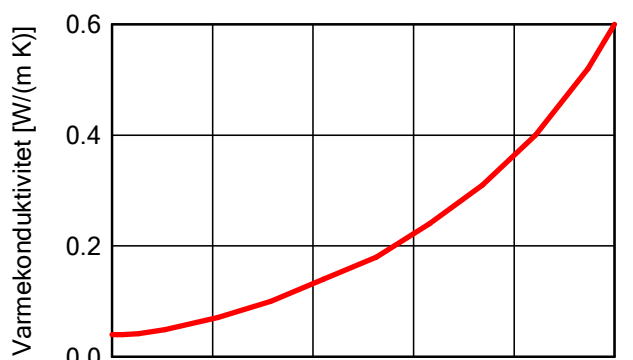
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	200
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	800
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.007
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	1500000



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>)

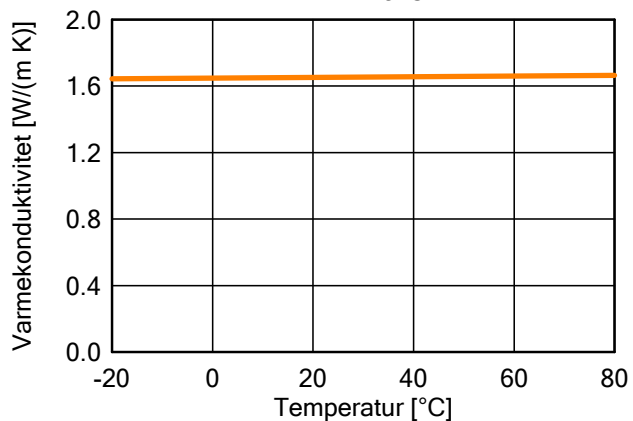
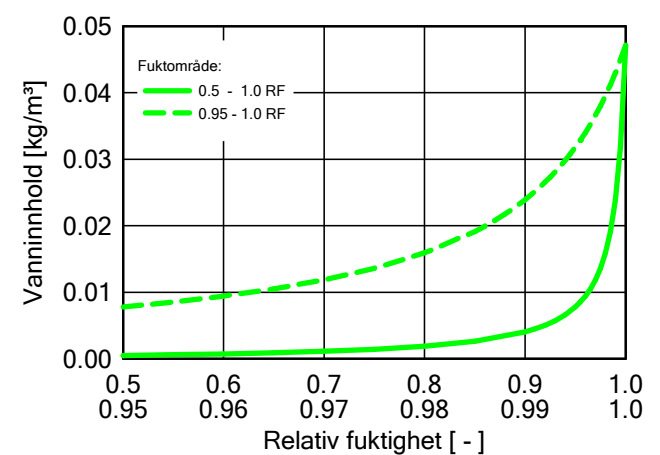
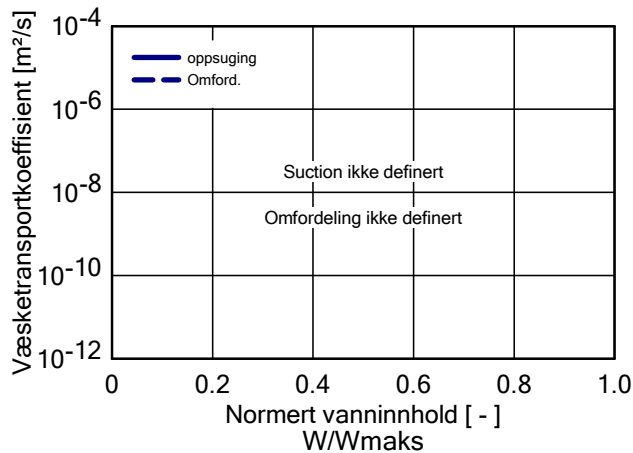
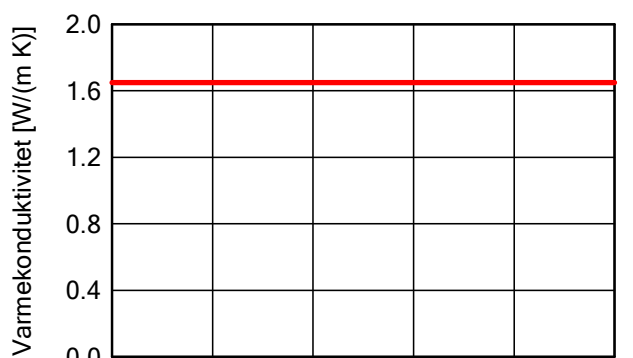
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	30
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	50
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002

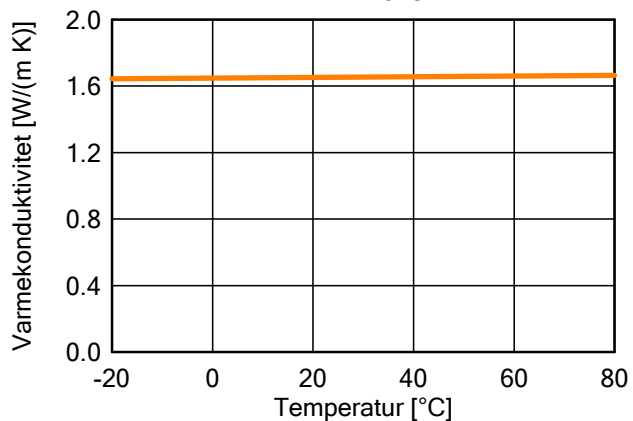
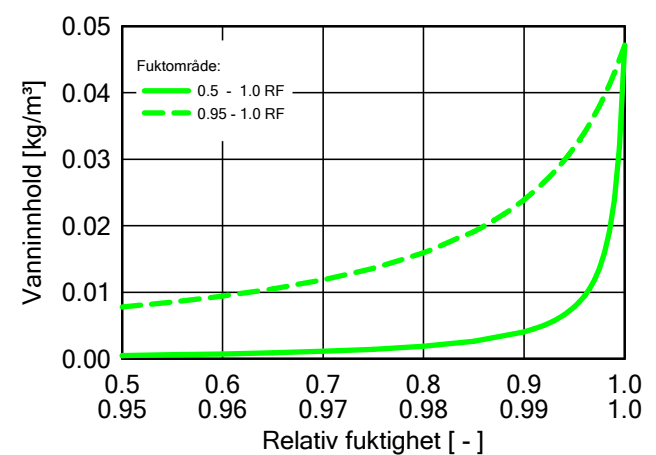
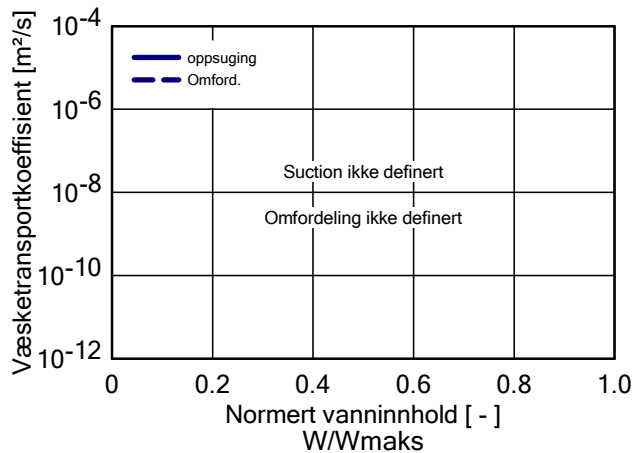
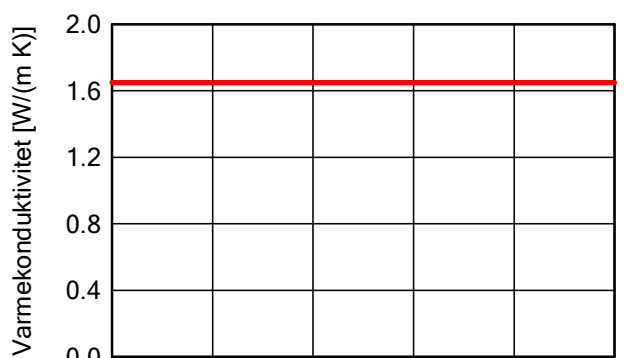




# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

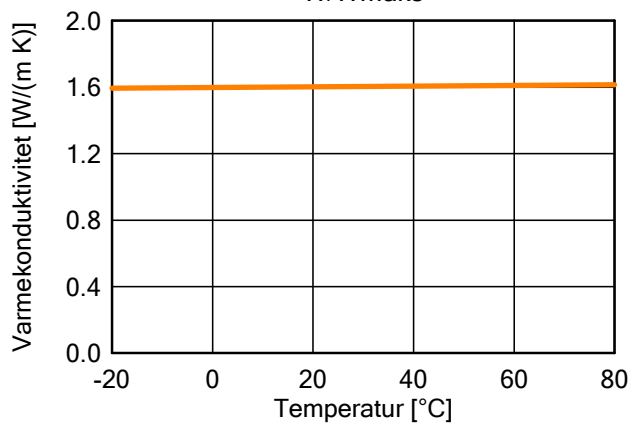
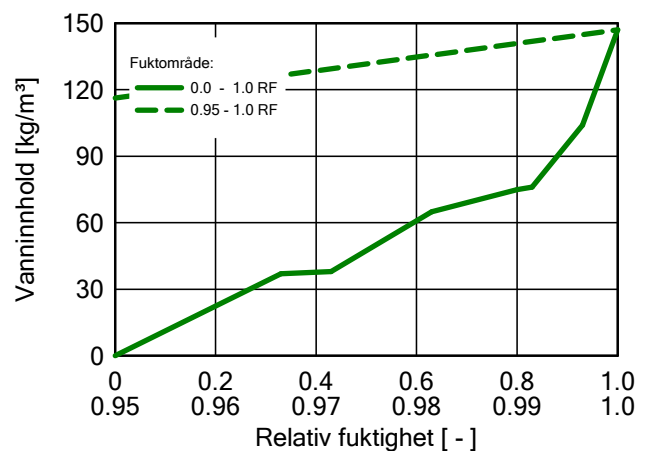
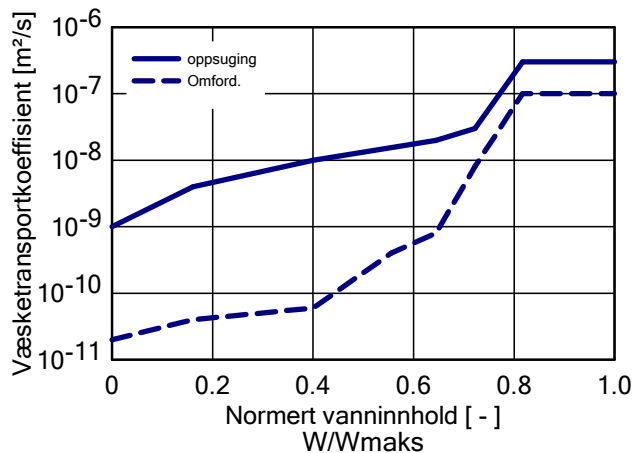
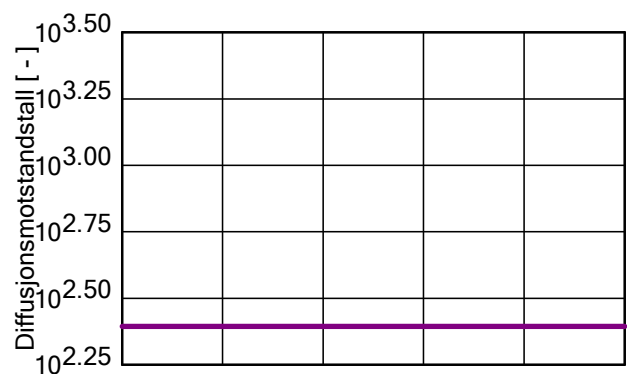
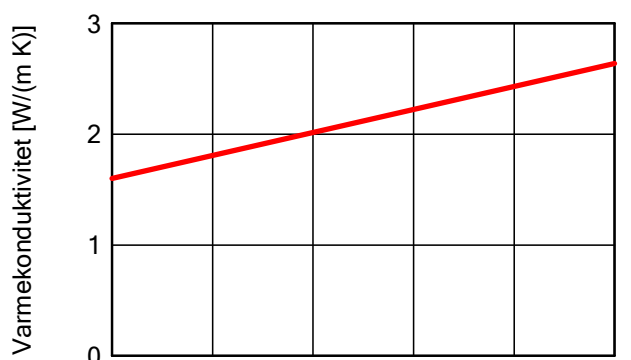
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## Randvilkår

### Ute (venstre side)

Sted for klima: Trondheim; NBI / NTNU  
 Temperaturforskyvning: 0.0 °C  
 Orientering / Helning: Vest / 0 °  
 Avkjøling ved stråling om natten: nei

### Inne (høyre side)

Inneklima: EN 13788  
 Fuktklasse 3; Temperatur: 20 °C

## Overflaters overgangskoeffisient

### Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Lys	[-]	0.2
Langbølget strålingsemissivitet	Lys	[-]	0.9
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1,0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

### Inne (høyre side)

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

## Resultater fra siste beregning

## Status for beregning

Dato/tid for beregning	03.05.2019 08:52:10
Regnetid	1 min,31 sek.
Begynn / Avslutt beregning	01.01.2019 / 01.01.2023
Antall konvergensfeil	0

## Numerisk kvalitetssjekk

Samlet fukttransport, utv. (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 0,0
Samlet fukttransport, innv. (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	9,4 2,39
Balanse 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,79
Balanse 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,79

Vanninnhold [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	Slutt	Min.	Maks.
Totalt vanninnhold	28,05	16,11	16,09	28,06

Vanninnhold [kg/m<sup>3</sup>]

Sjikt/Materiale	Start	Slutt	Min.	Maks.
PVC membrane	0,00	0,00	0,00	0,01
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,01	0,06	0,01	0,07
VIP generic (0,007 W/m <sup>2</sup> K)	0,00	0,00	0,00	0,00
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK)	1,06	2,29	1,06	2,29
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,00
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Betong B45	140,00	79,98	79,87	140,03

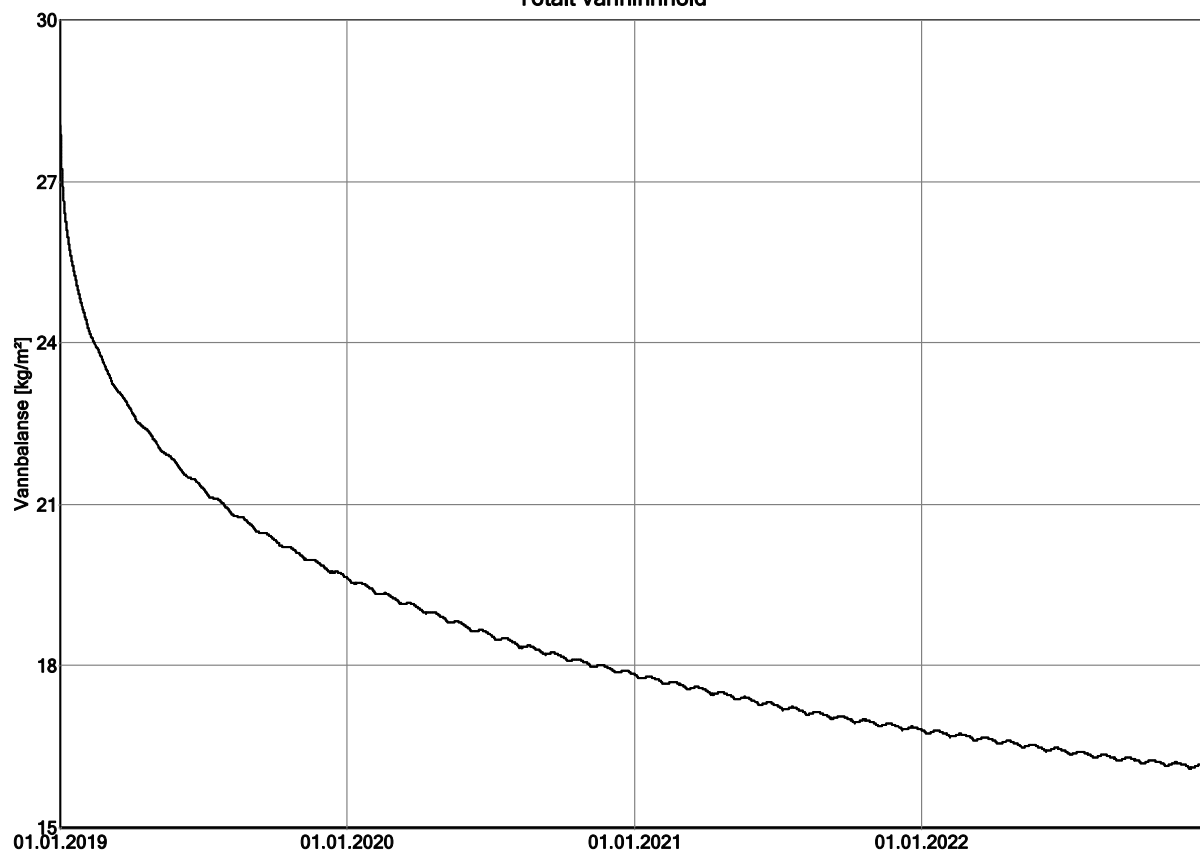
## Tidsintegralet av strømingstetthetene

Varmestrømstetthet, venstre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-2033,93
Varmestrømstetthet, høyre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-334,26
Fuktstrømmer, venstre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktstrømmer, høyre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	11,94

## Hygrotermiske kilder

Varmekilder	[MJ/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
Begrensete fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0

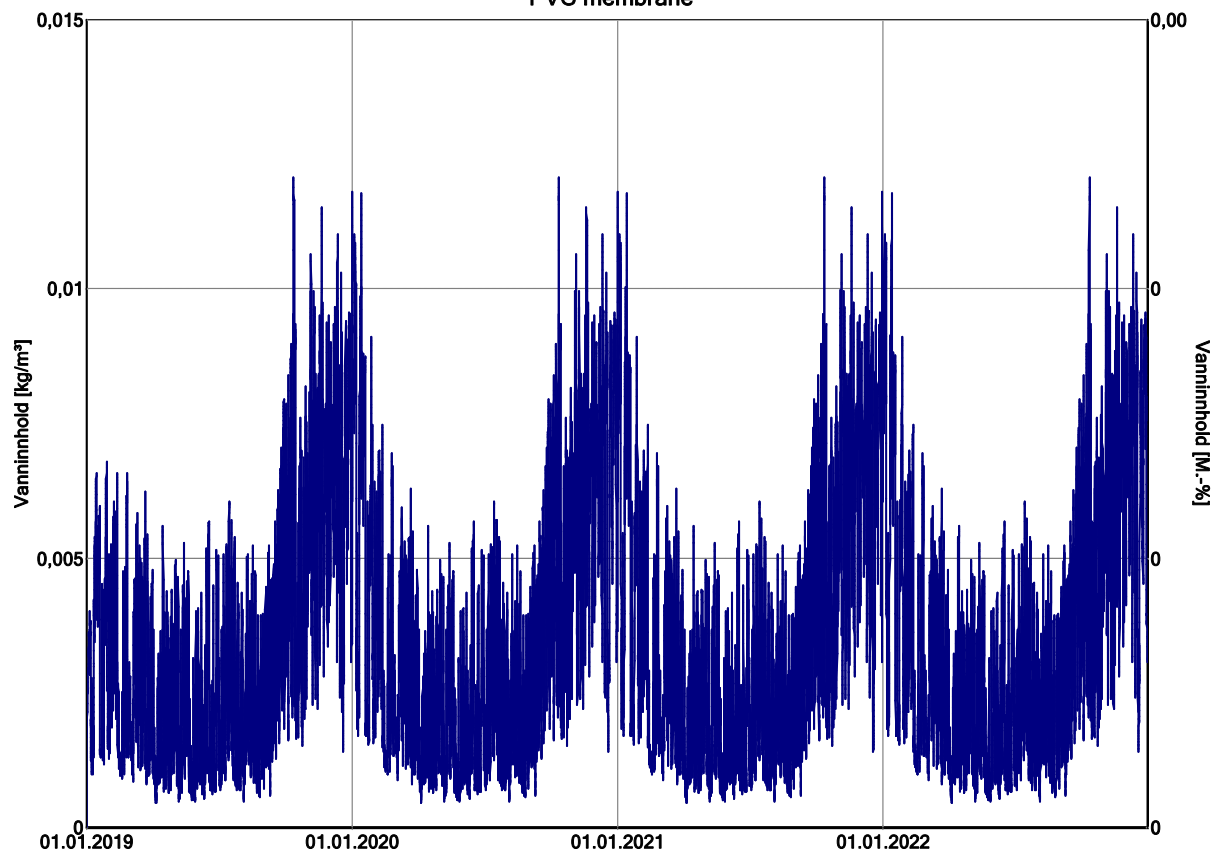
### Totalt vanninnhold



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

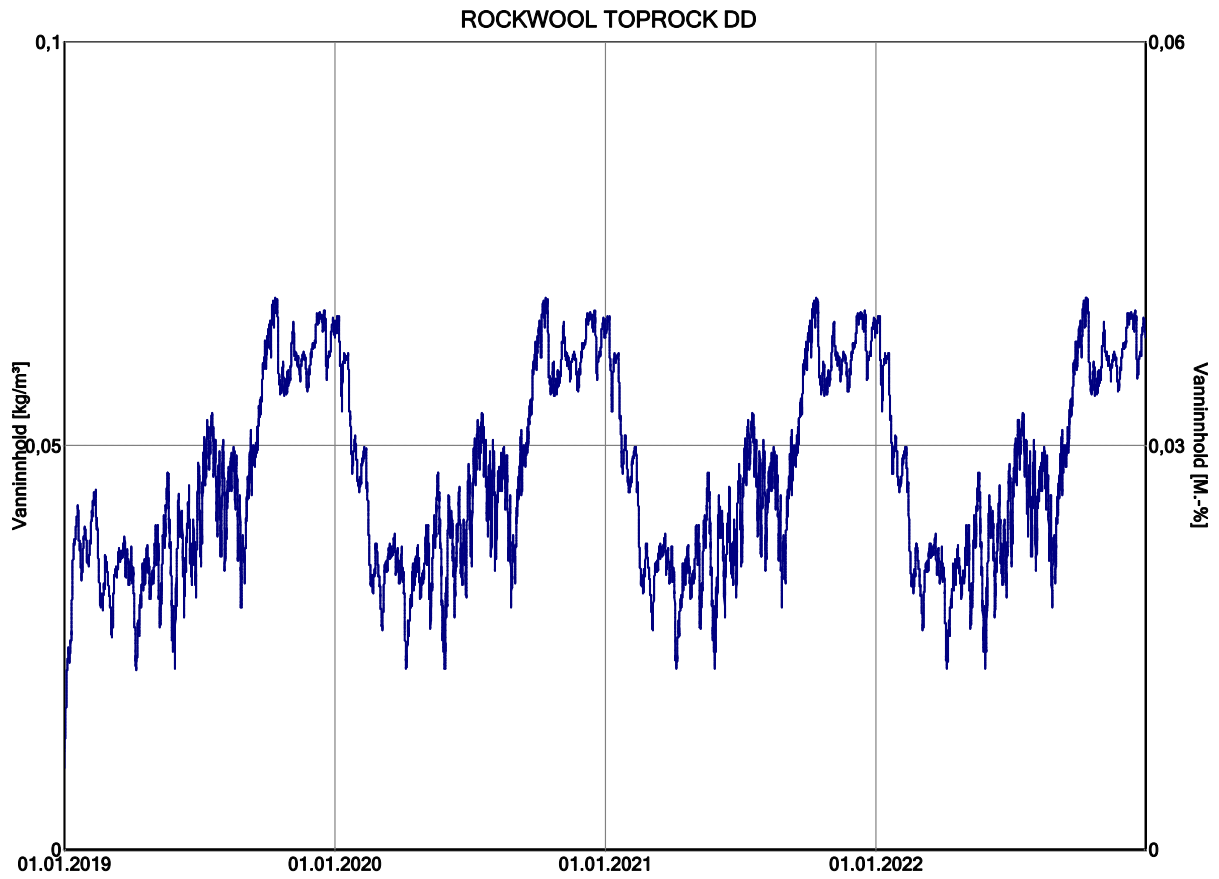
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### PVC membrane



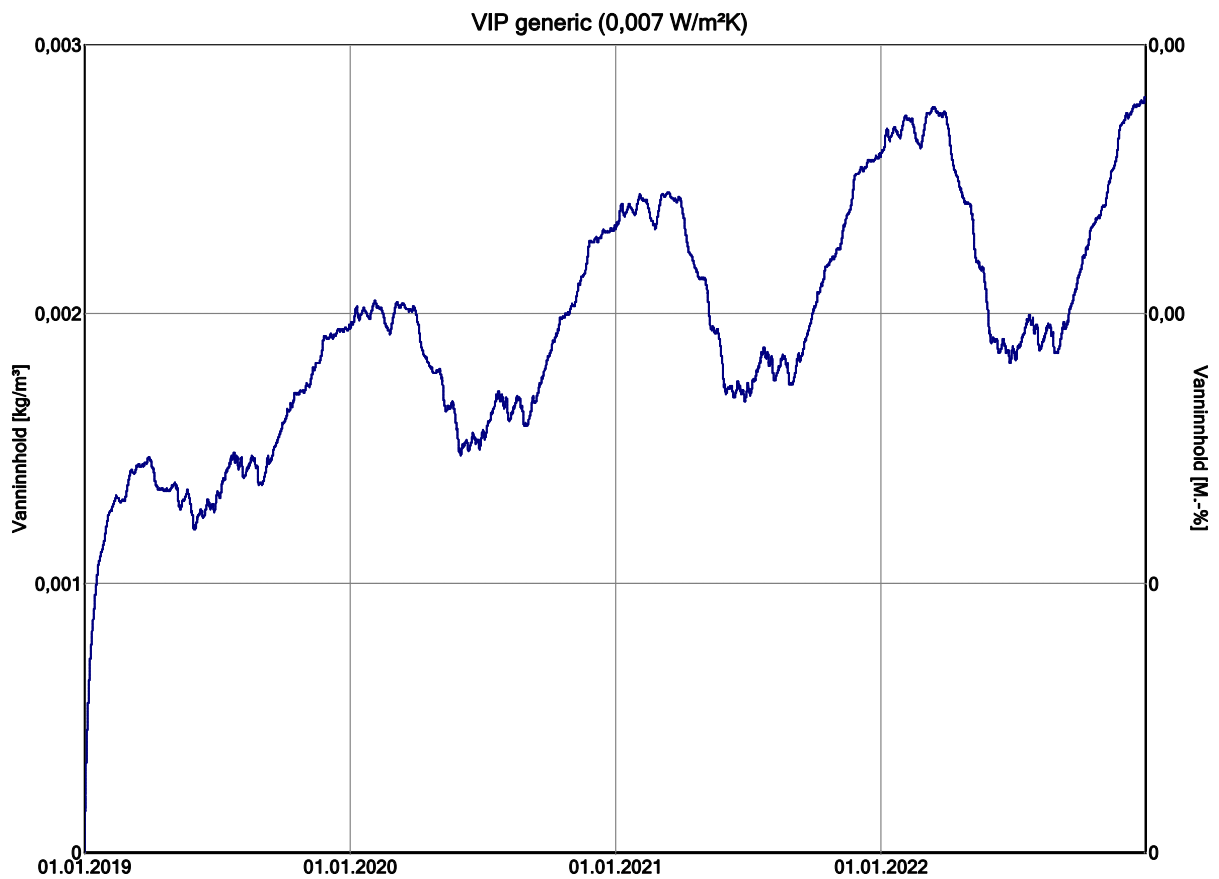
WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

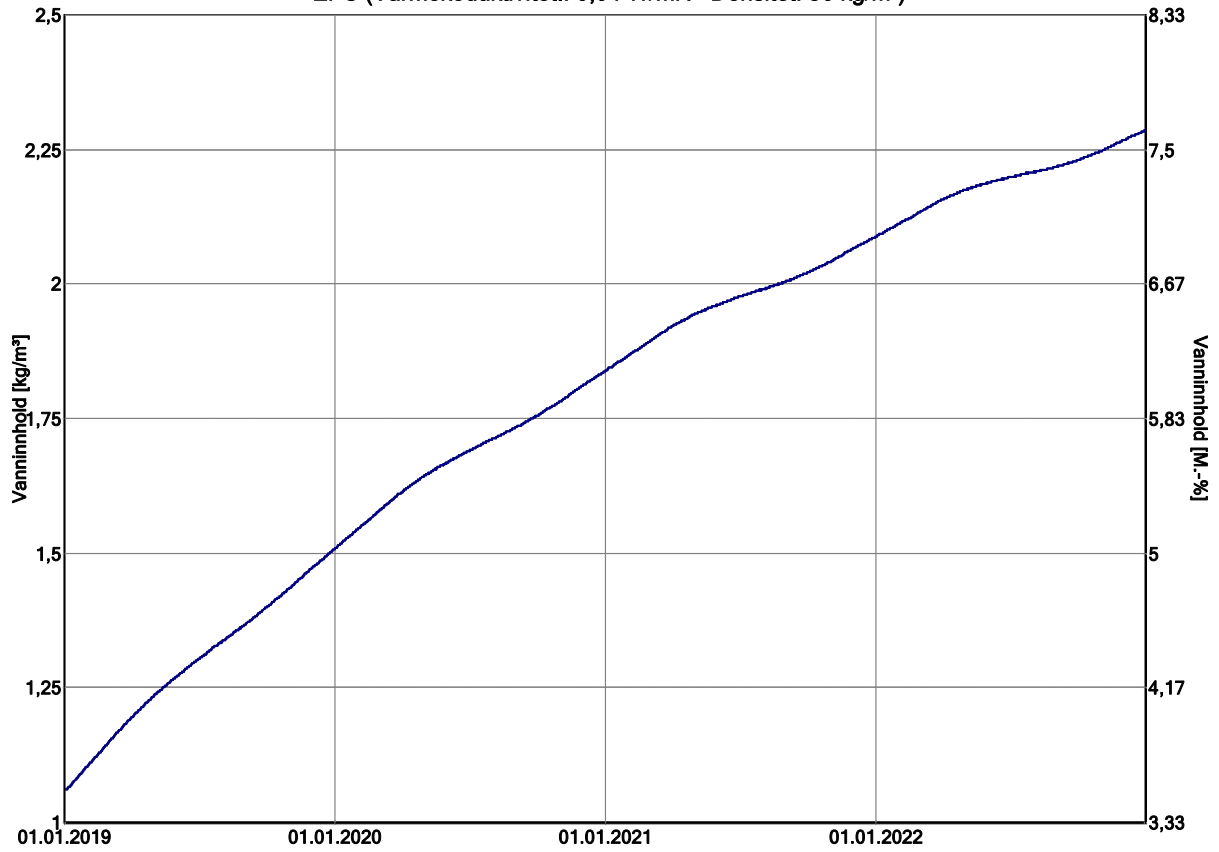
WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

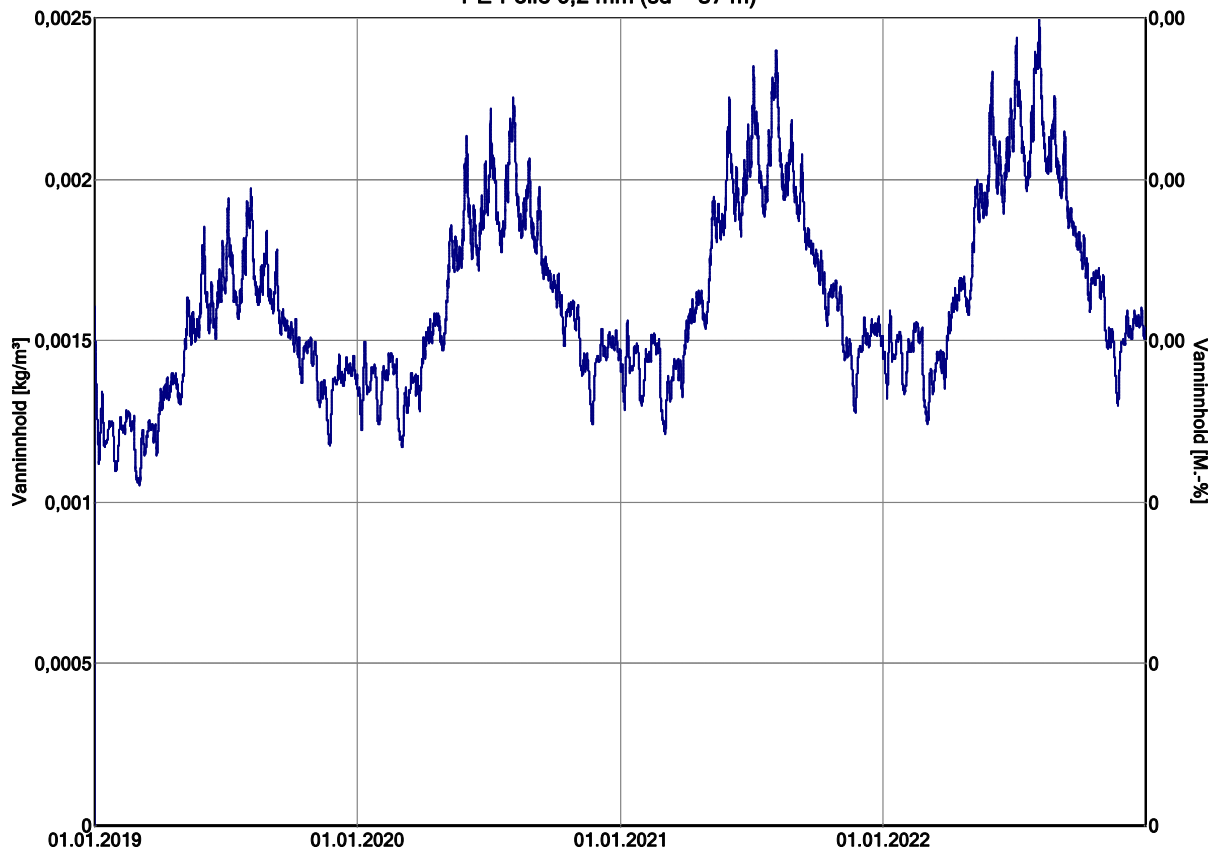
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019,w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03,05,2019

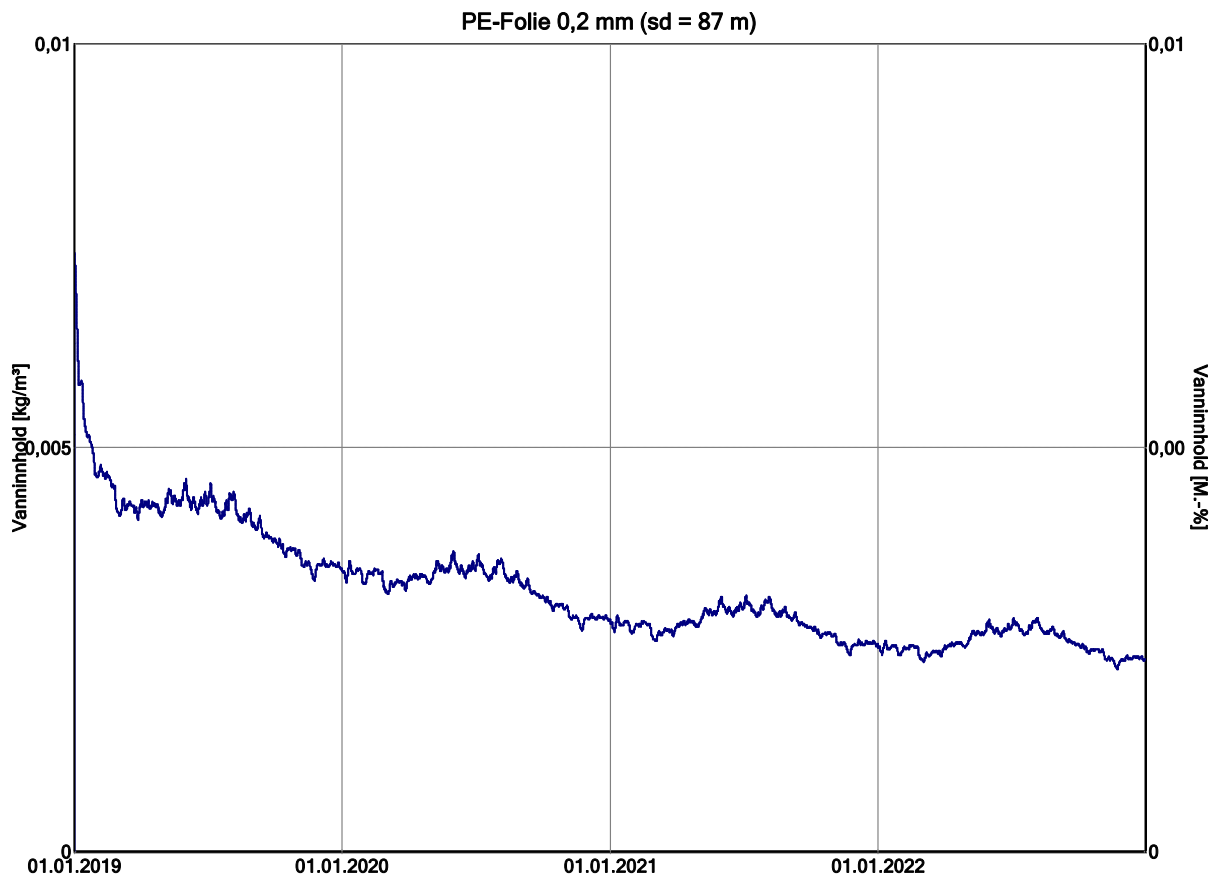
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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



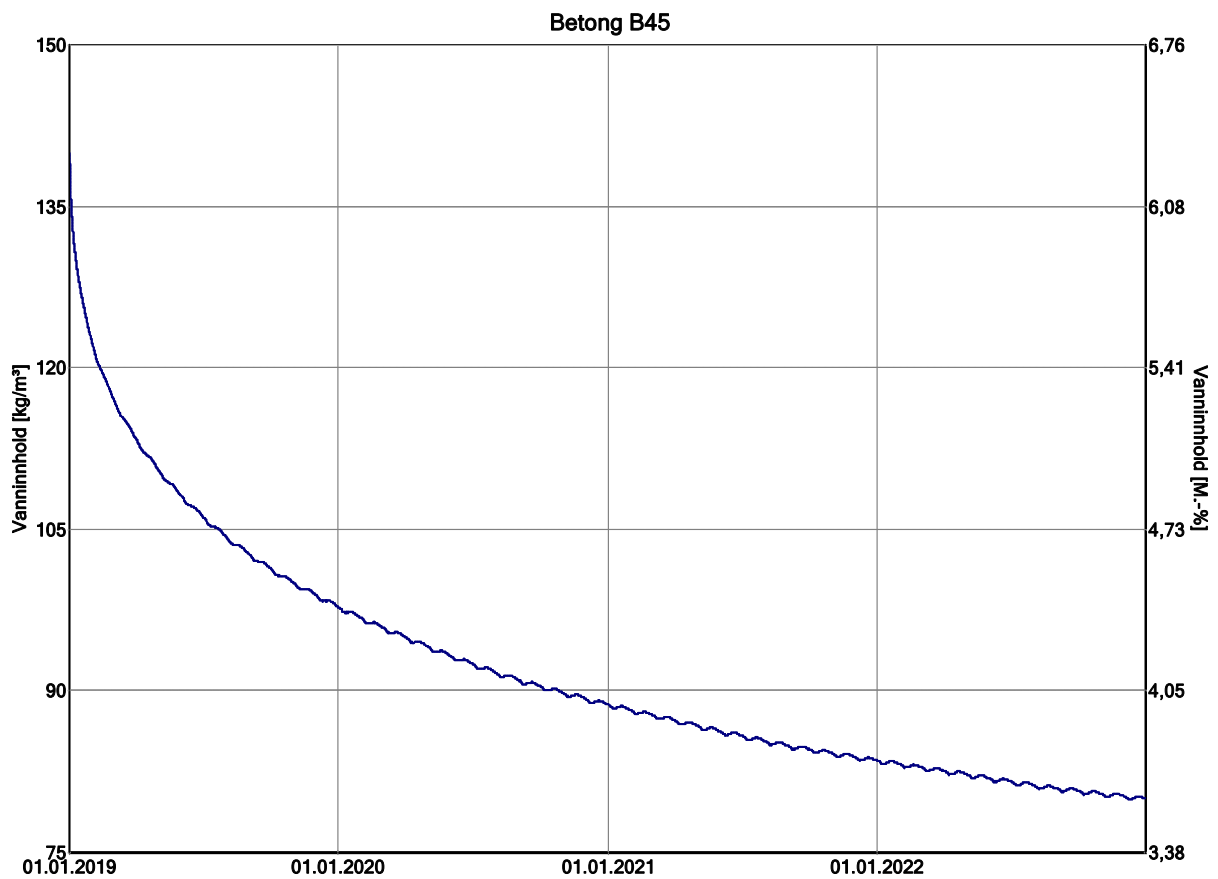
WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1,05,2019,w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03,05,2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

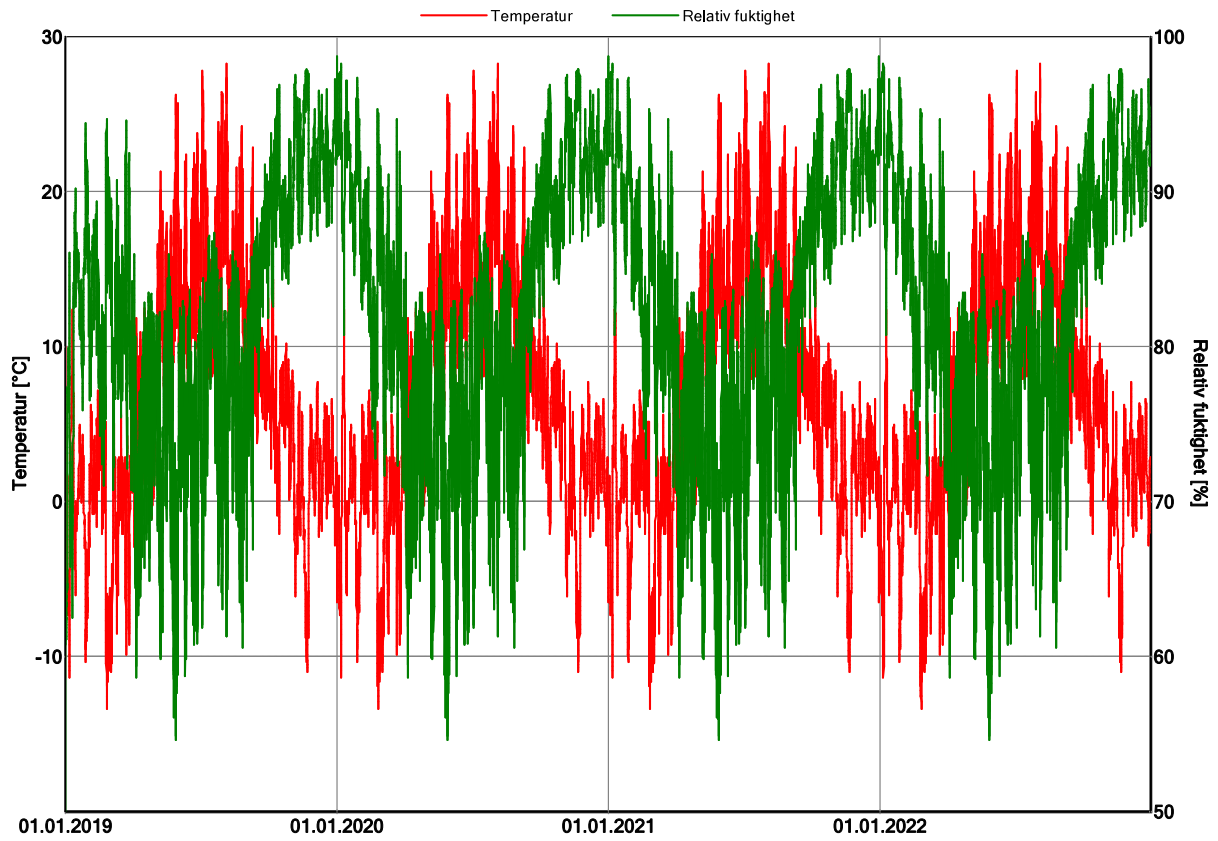


WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



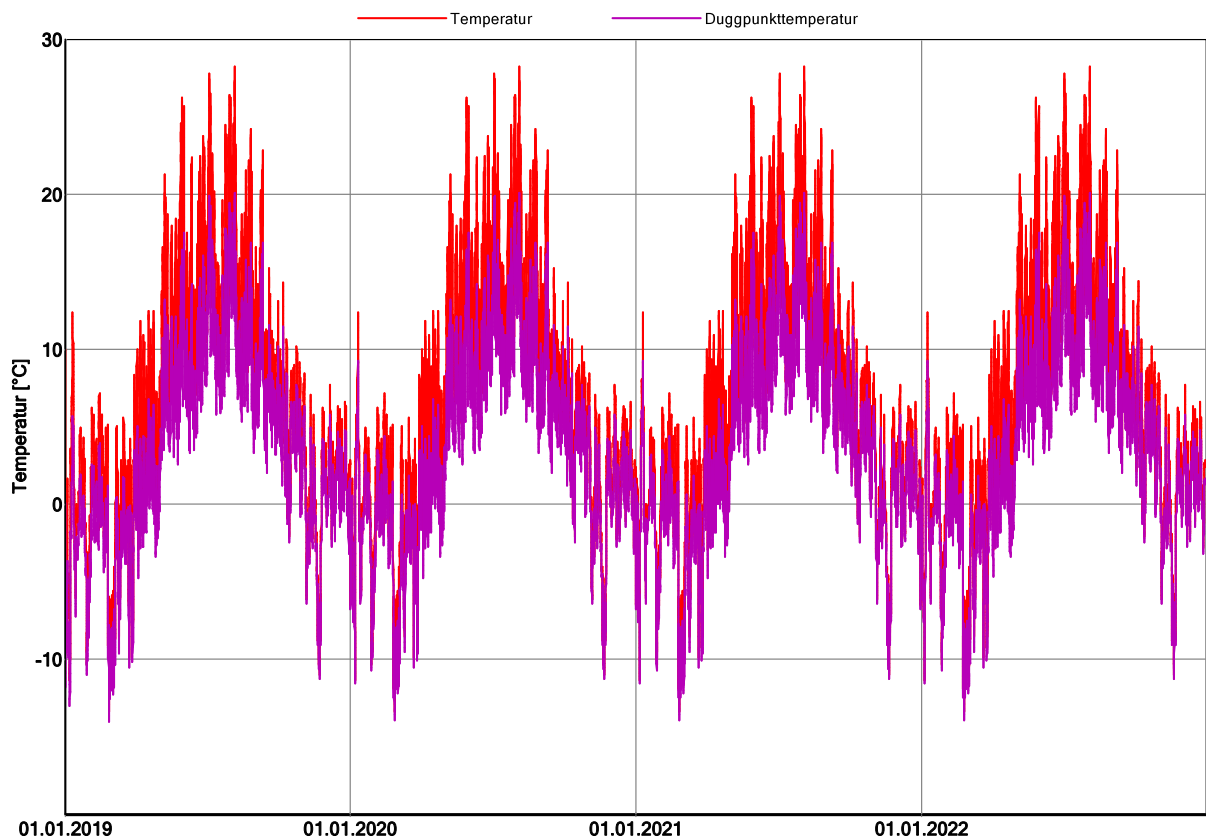
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000083 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggtukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

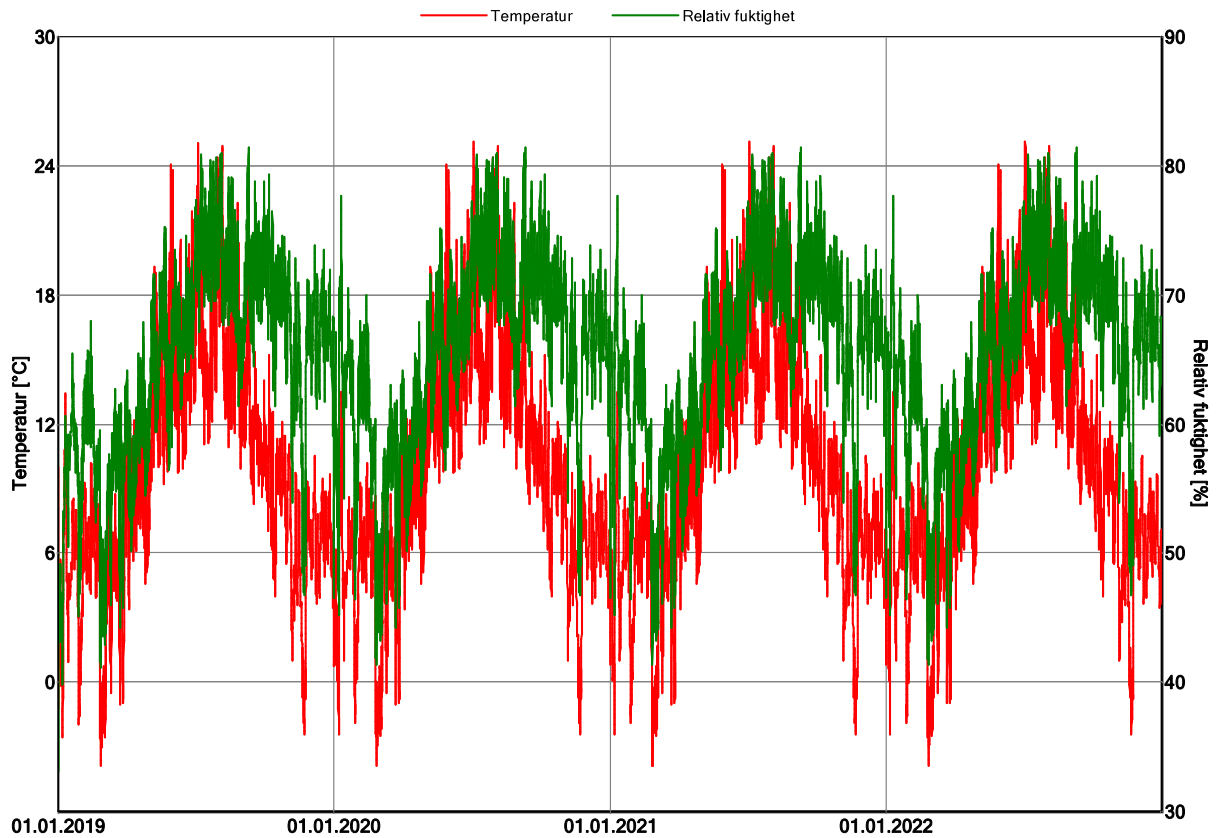
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000083 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggtukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

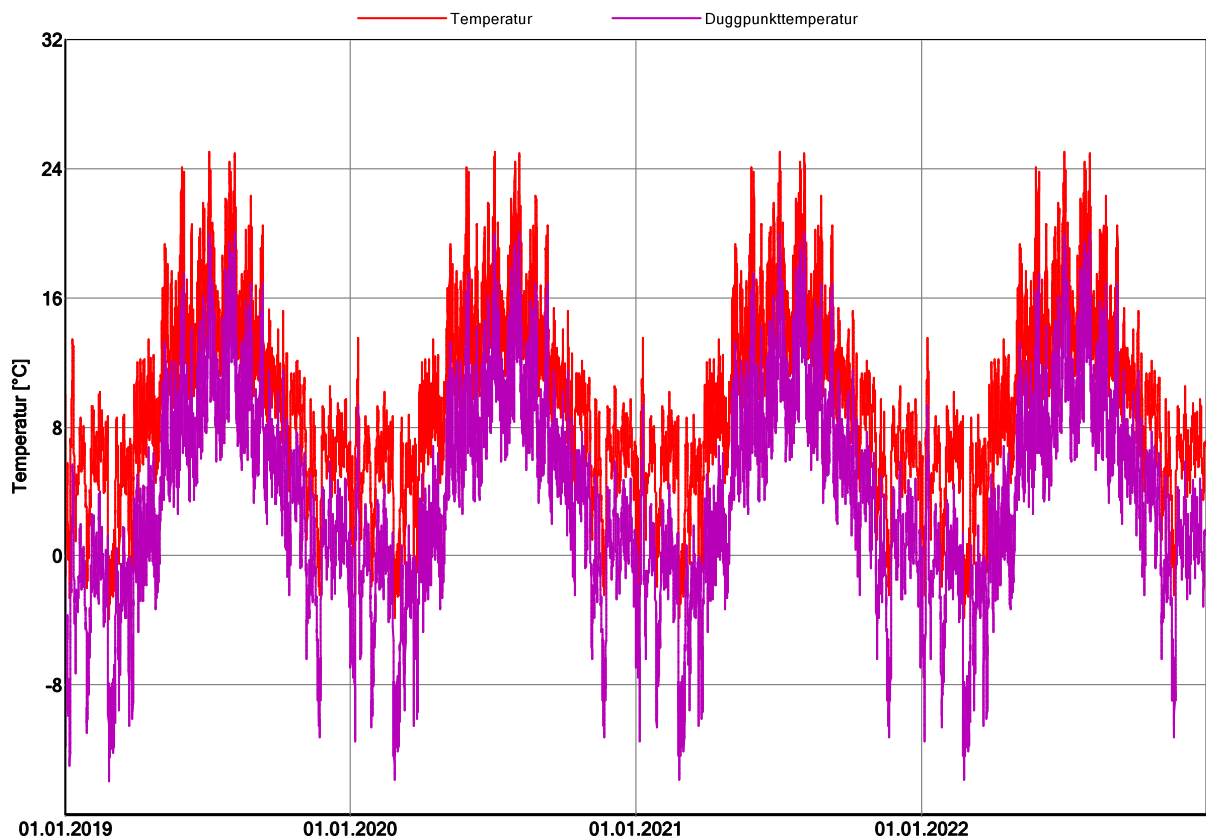
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,051086 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggtukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

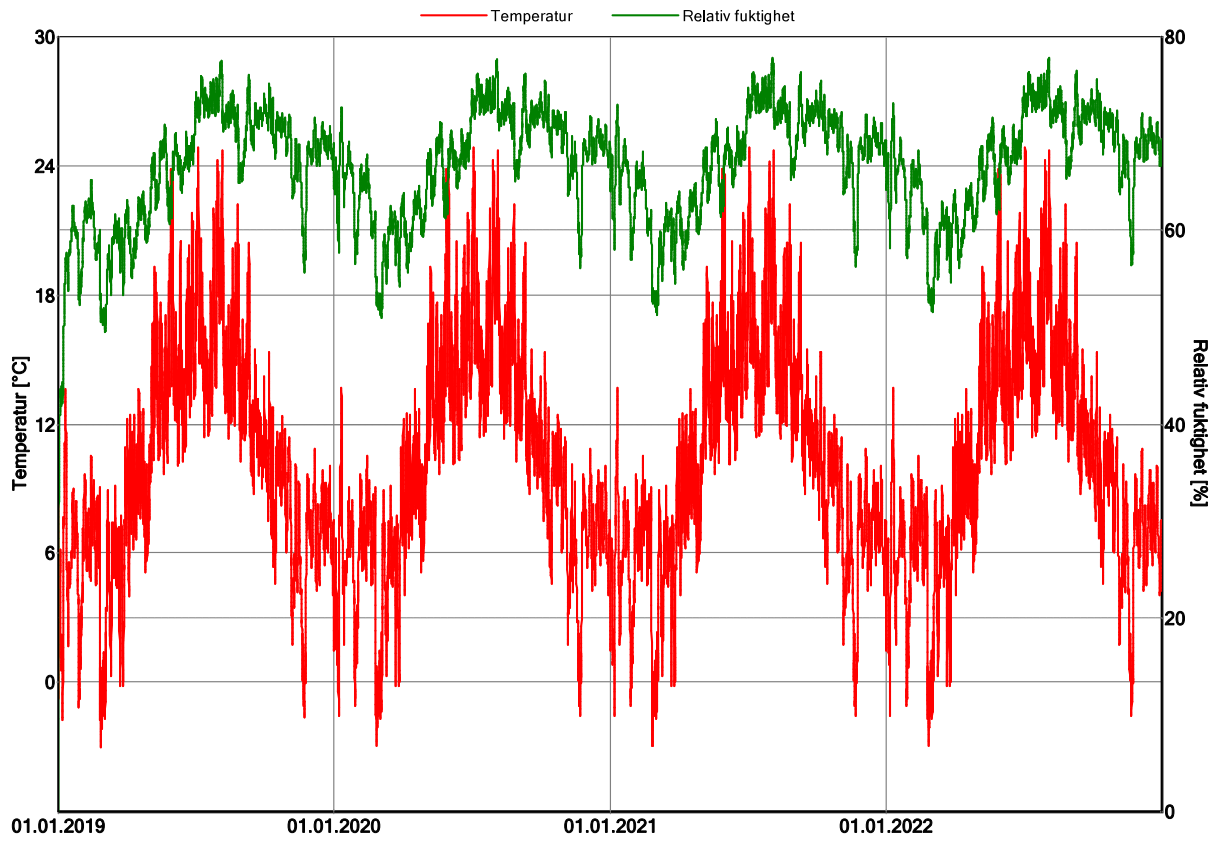
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,051086 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggtukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

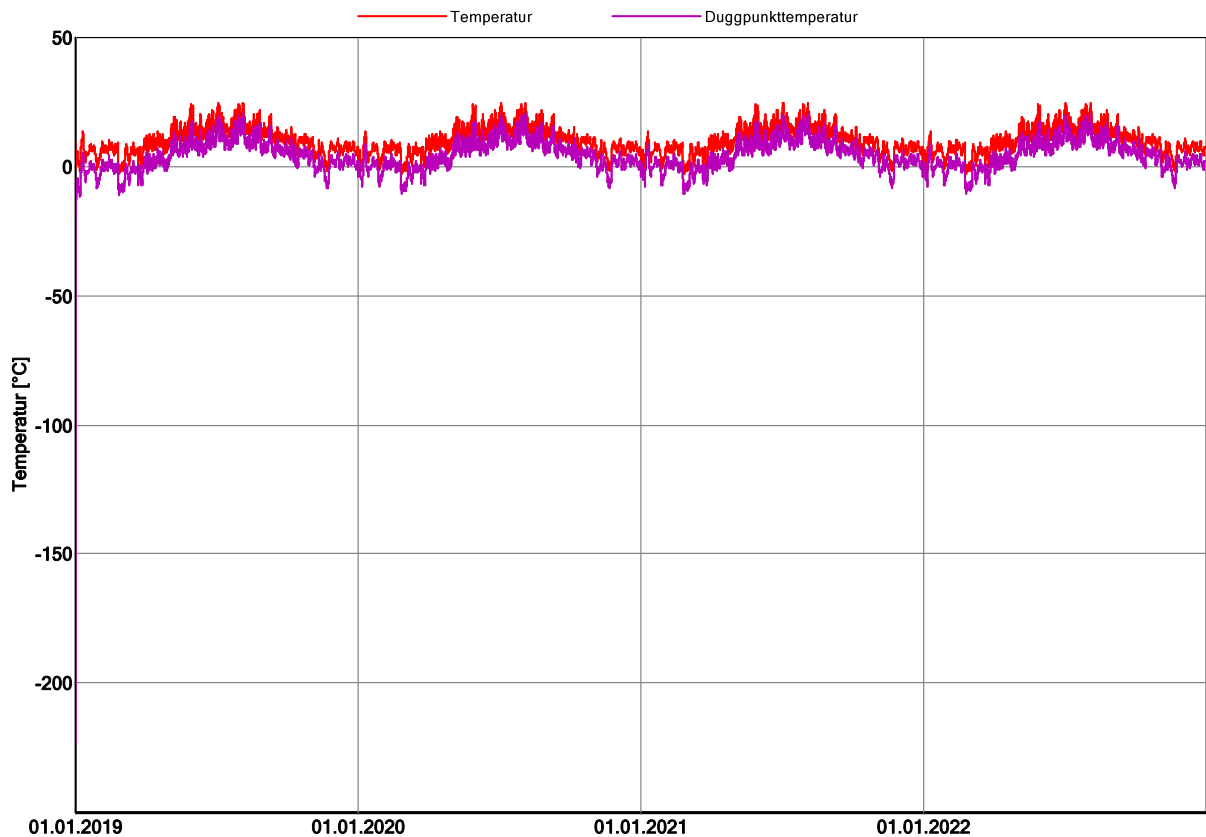
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,000914 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

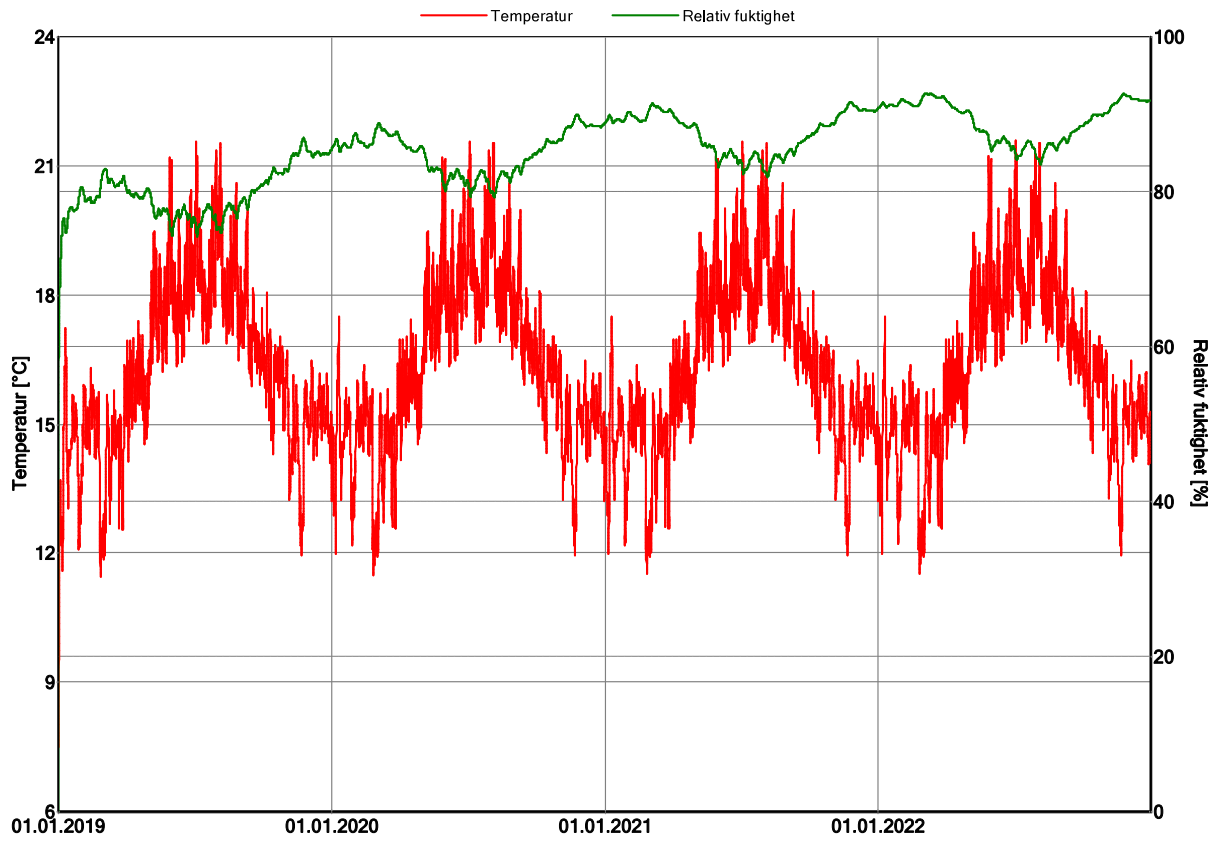
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,000914 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

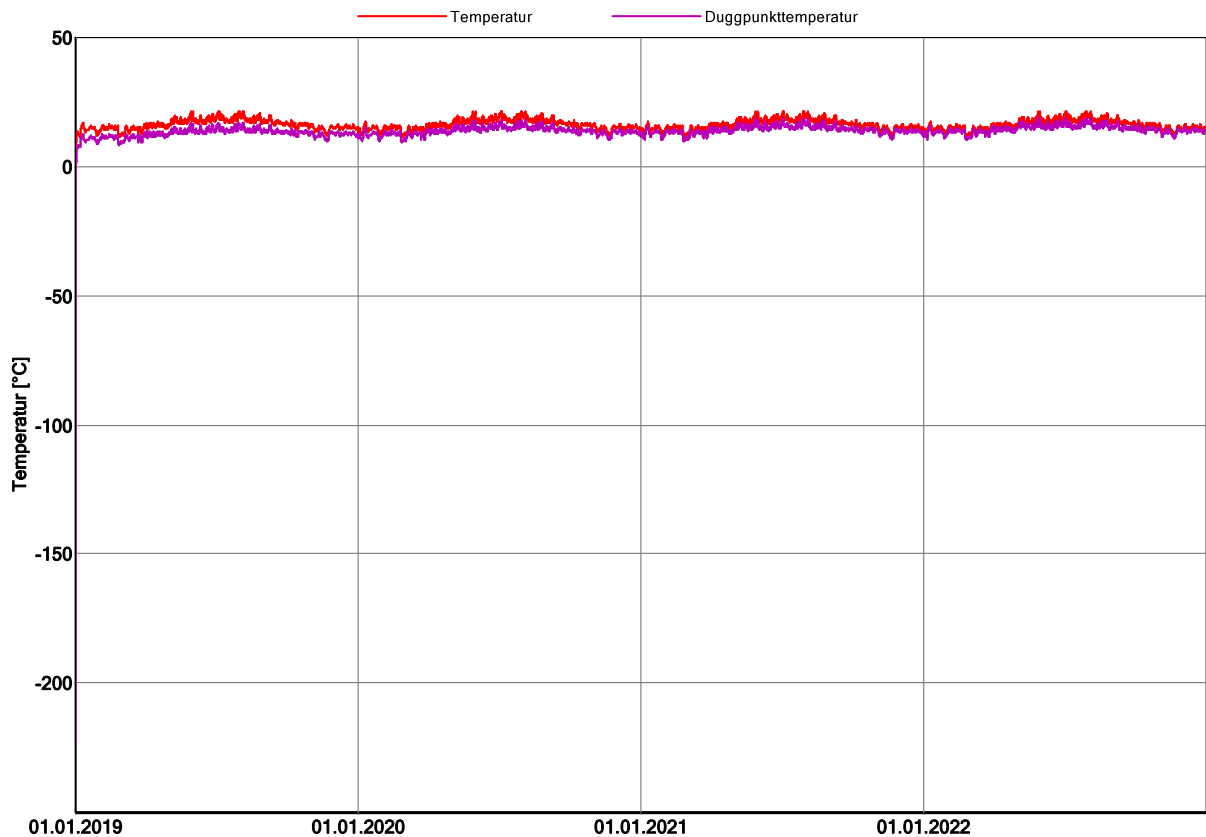
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,019086 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

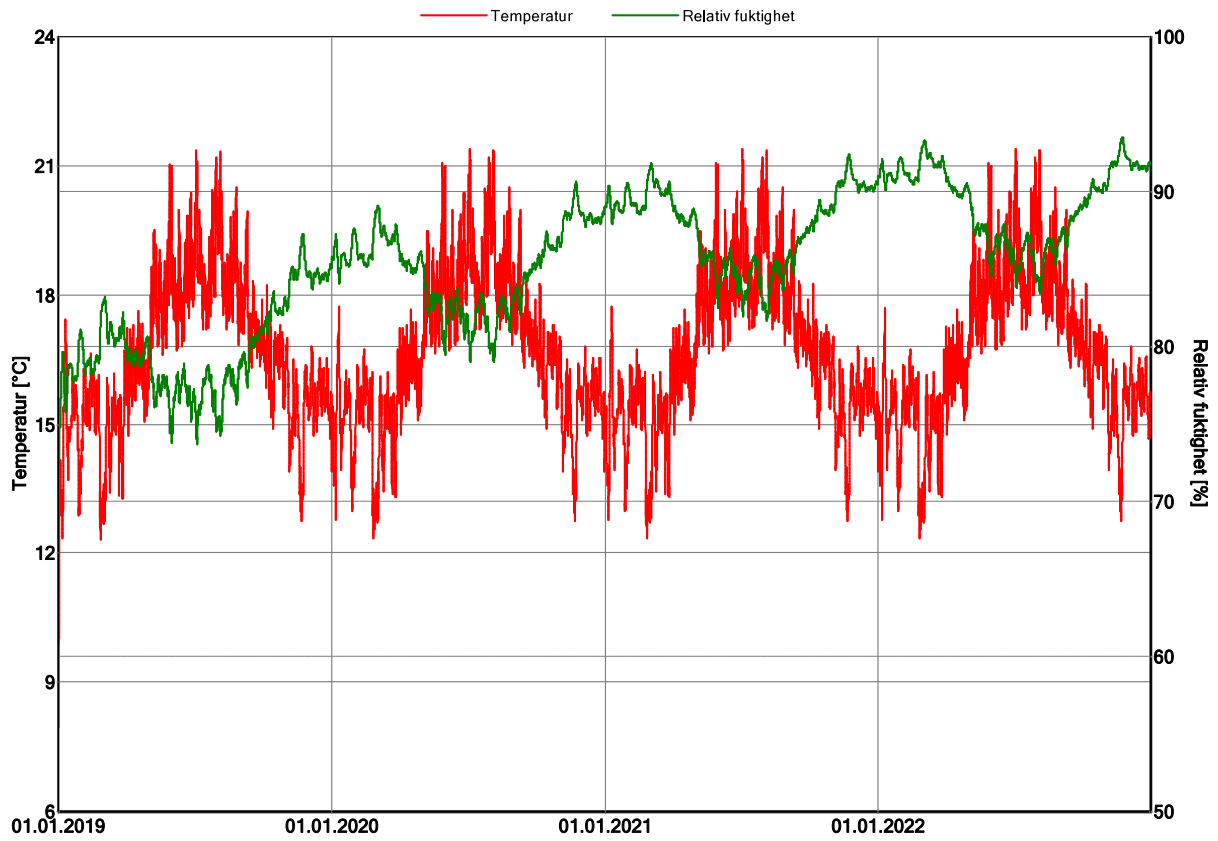
VIP generic (0,007 W/m<sup>2</sup>K) (0,019086 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

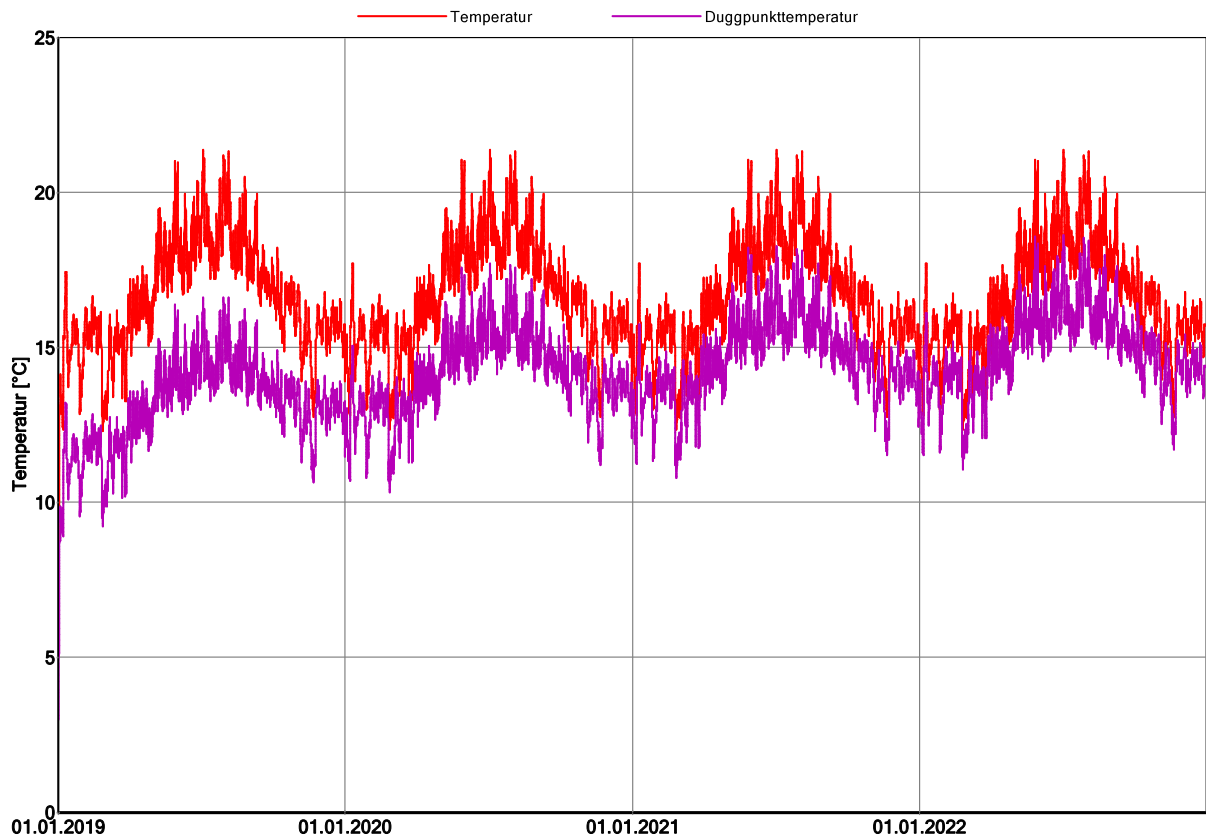
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,000914 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

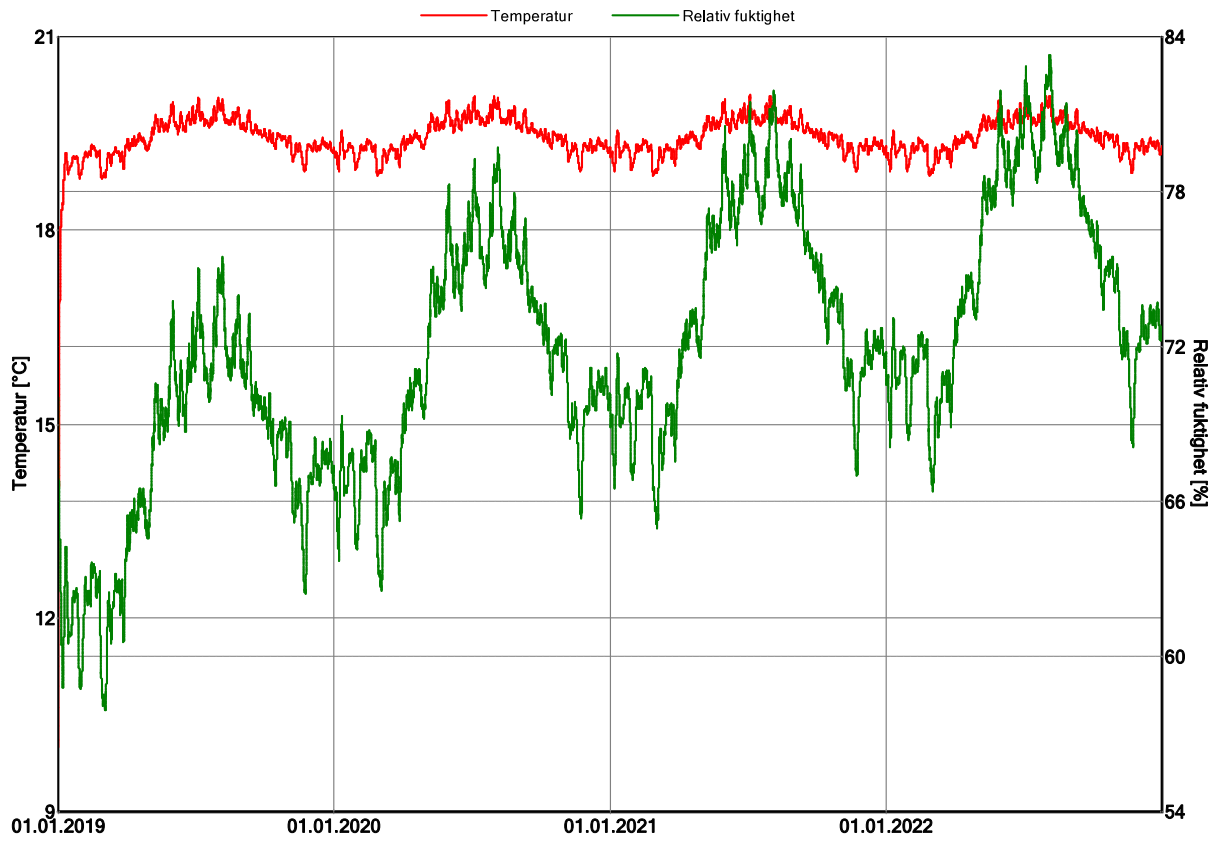
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,000914 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 1.05.2019.w6p; Variant 6: #6 VIP terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 03.05.2019

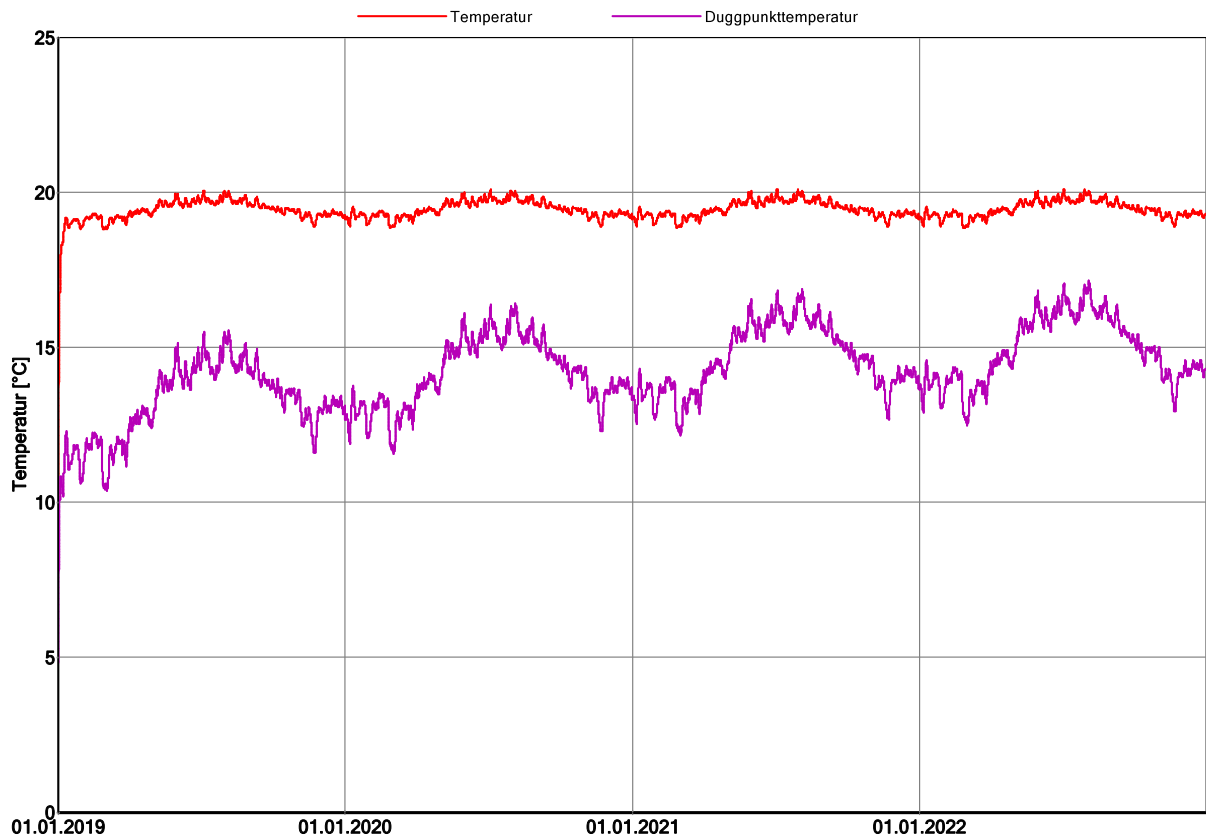
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049945 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049945 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial

## 7 Terrassekonstruksjon med aerogel uten betongdekke, mer byggfukt

## Prosjektdata

Prosjektnavn Superisolasjon, bacheloroppgave

Prosjektnummer

Oppdragsgiver NTNU og Rambøll

Kontaktperson Frida Ulla og Ingrid Astrup

Postnr/Sted

Adresse

Tel.

Faks

E-post

Ansvarlig Frida Ulla og Ingrid Astrup

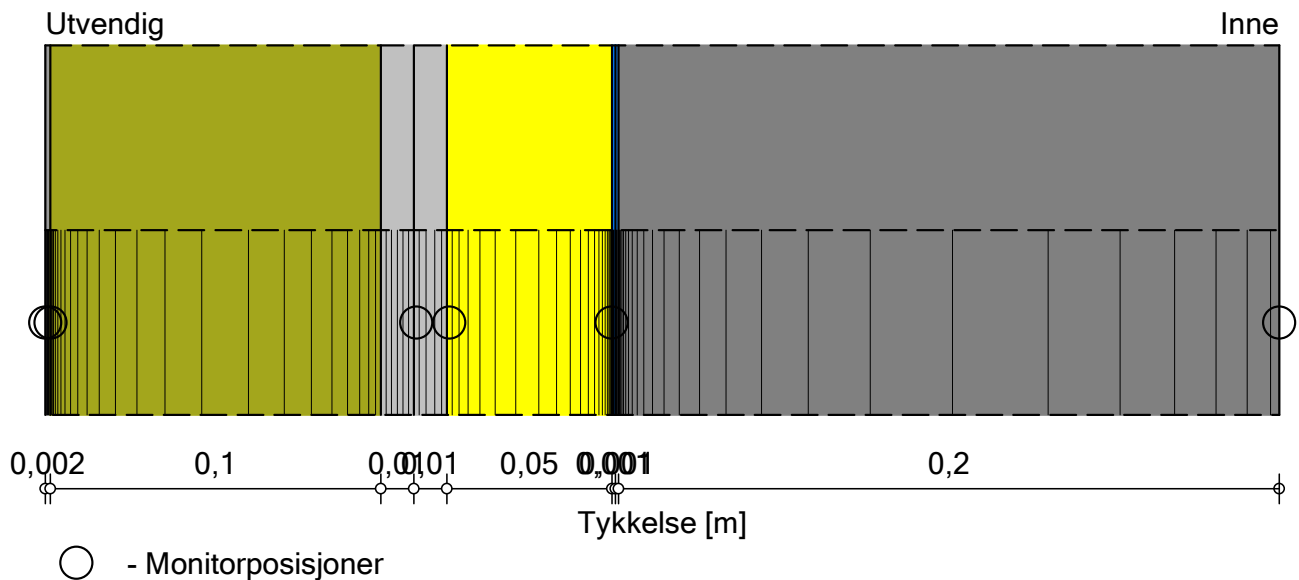
Kommentarer Analyse av bygningsdeler med VIP eller aerogel.

Dato 25.03.2019



## Konstruksjonsoppbygging

Variant: #5 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt



### Materialer:

	- PVC membrane	0,002 m
	- ROCKWOOL TOPROCK DD	0,1 m
	- Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	0,01 m
	- Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	0,01 m
	- EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- Betong B45	0,2 m

Samlet tykkelse: 0,374 m

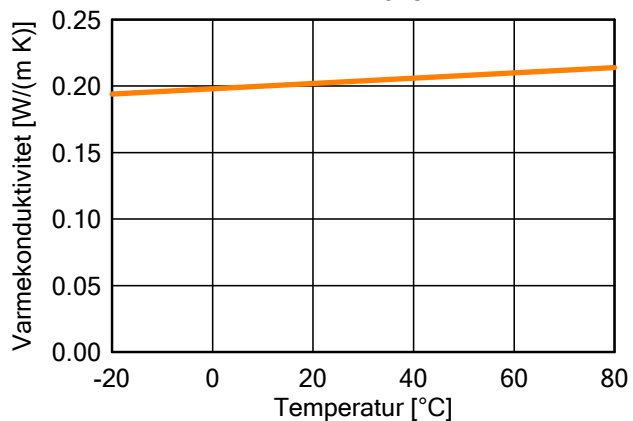
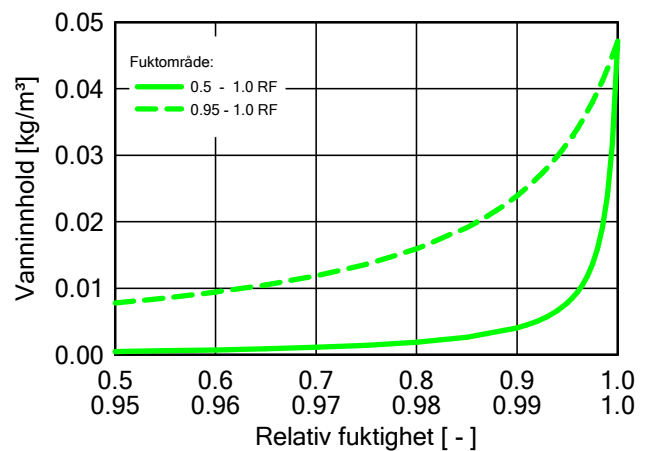
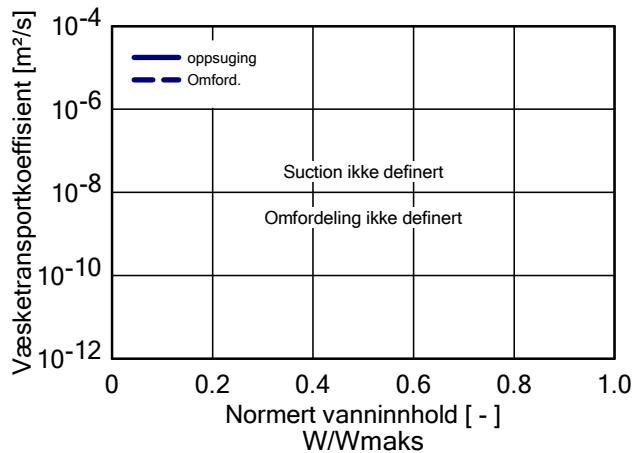
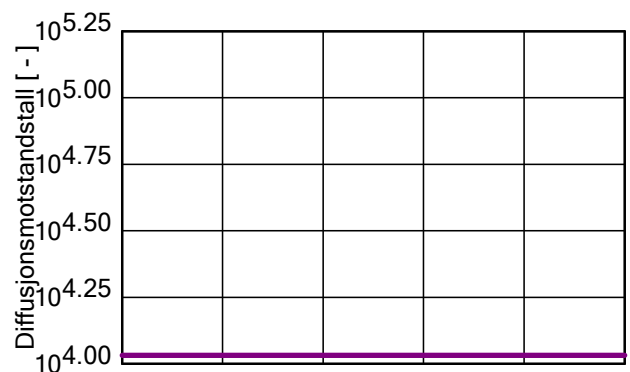
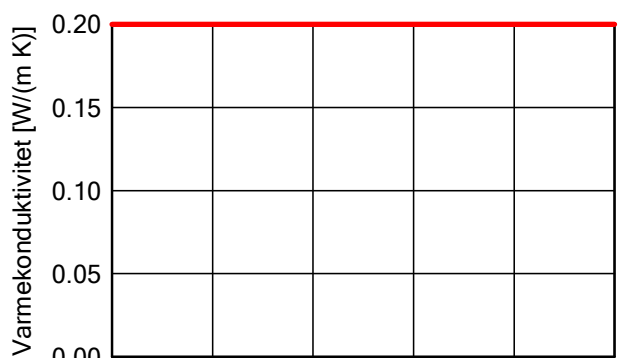
Varmemotstand: 5,48 (m<sup>2</sup> K)/W

U-verdi: 0,177 W/(m<sup>2</sup> K)

# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: PVC membrane

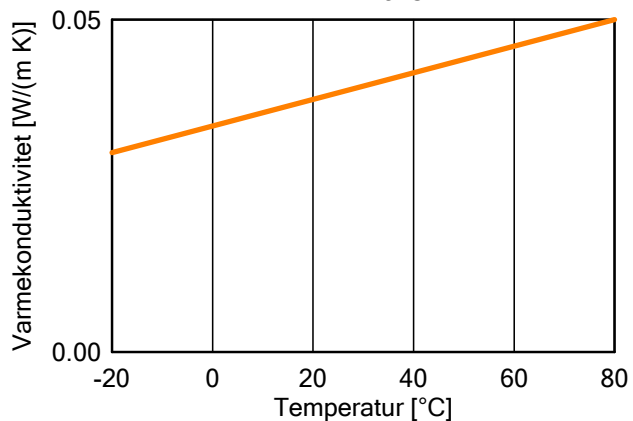
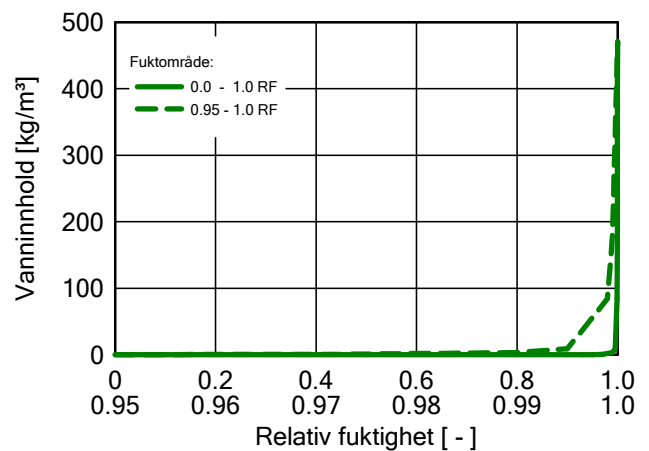
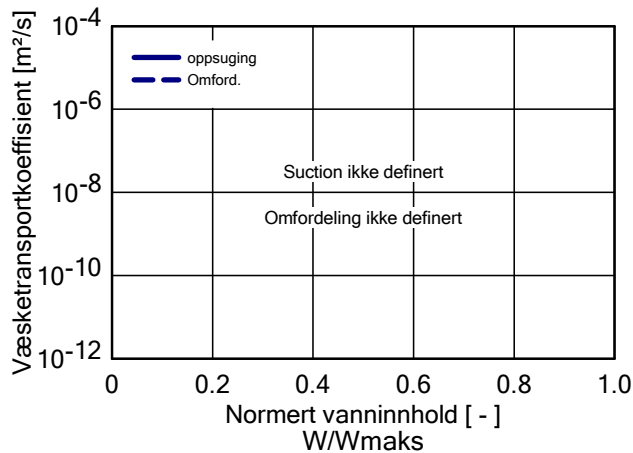
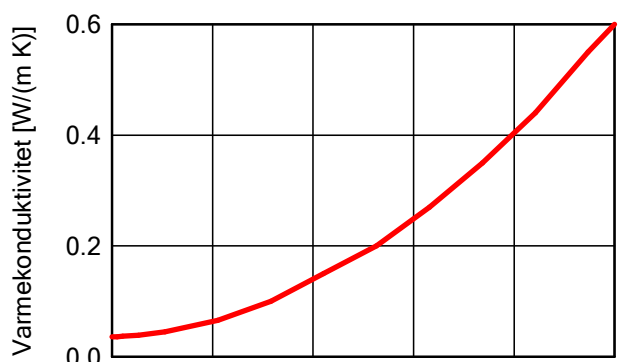
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	10761
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL TOPROCK DD

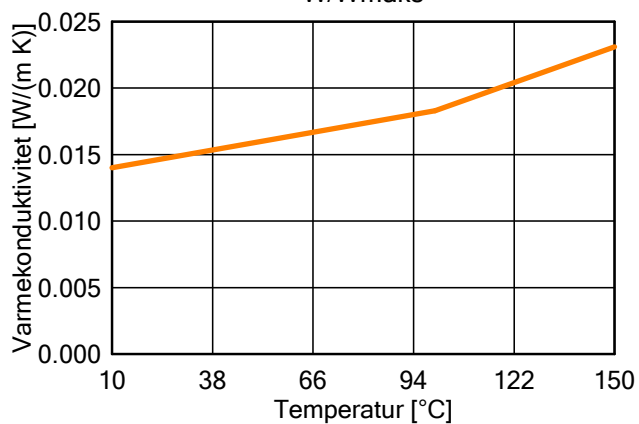
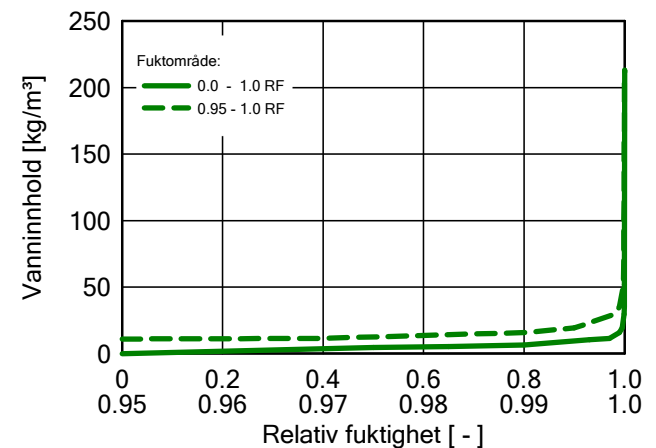
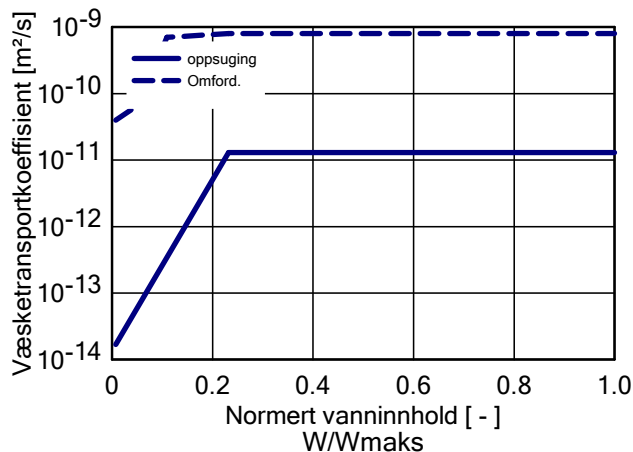
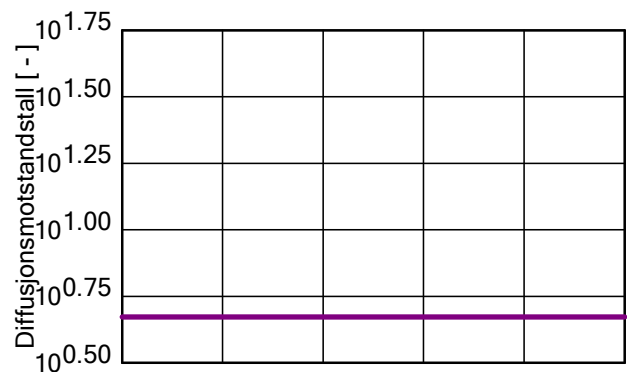
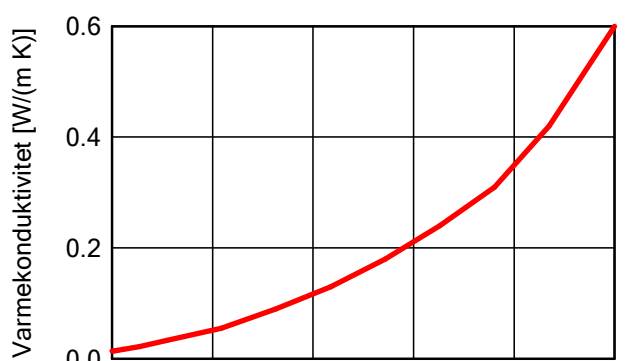
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	176
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	1.2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Aspen Aerogels - Spaceloft Grey

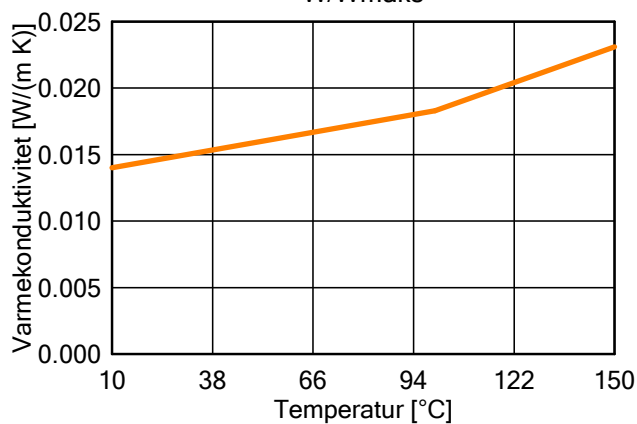
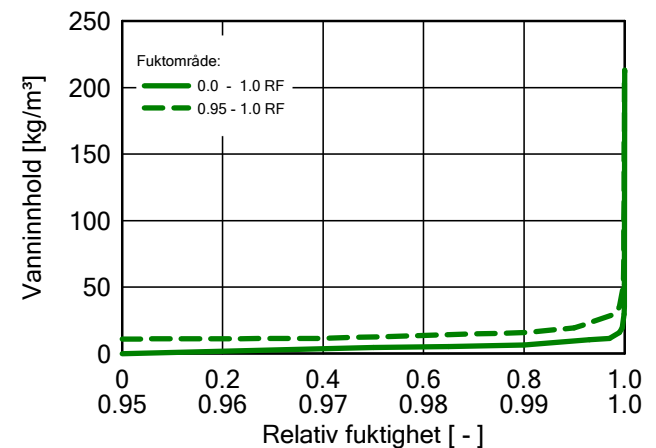
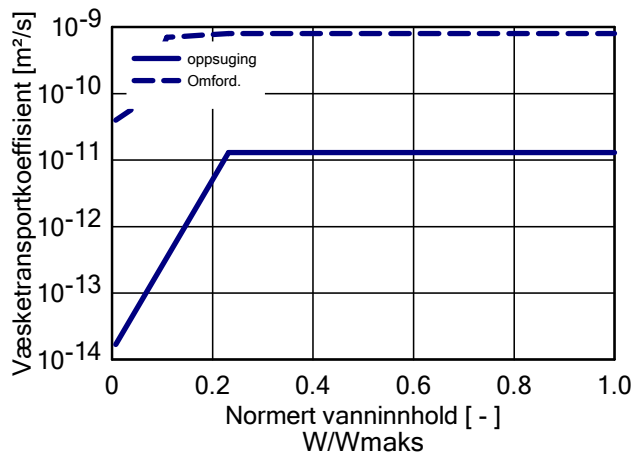
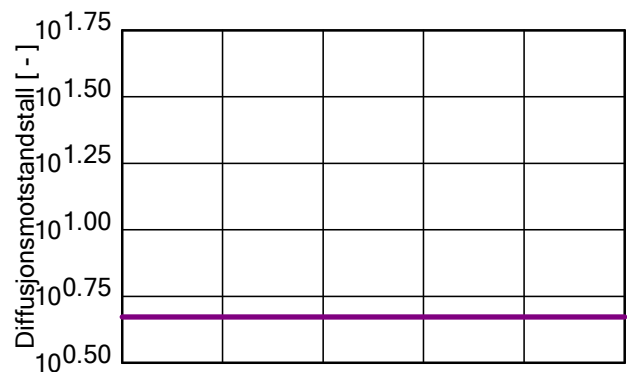
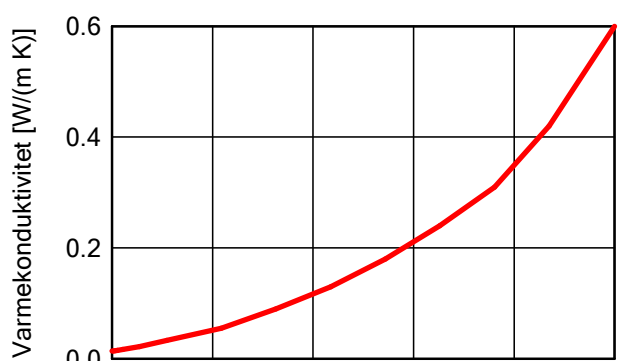
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	146
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.92
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1000
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.014
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	4.7



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Aspen Aerogels - Spaceloft Grey

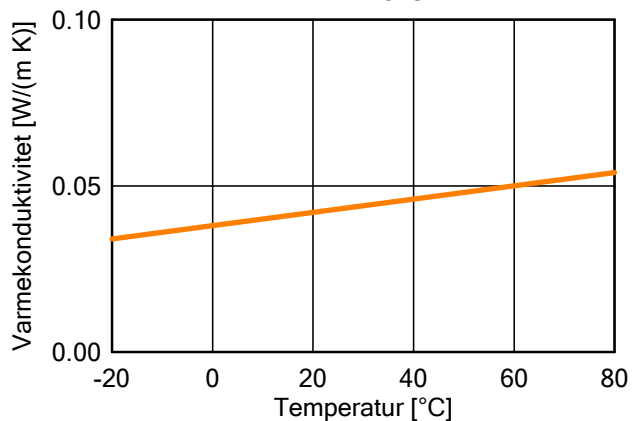
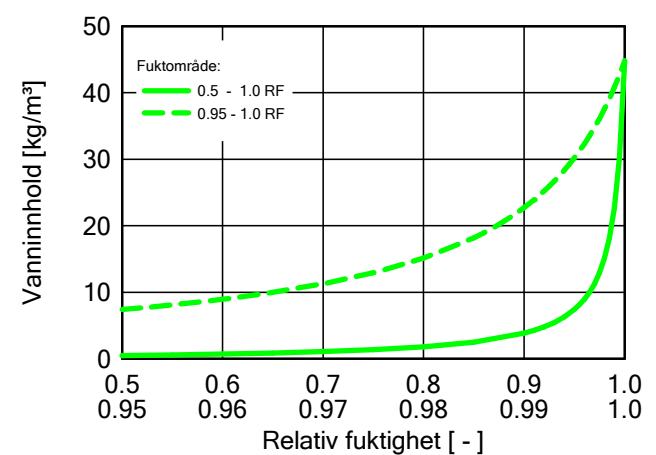
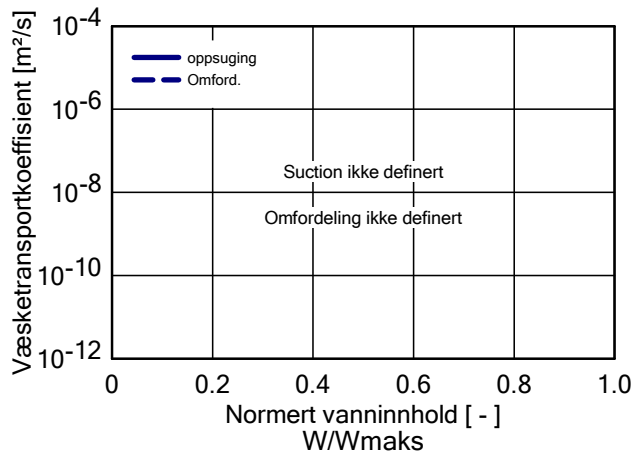
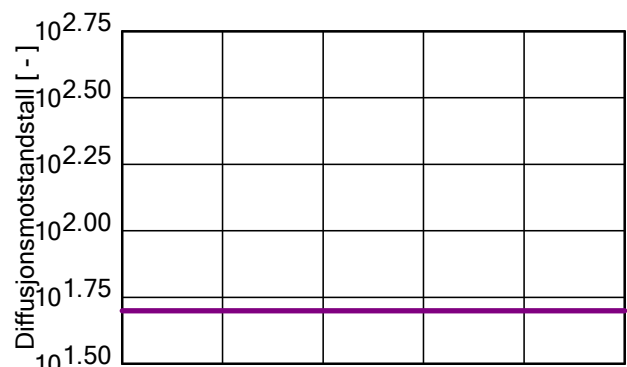
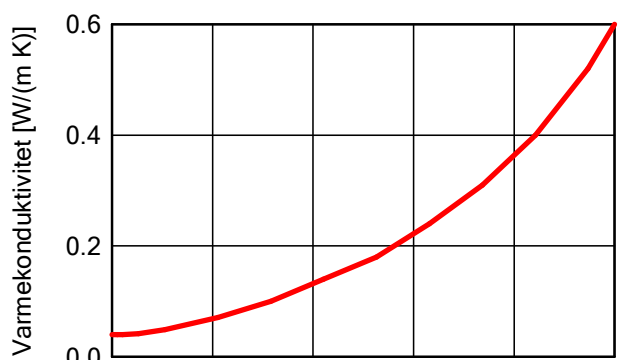
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	146
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.92
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1000
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.014
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	4.7



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>)

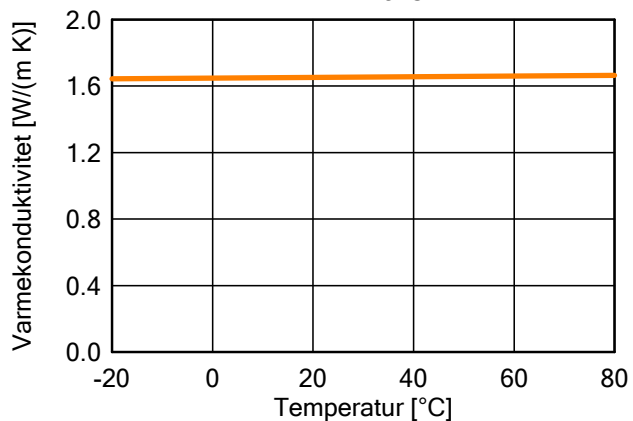
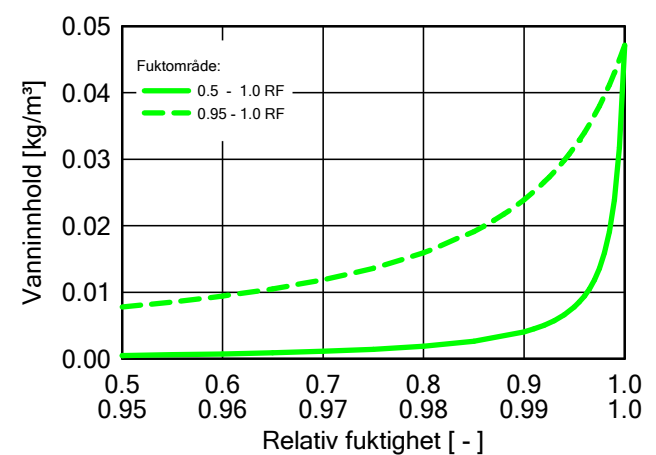
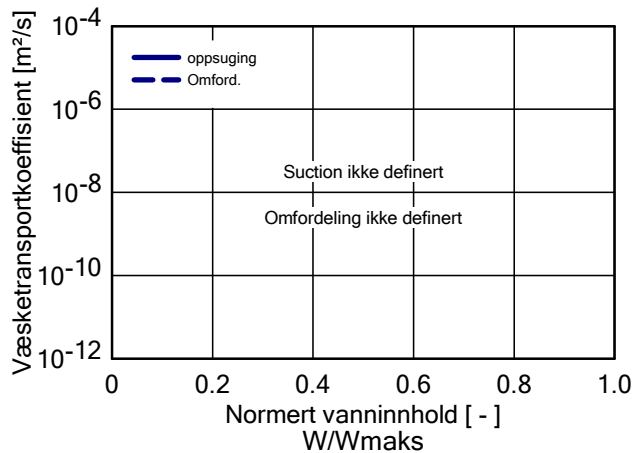
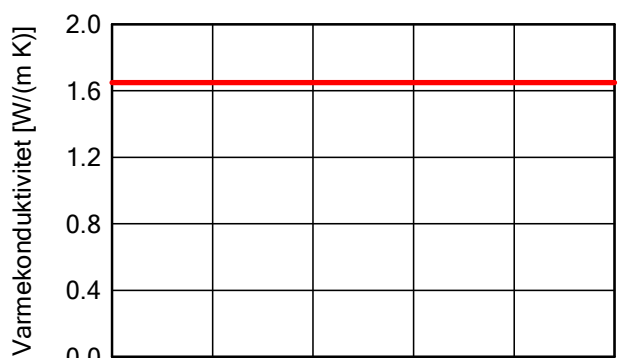
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	30
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekoduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	50
Temp.-avh. varmekodukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

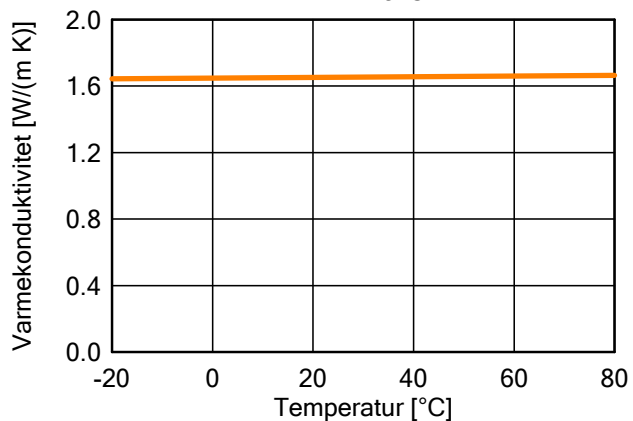
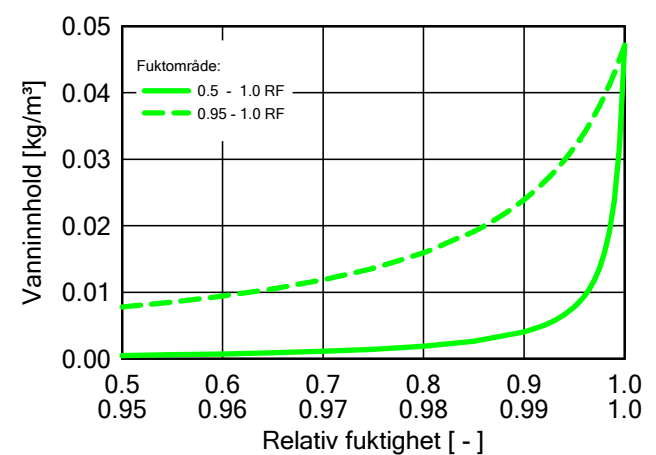
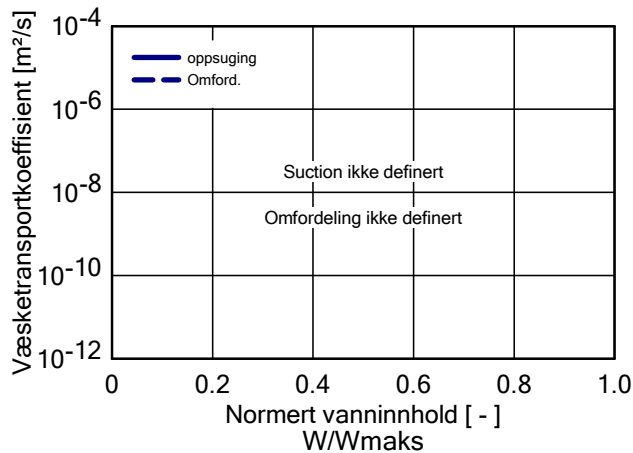
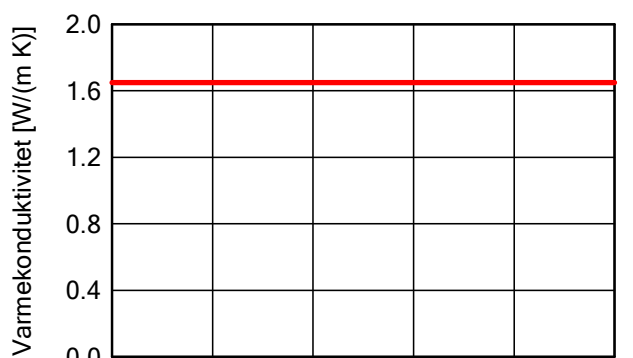
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002

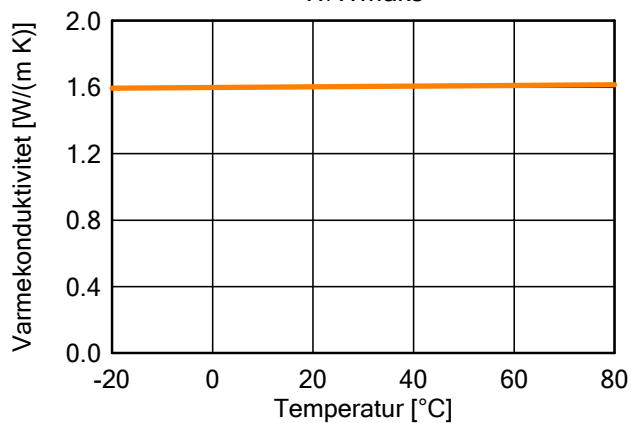
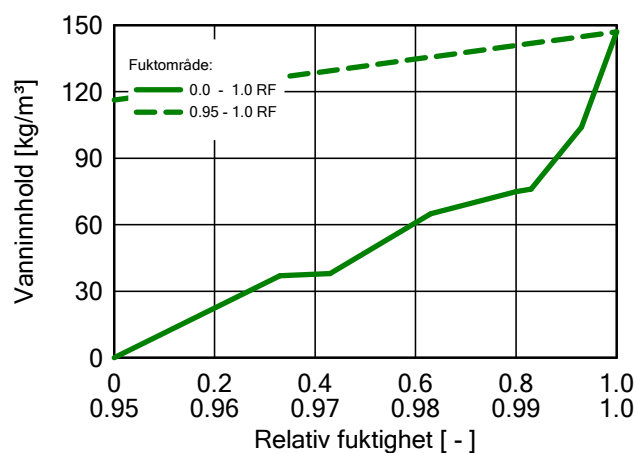
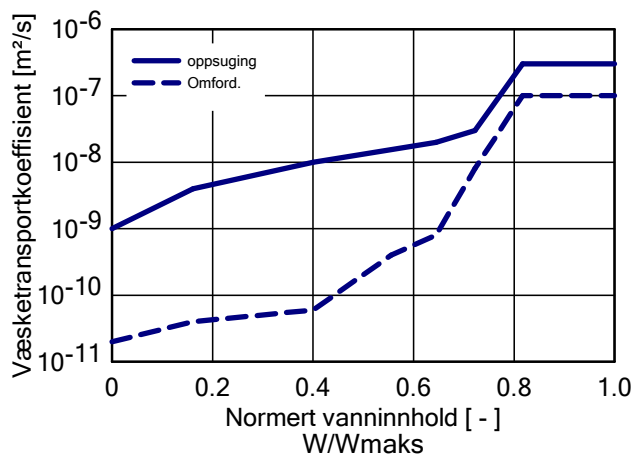
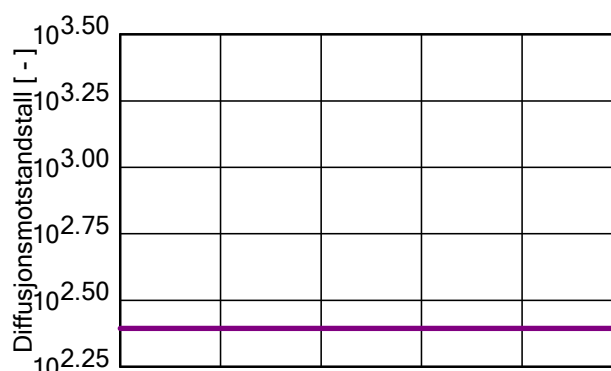
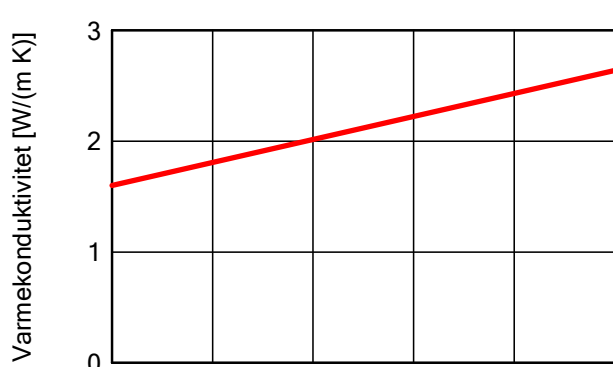




# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## Randvilkår

## Ute (venstre side)

Sted for klima: Trondheim; NBI / NTNU  
 Temperaturforskyvning: 0.0 °C  
 Orientering / Helning: Vest / 0 °  
 Avkjøling ved stråling om natten: nei

## Inne (høyre side)

Inneklima: EN 13788  
 Fuktklasse 3; Temperatur: 20 °C

## Overflaters overgangskoeffisient

## Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Lys	[-]	0.2
Langbølget strålingsemissivitet	Lys	[-]	0.9
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1,0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

## Inne (høyre side)

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

## Resultater fra siste beregning

## Status for beregning

Dato/tid for beregning	04.05.2019 14:27:44
Regnetid	1 min,29 sek.
Begynn / Avslutt beregning	01.01.2019 / 01.01.2023
Antall konvergensfeil	13

## Numerisk kvalitetssjekk

Samlet fukttransport, utv. (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 -0,16
Samlet fukttransport, innv. (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	9,43 2,28
Balanse 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,87
Balanse 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,87

Vanninnhold [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	Slutt	Min.	Maks.
Totalt vanninnhold	28,16	16,09	16,07	28,17

Vanninnhold [kg/m<sup>3</sup>]

Sjikt/Materiale	Start	Slutt	Min.	Maks.
PVC membrane	0,00	0,01	0,00	0,03
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,01	0,57	0,01	1,11
Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	5,30	4,64	2,69	6,26
Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	5,30	4,05	2,14	5,94
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK)	1,06	0,25	0,10	1,06
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,00
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Betong B45	140,00	79,68	79,55	140,03

## Tidsintegralet av strømningsstetthetene

Varmestrømstetthet, venstre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-2041,5
Varmestrømstetthet, høyre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-342,69
Fuktstrømmer, venstre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,16
Fuktstrømmer, høyre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	11,91

## Hygrotermiske kilder

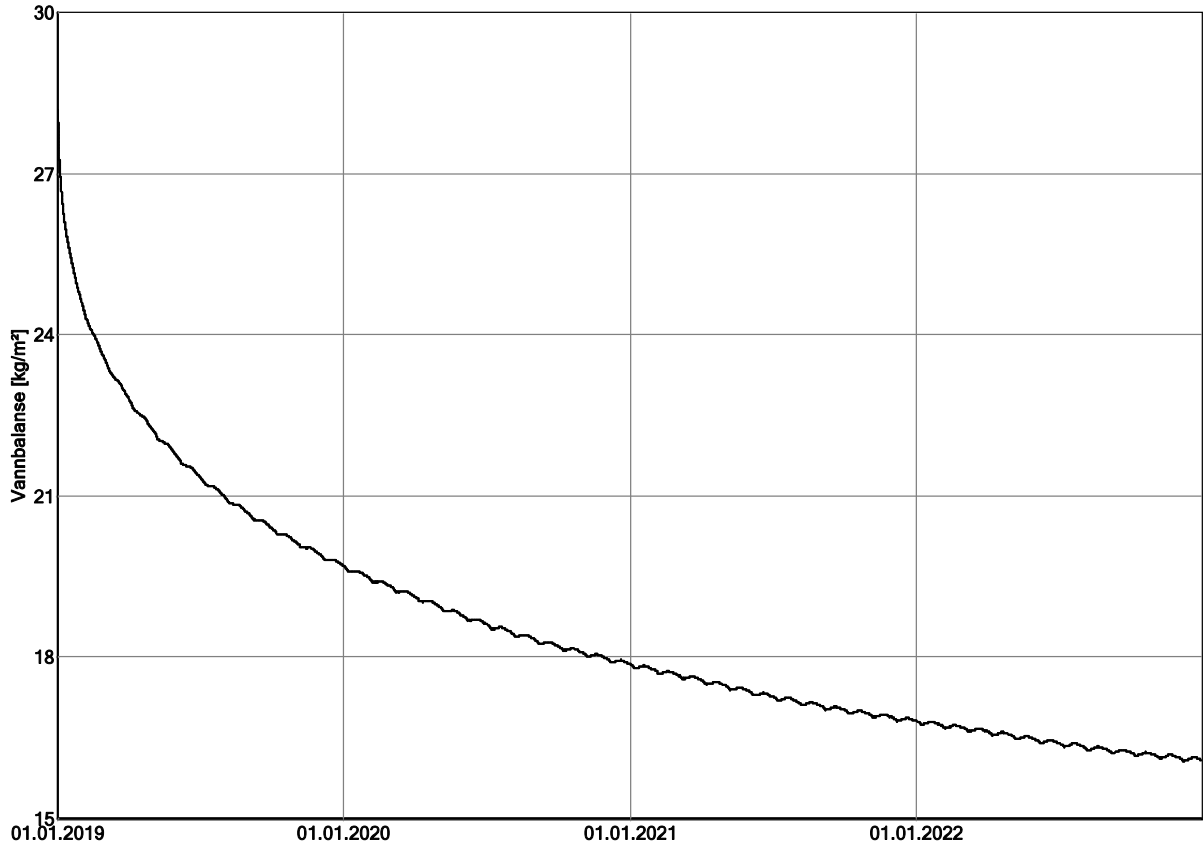
Varmekilder	[MJ/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0

## WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### Hygrotermiske kilder (Fortsett)

Begrensete fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
-----------------------	----------------------	-----

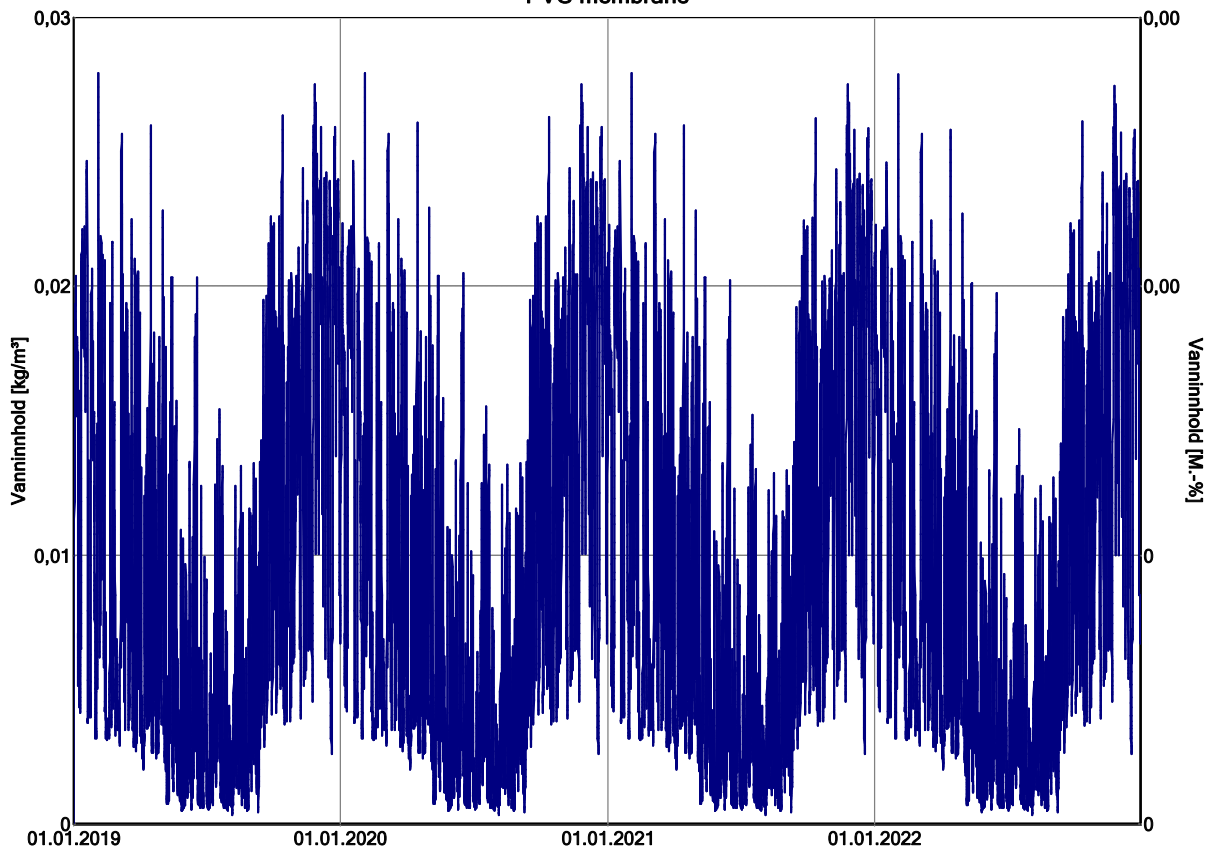
### Totalt vanninnhold



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

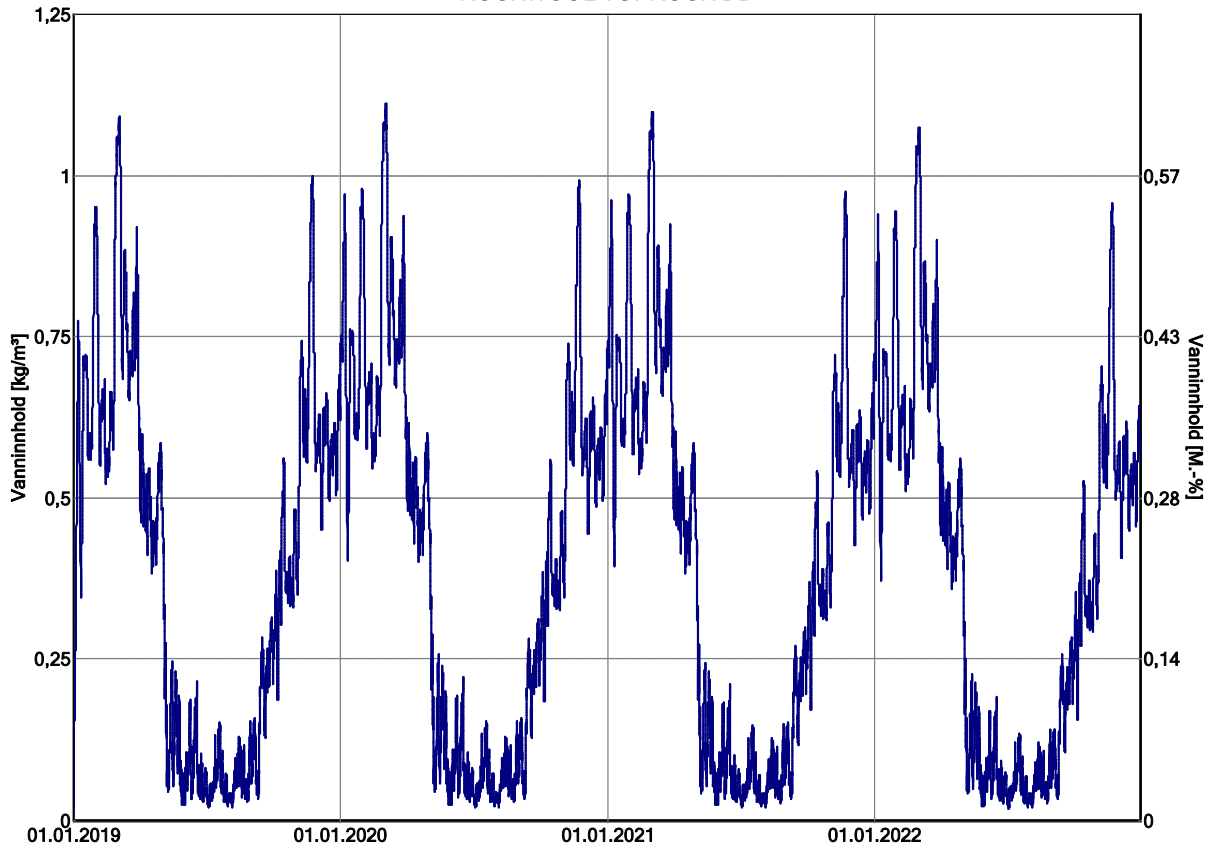
### PVC membrane



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

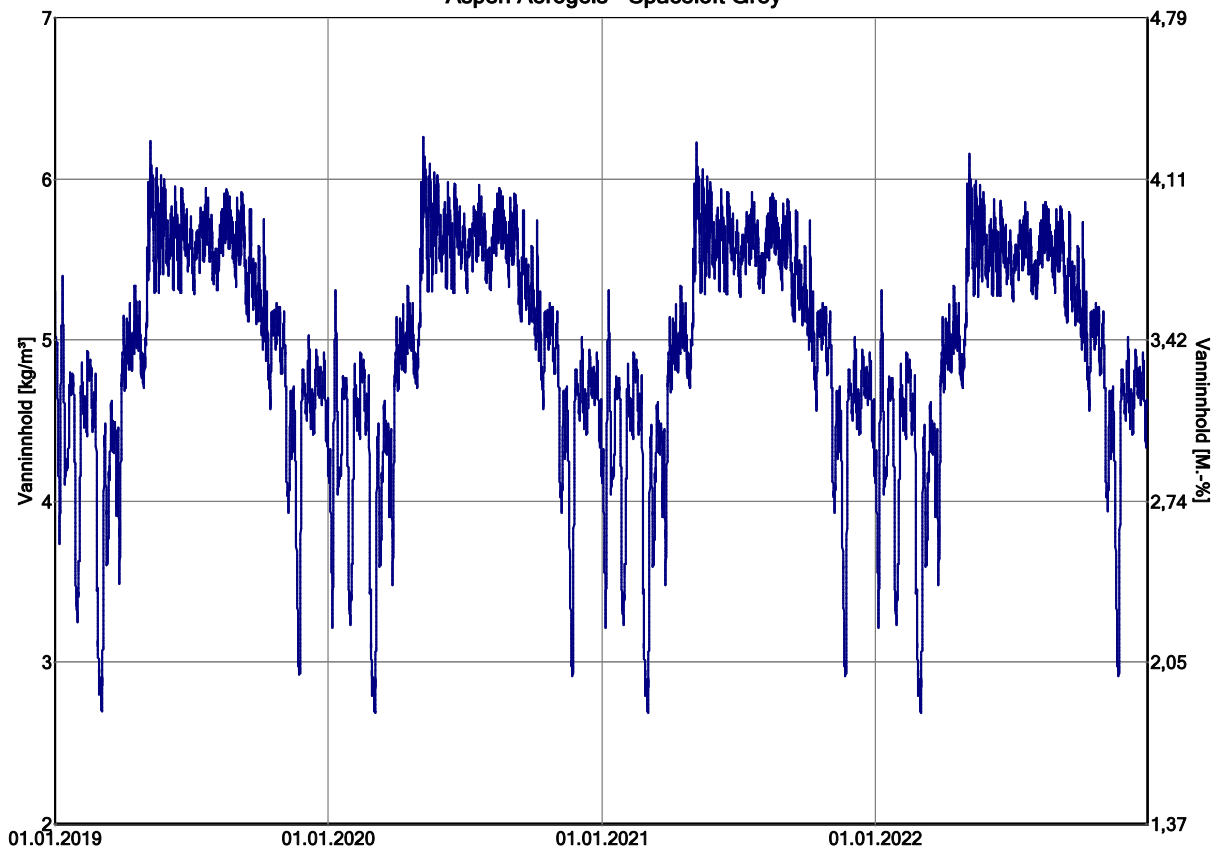
### ROCKWOOL TOPROCK DD



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

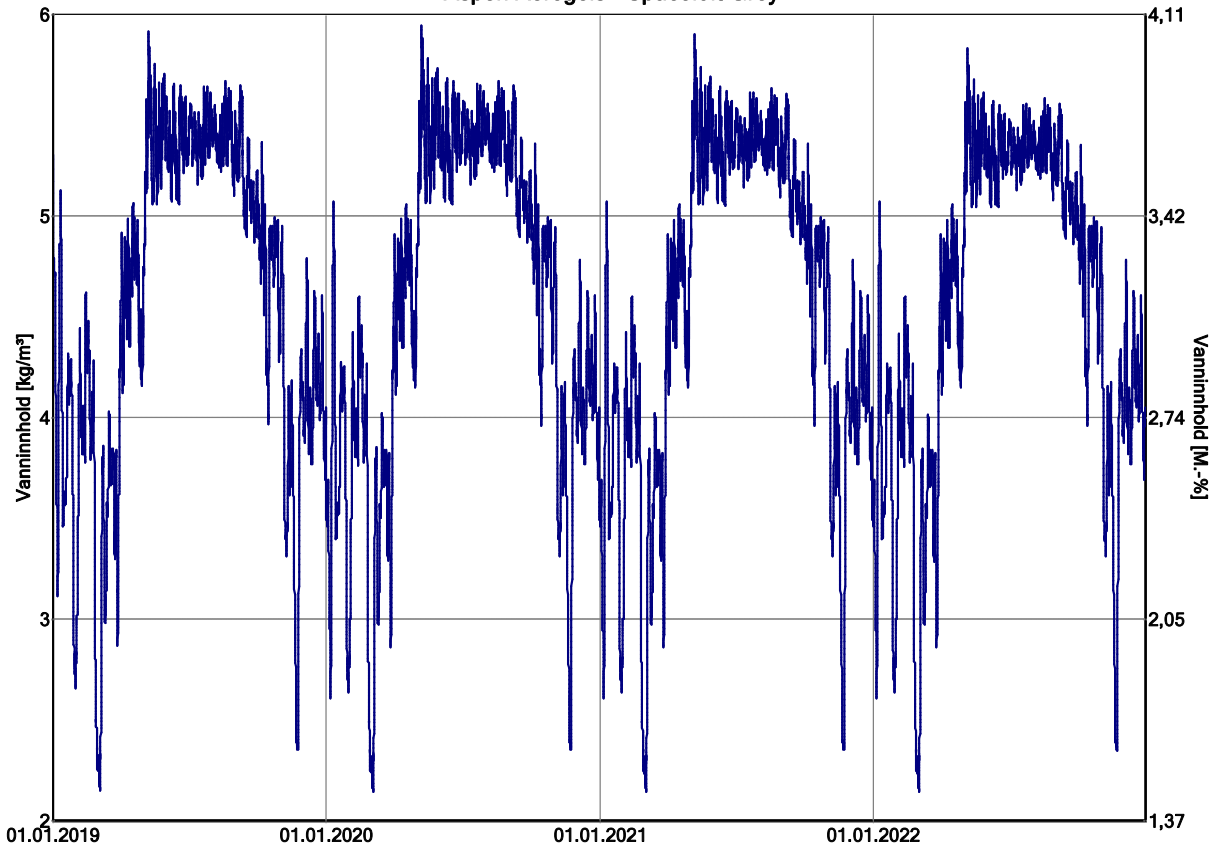
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

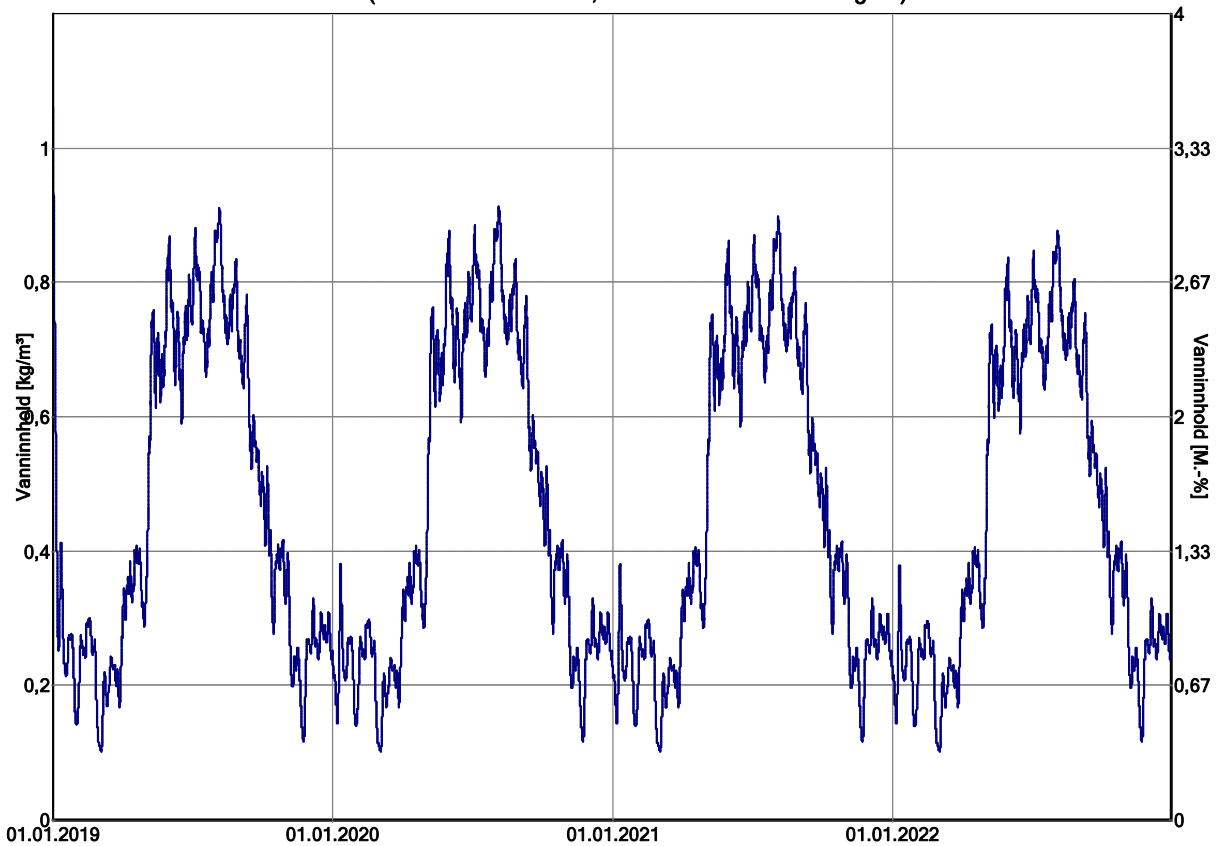
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

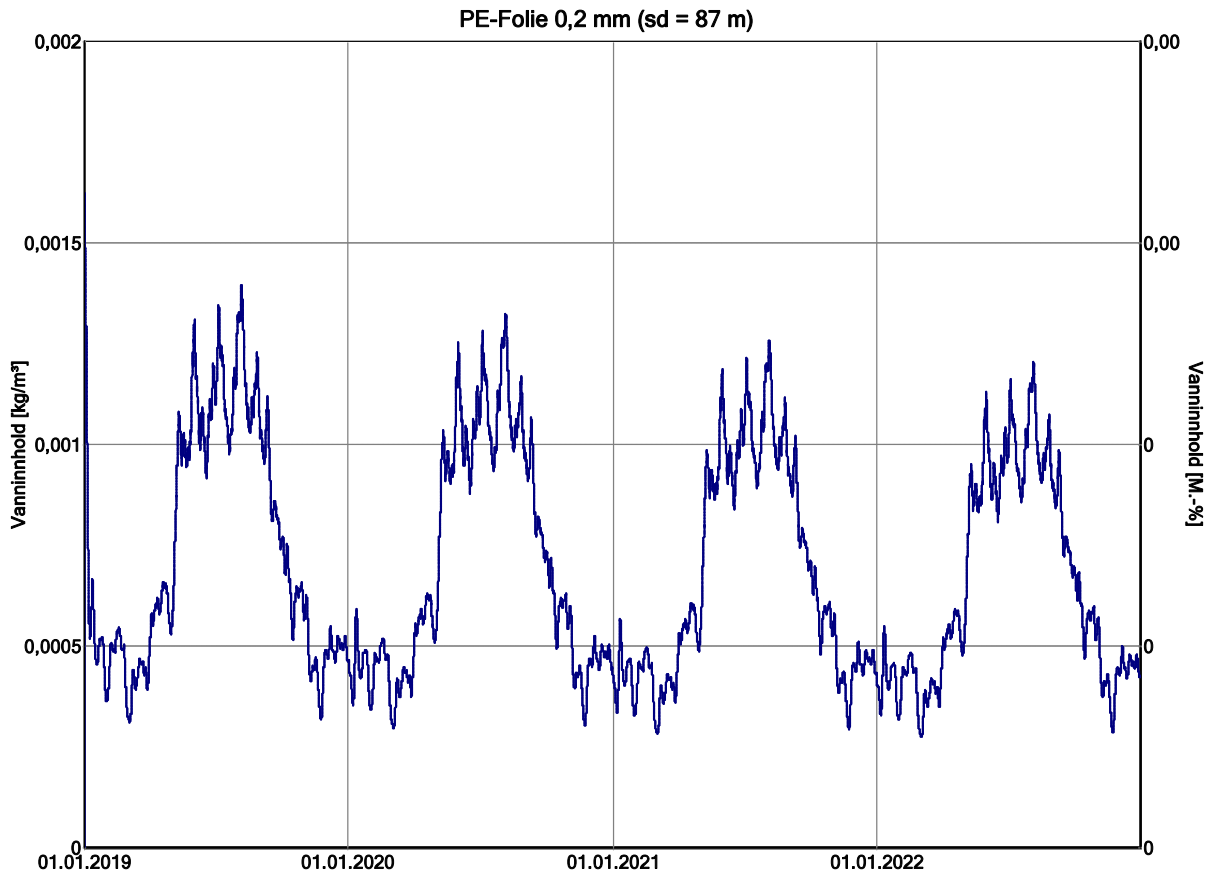
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### EPS (Varmekoduktivitet: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³)



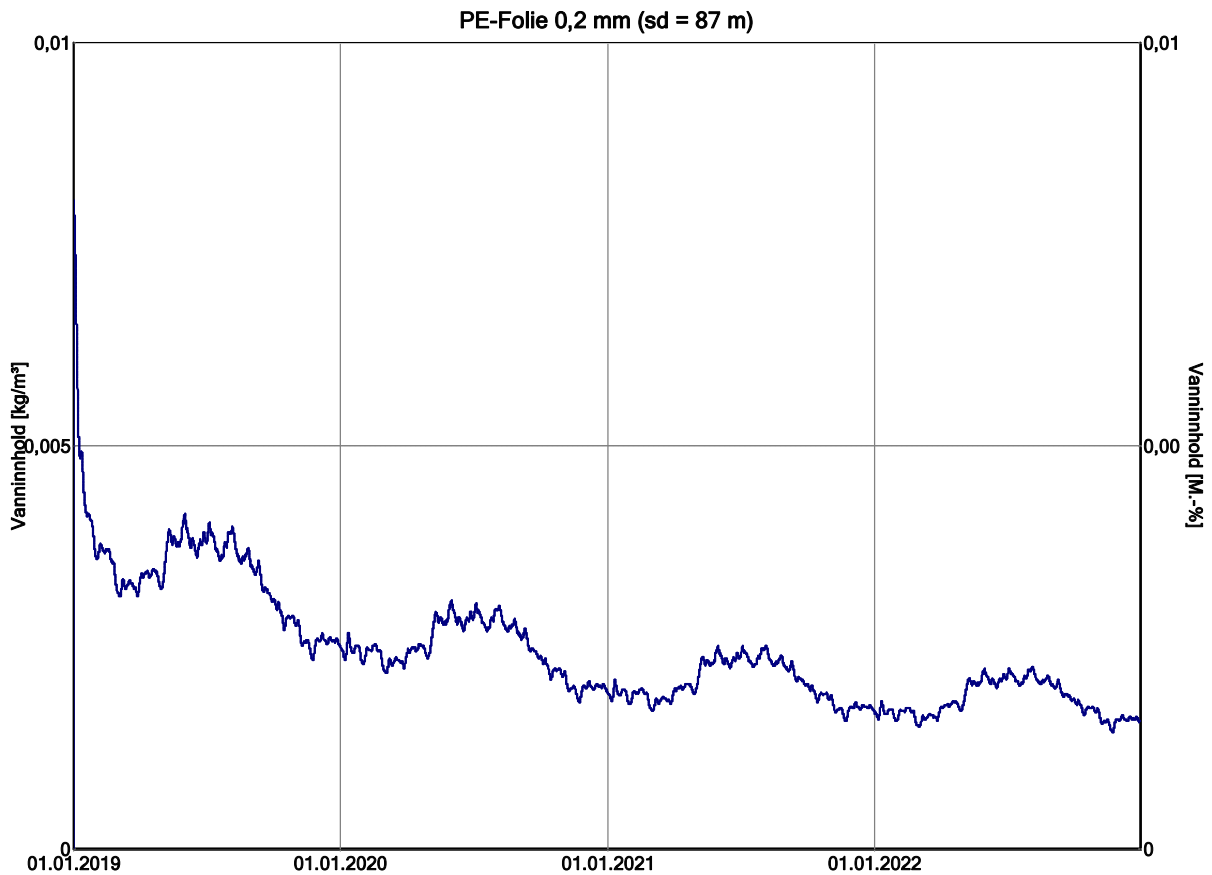
WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019; w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

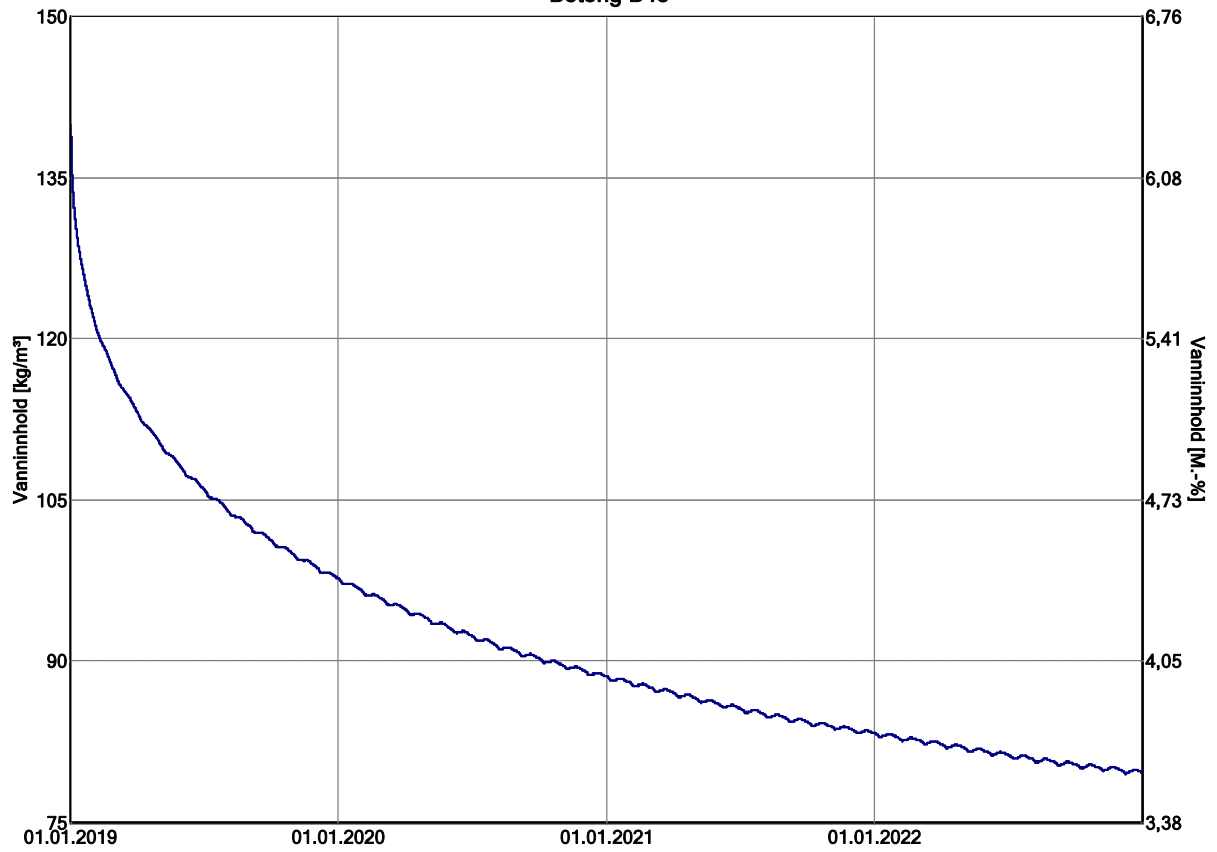


WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019; w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



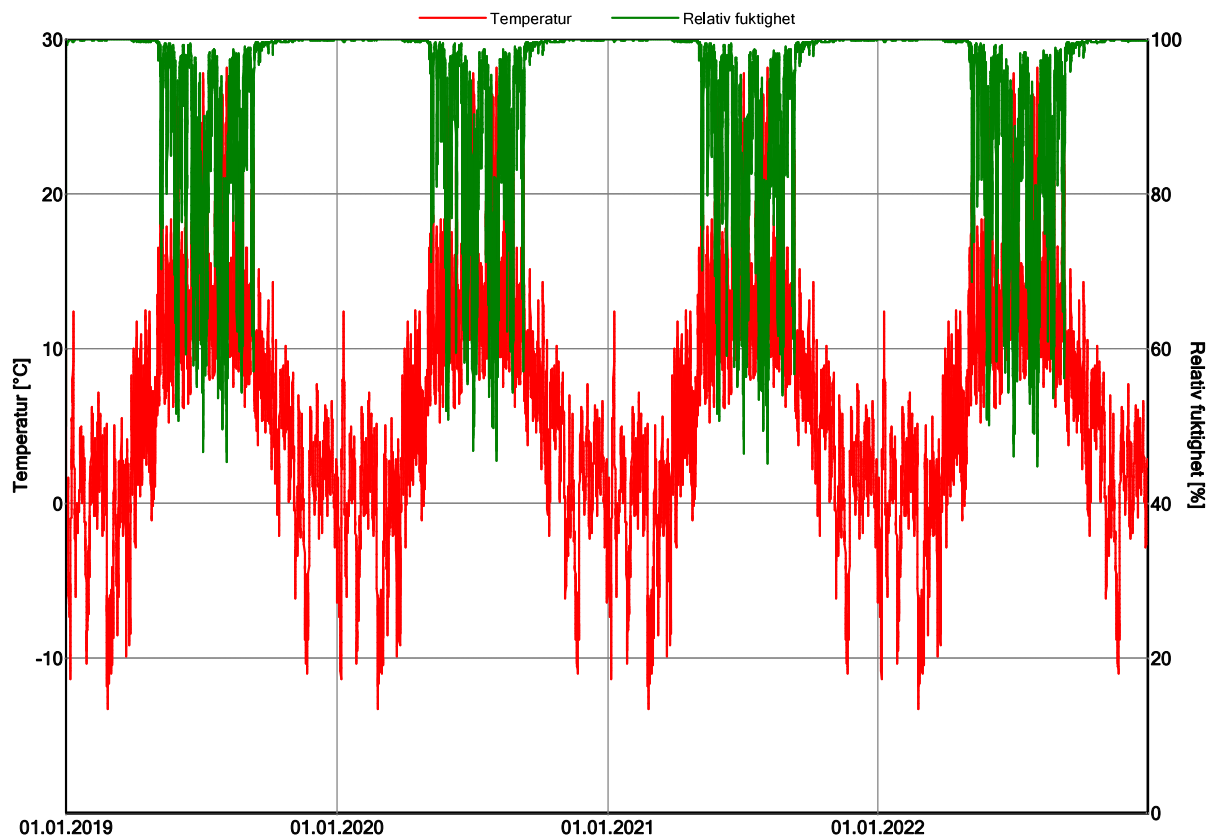
### Betong B45



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

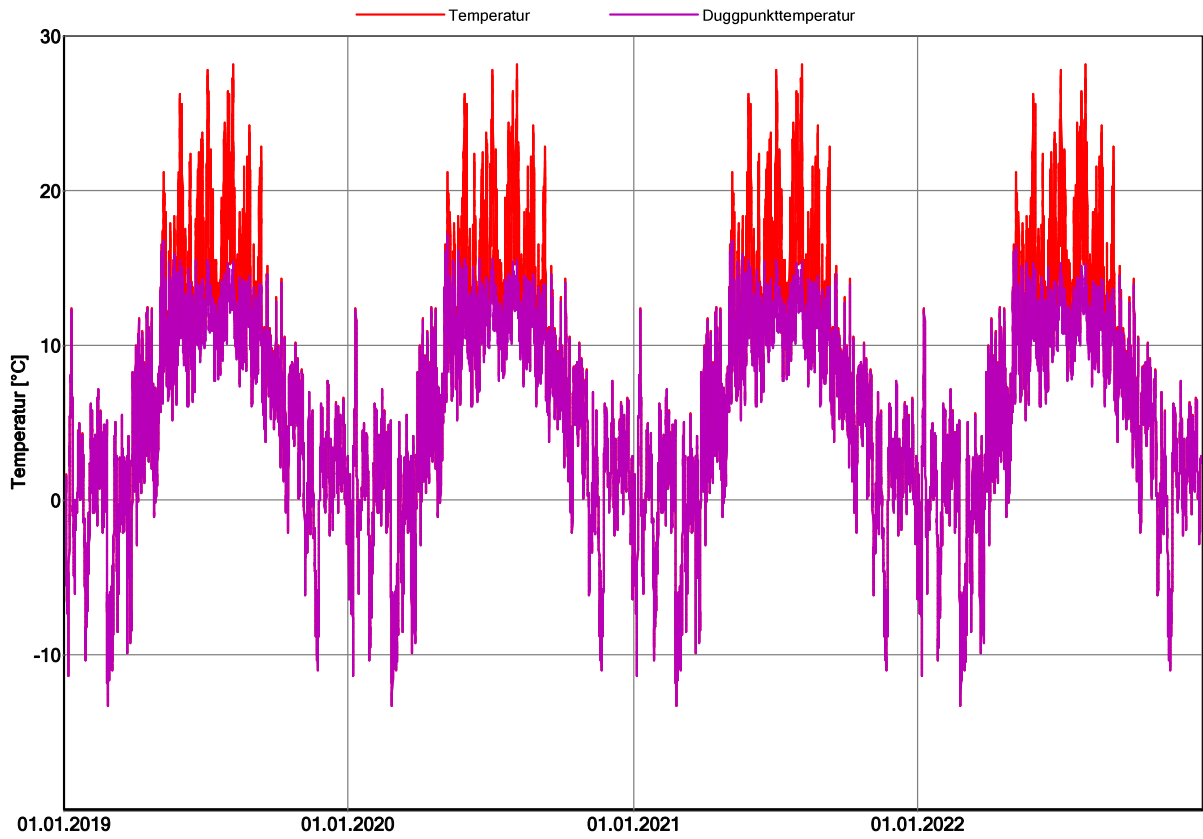
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000121 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

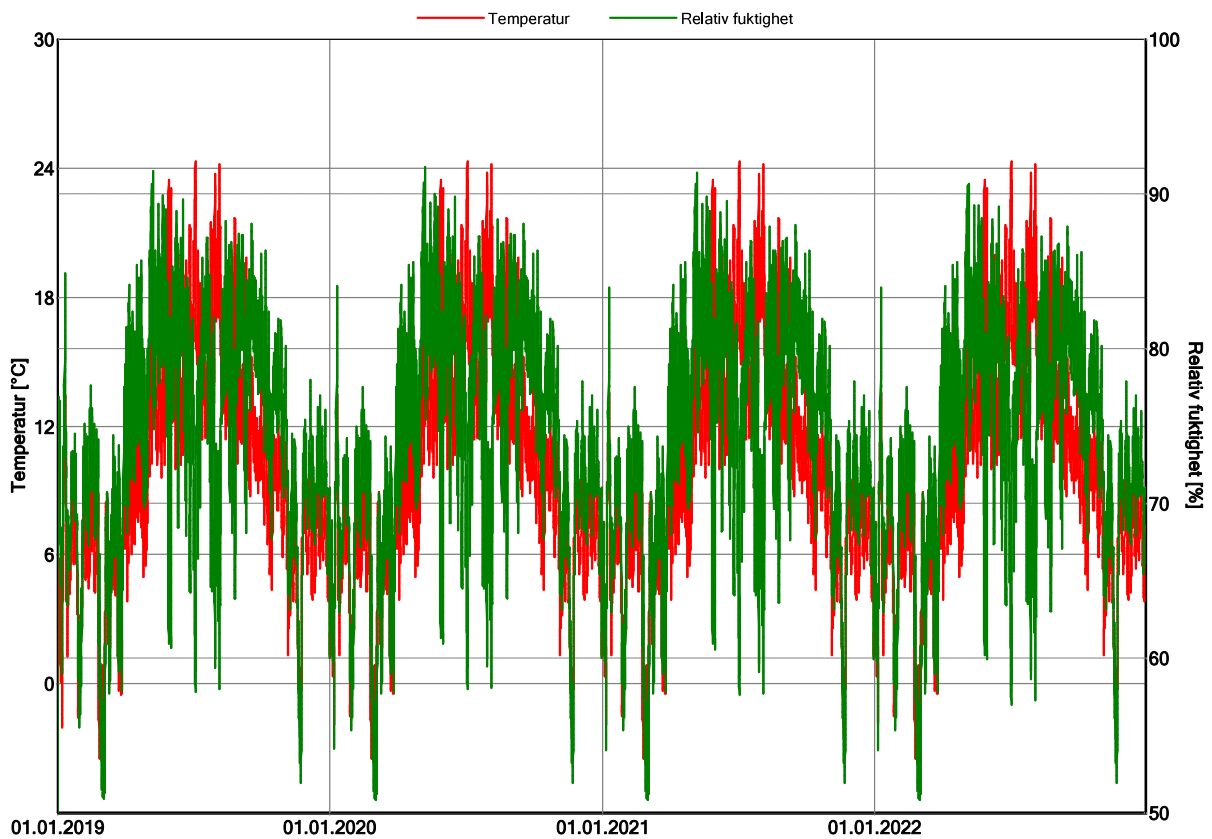
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000121 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

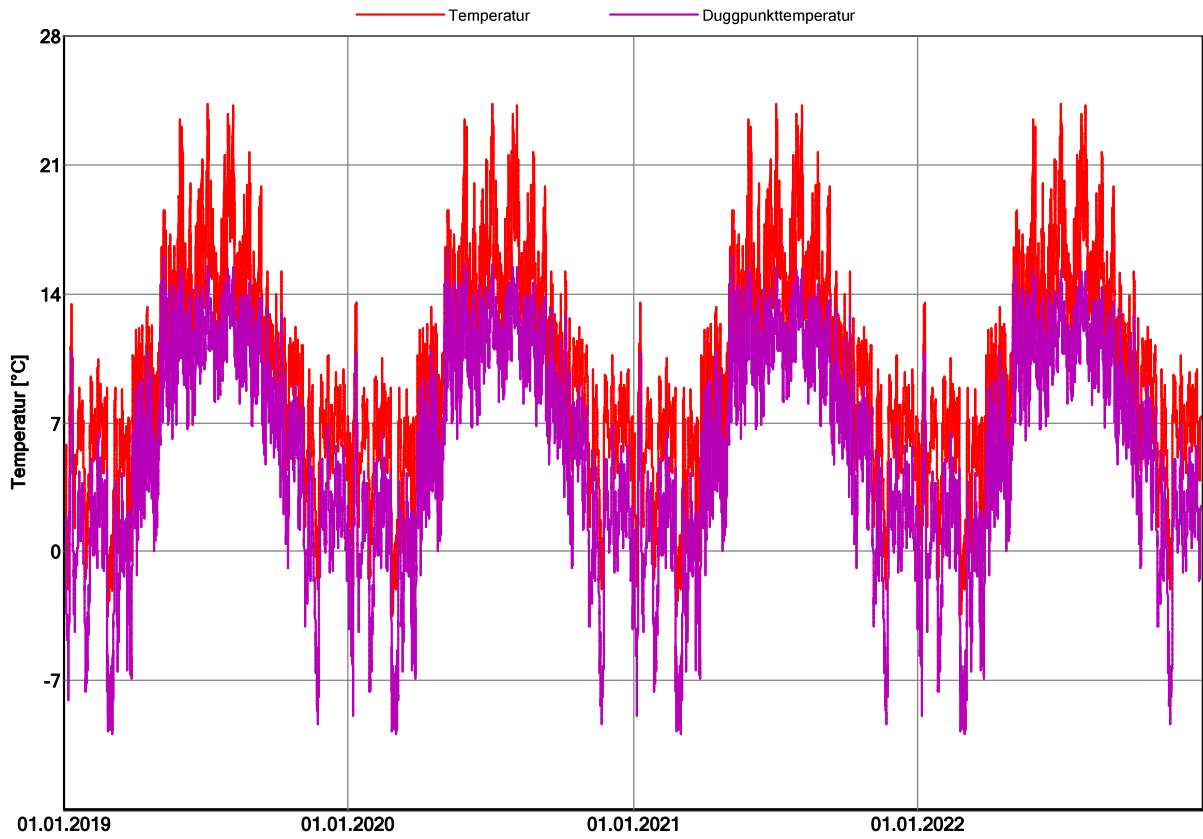
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,052892 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

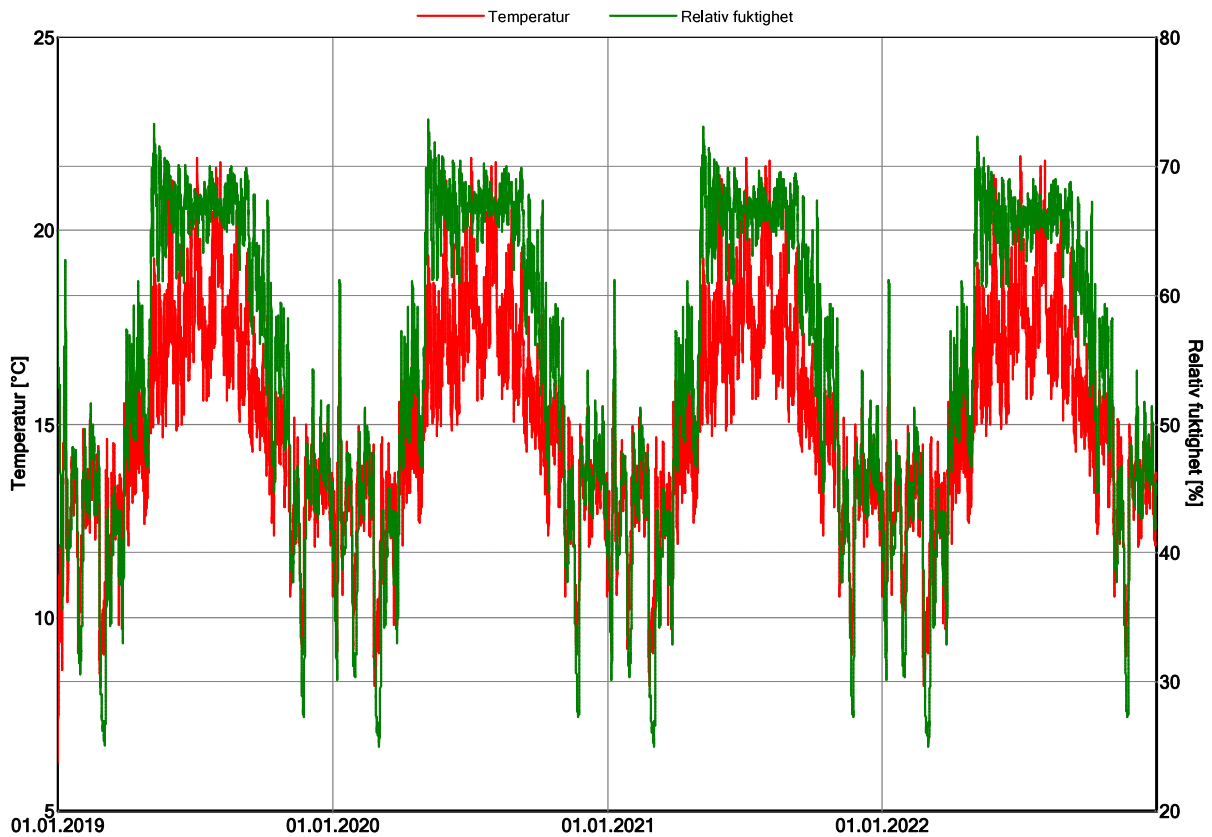
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,052892 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019;w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer bygglukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

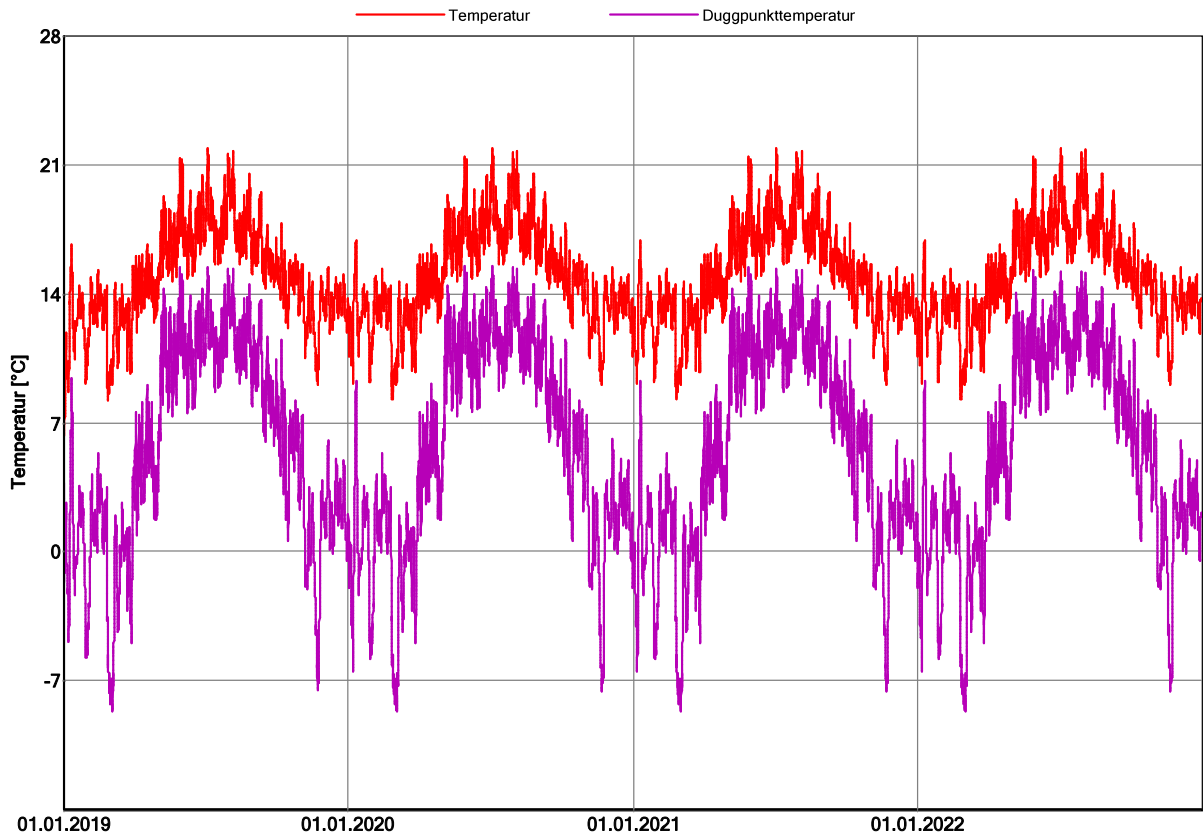
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019;w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer bygglukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

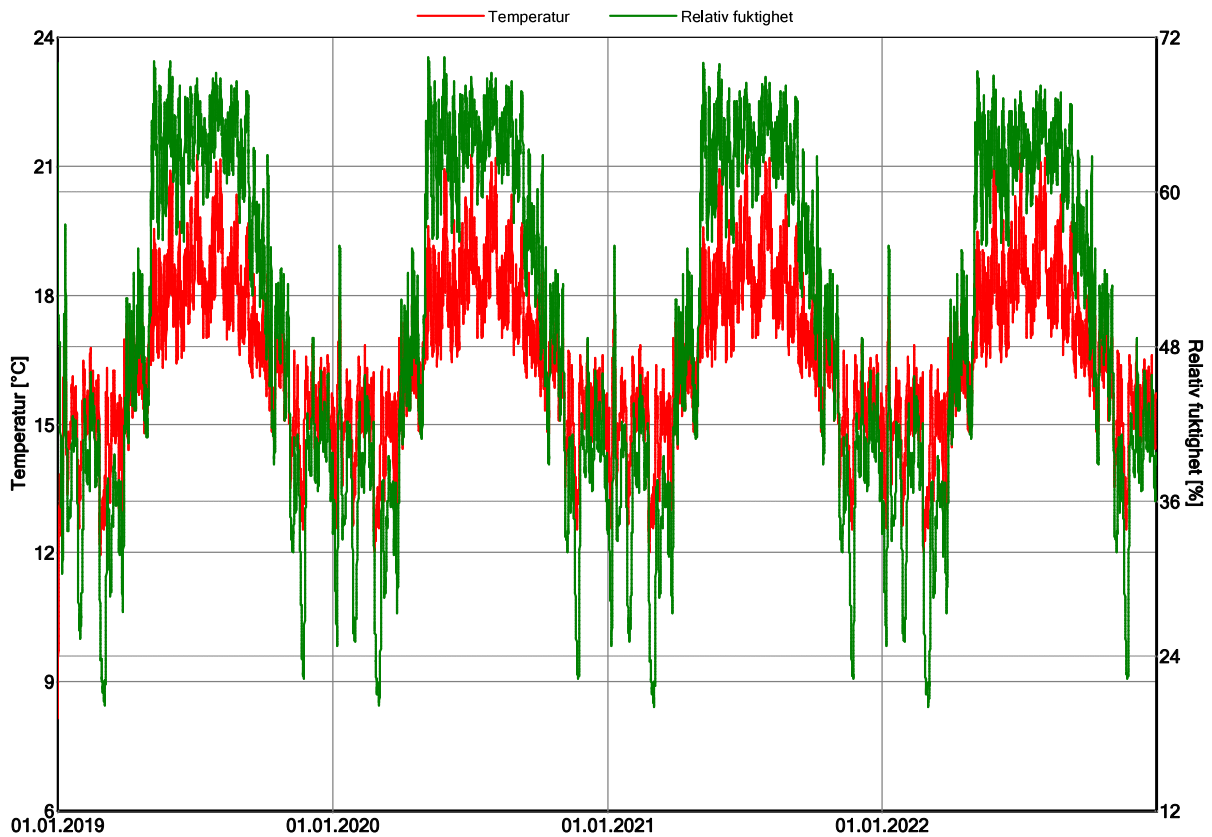
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

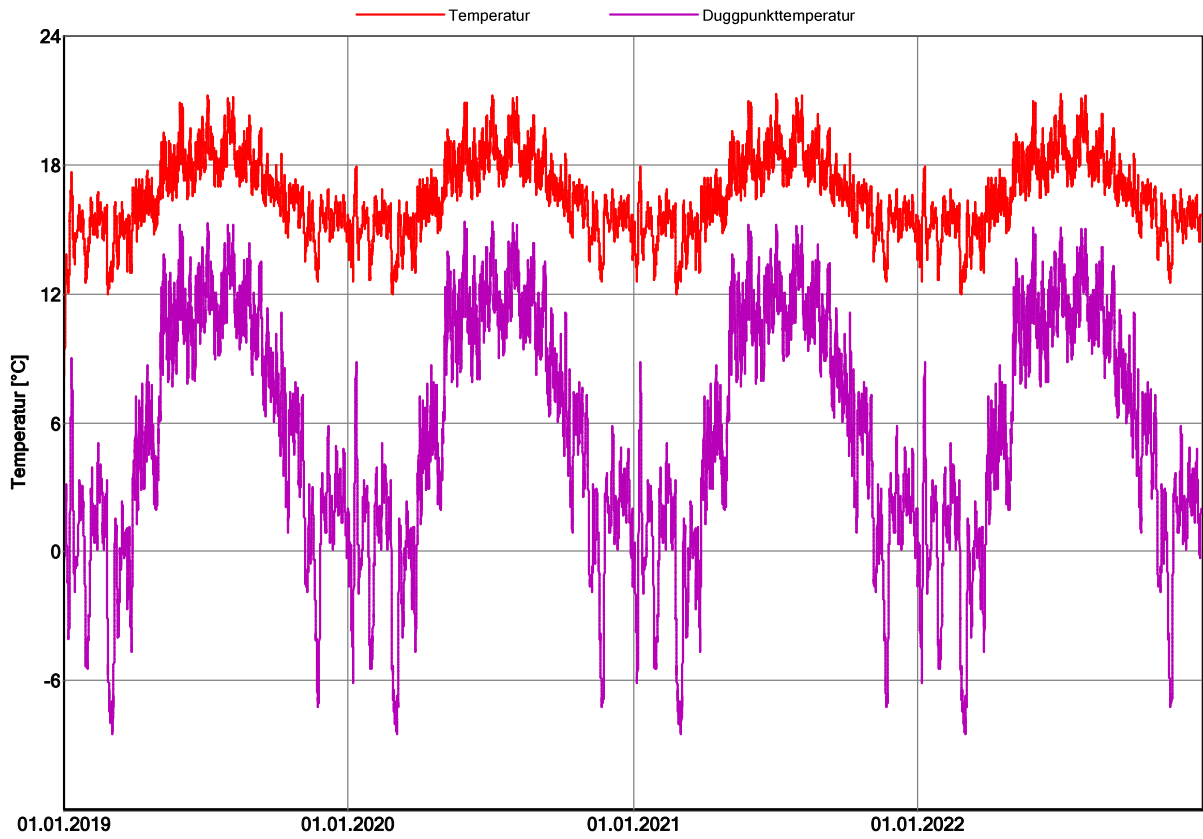
### EPS (Varmekoduktivitet: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

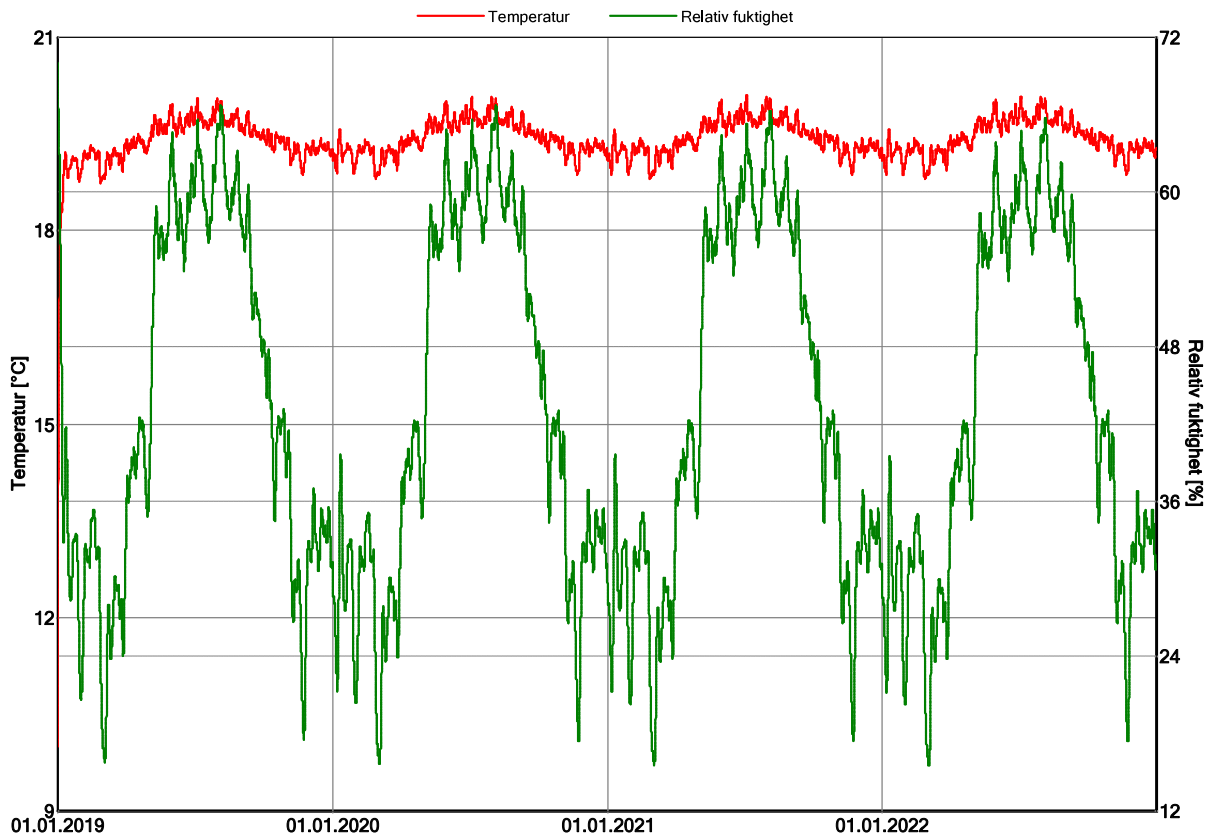
EPS (Varmekoduktivitet: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer bygglukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

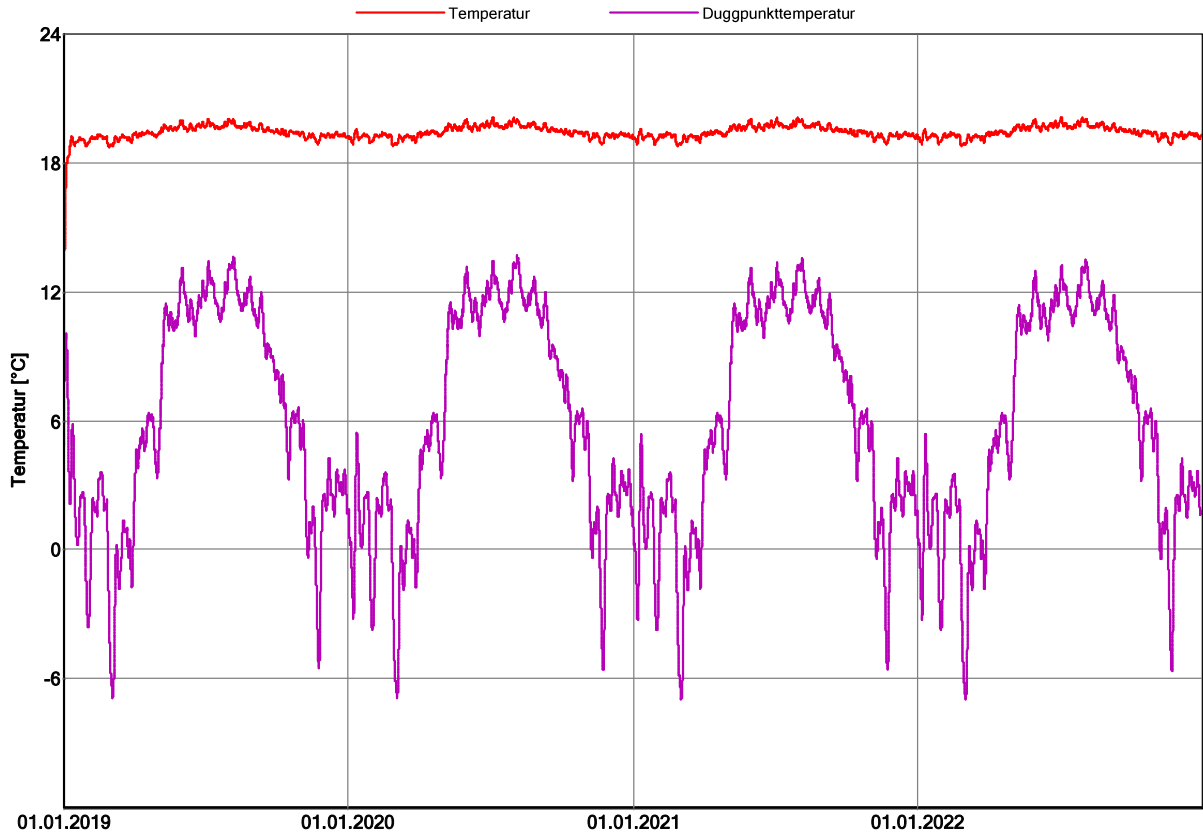
EPS (Varmekoduktivitet: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,049921 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019.w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer bygglukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,049921 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019;w6p; Variant 6: #9 Aerogel terrasse uten betongdekke mer byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

## 8 Terrassekonstruksjon med aerogel uten betongdekke, lite byggfukt

## Prosjektdata

Prosjektnavn Superisolasjon, bacheloroppgave

Prosjektnummer

Oppdragsgiver NTNU og Rambøll

Kontaktperson Frida Ulla og Ingrid Astrup

Postnr/Sted

Adresse

Tel.

Faks

E-post

Ansvarlig Frida Ulla og Ingrid Astrup

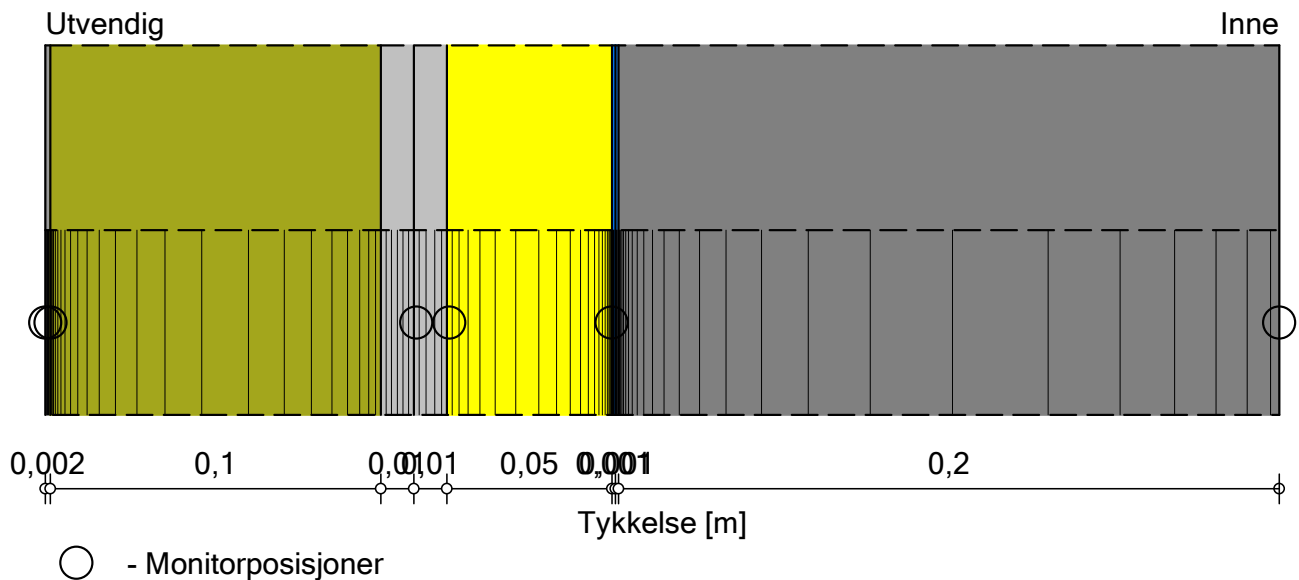
Kommentarer Analyse av bygningsdeler med VIP eller aerogel.

Dato 25.03.2019











## Konstruksjonsoppbygging

Variant: #6 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt



### Materialer:

	- PVC membrane	0,002 m
	- ROCKWOOL TOPROCK DD	0,1 m
	- Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	0,01 m
	- Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	0,01 m
	- EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,001 m
	- Betong B45	0,2 m

Samlet tykkelse: 0,374 m

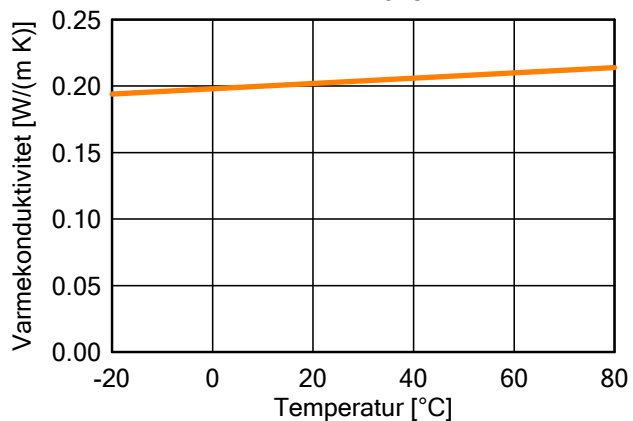
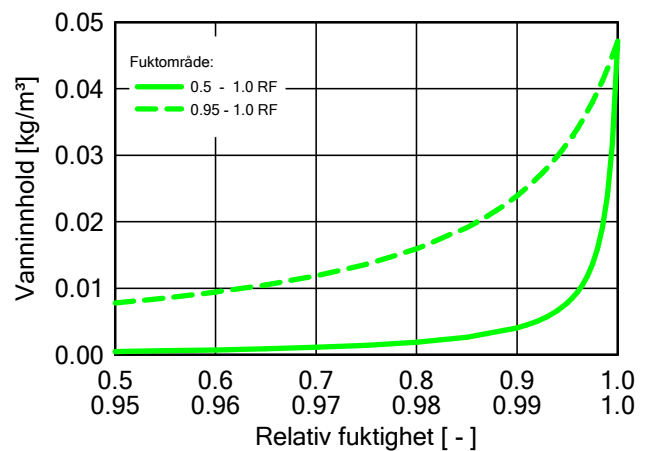
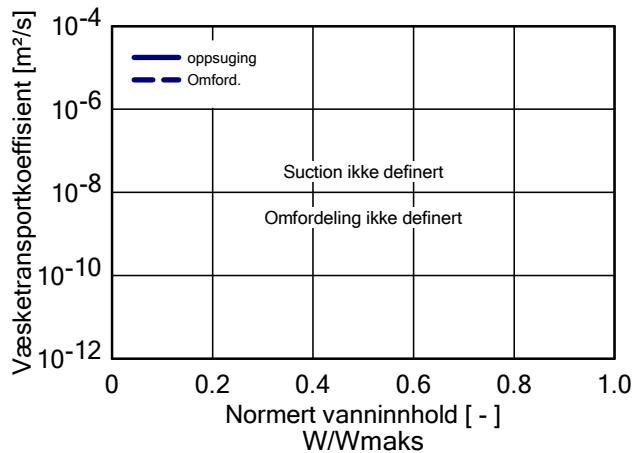
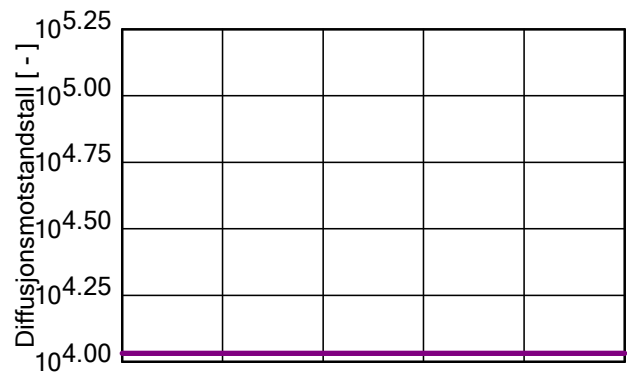
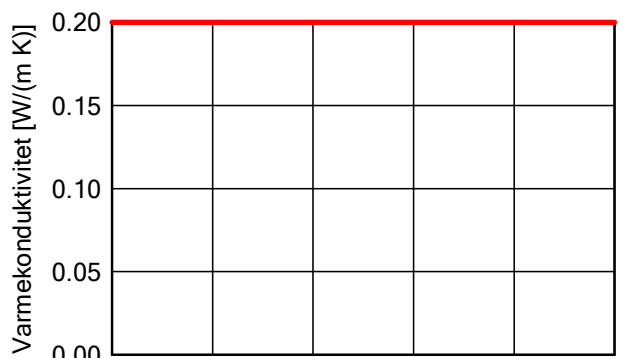
Varmemotstand: 5,48 (m<sup>2</sup> K)/W

U-verdi: 0,177 W/(m<sup>2</sup> K)

# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: PVC membrane

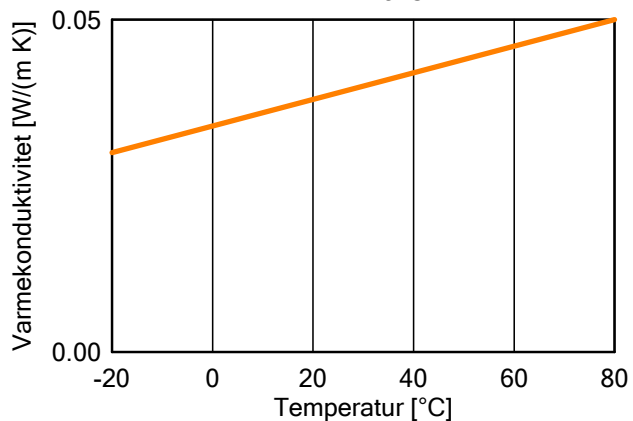
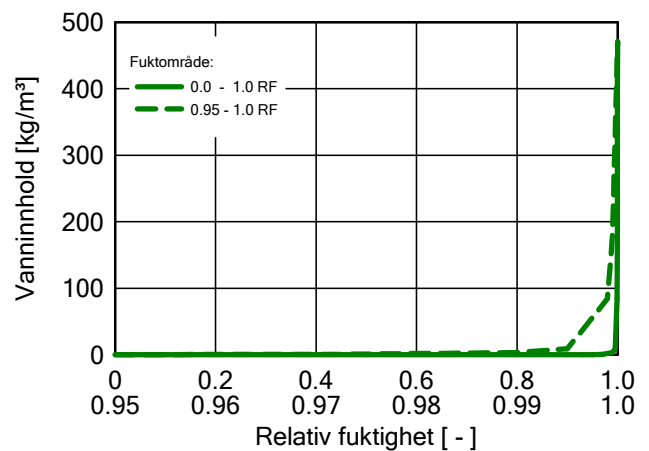
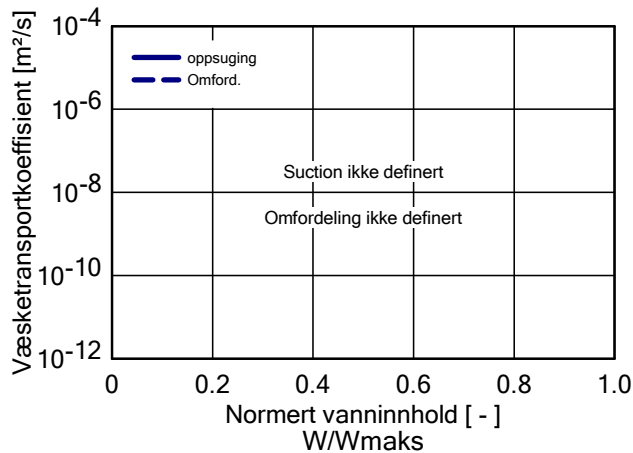
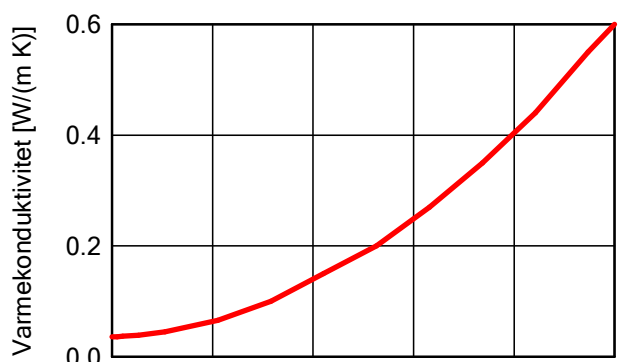
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	10761
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: ROCKWOOL TOPROCK DD

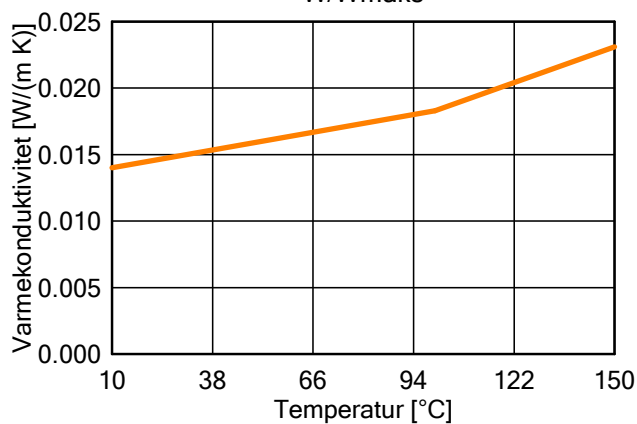
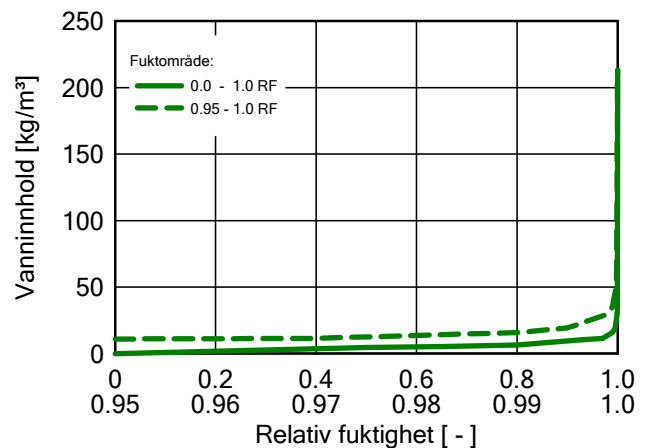
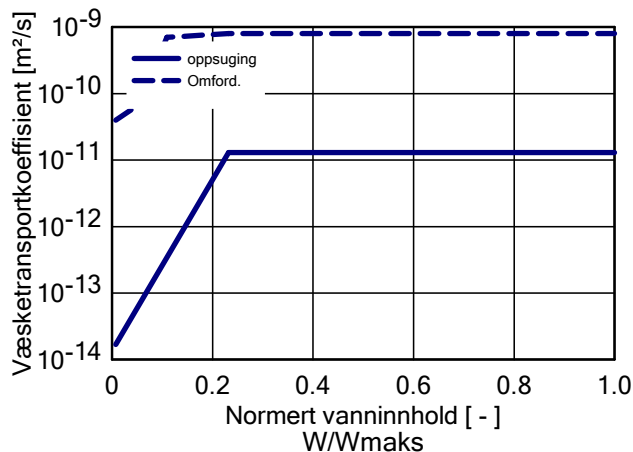
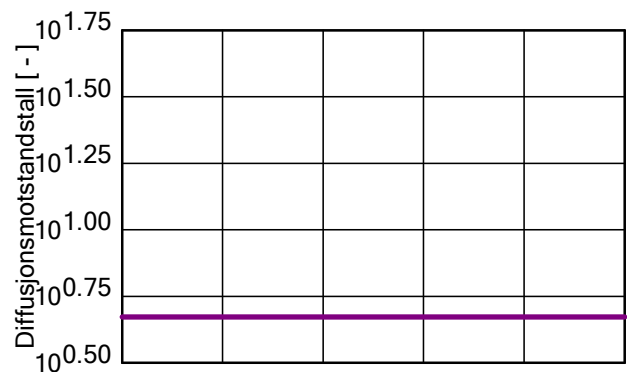
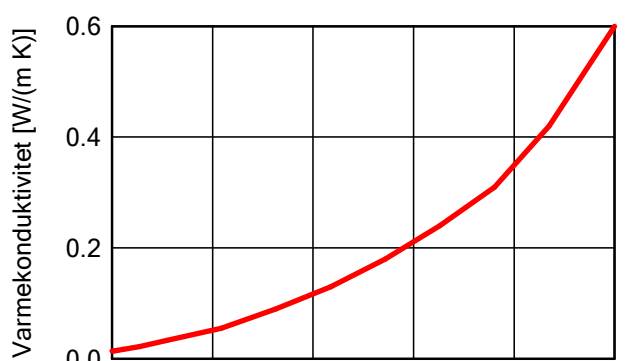
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	176
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.036
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	1.2
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Aspen Aerogels - Spaceloft Grey

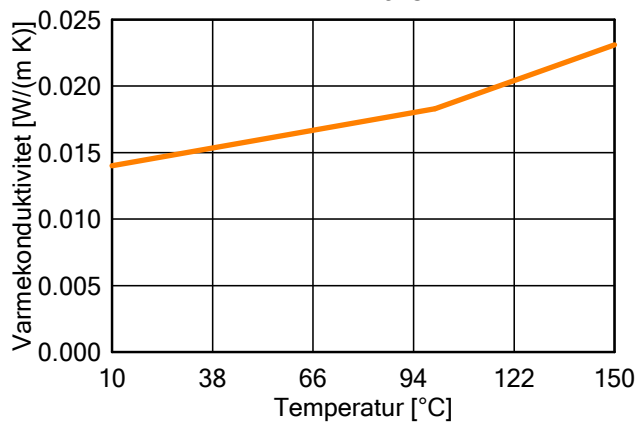
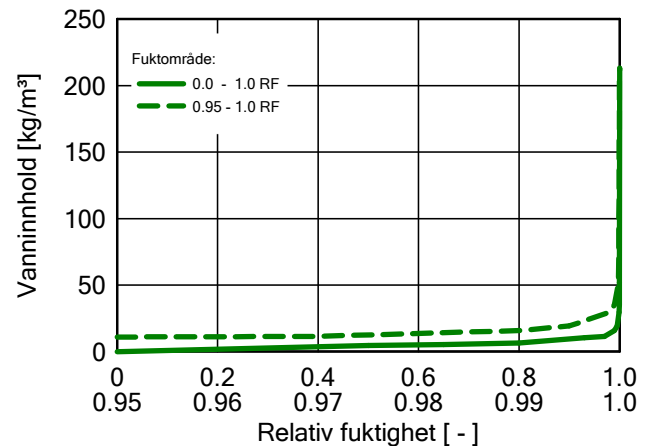
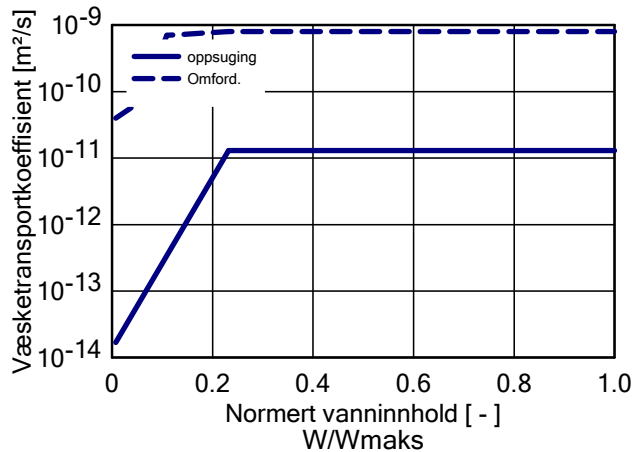
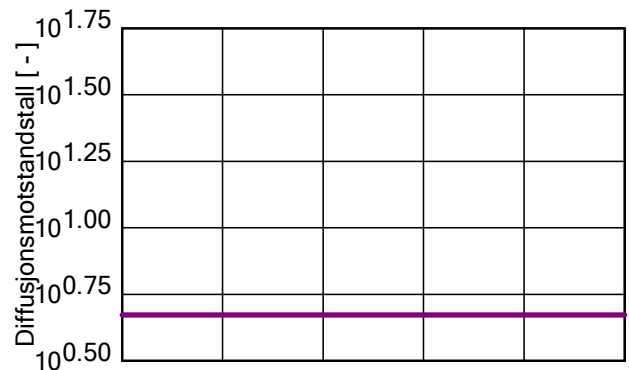
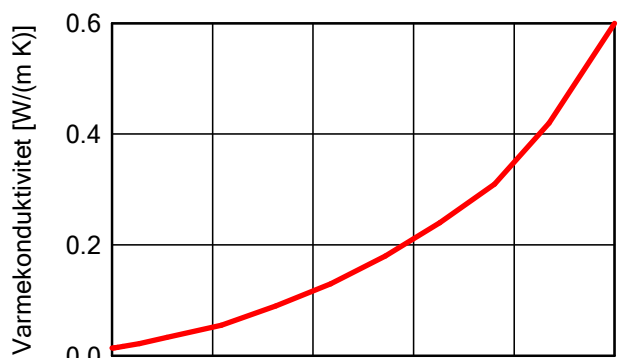
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	146
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.92
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1000
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.014
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	4.7



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Aspen Aerogels - Spaceloft Grey

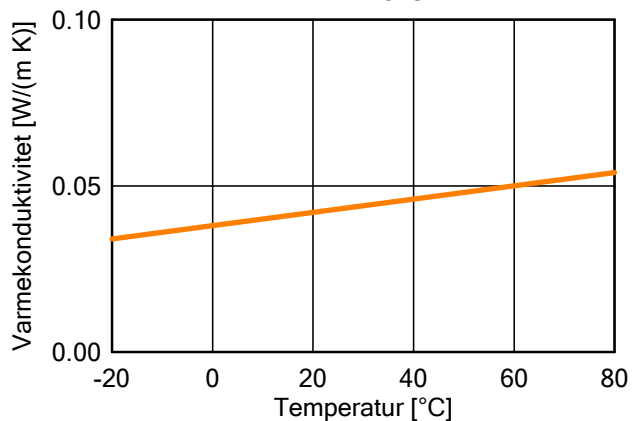
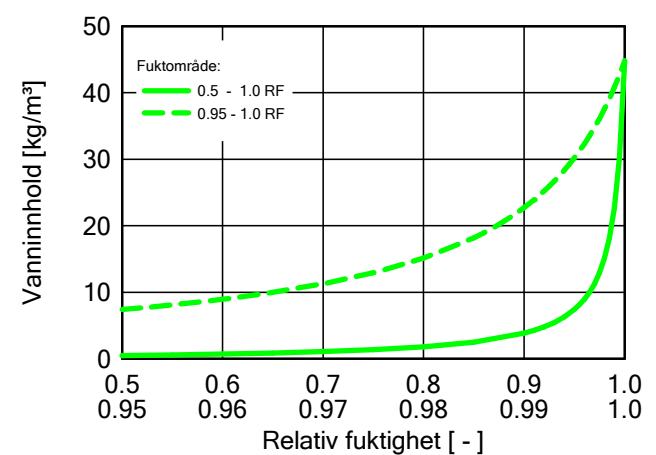
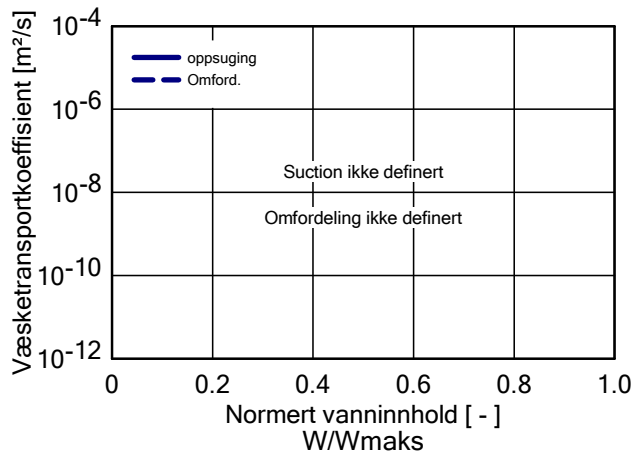
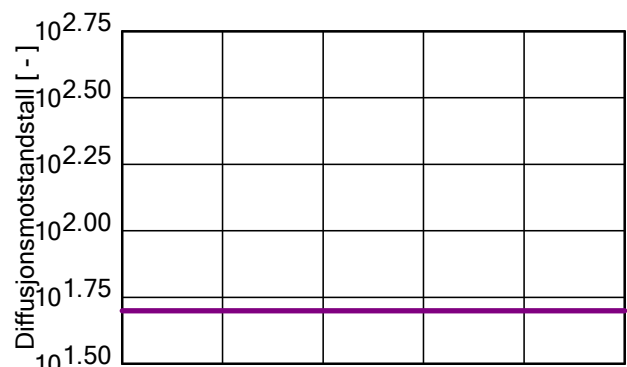
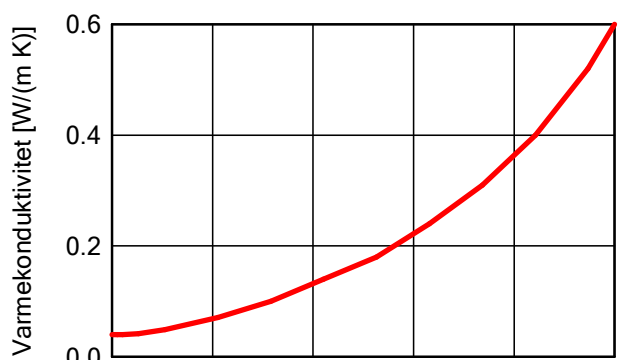
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	146
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.92
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1000
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.014
Vanndampdiffusjonsmotstand	[-]	4.7



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>)

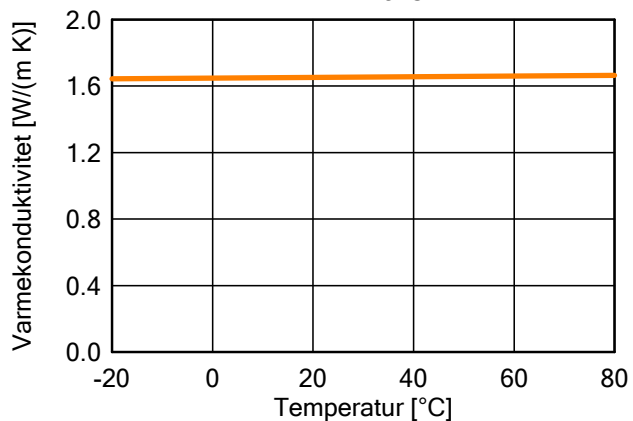
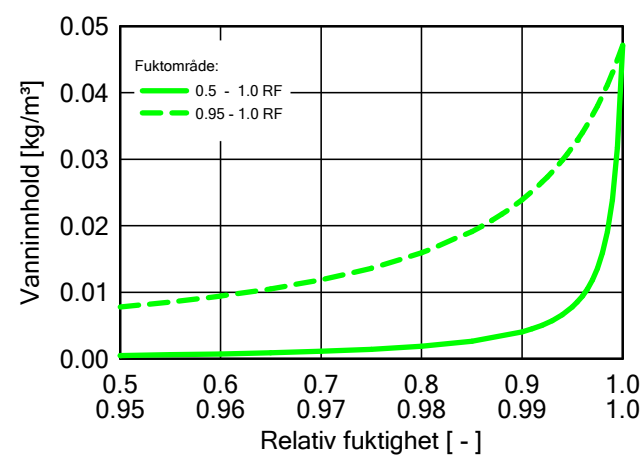
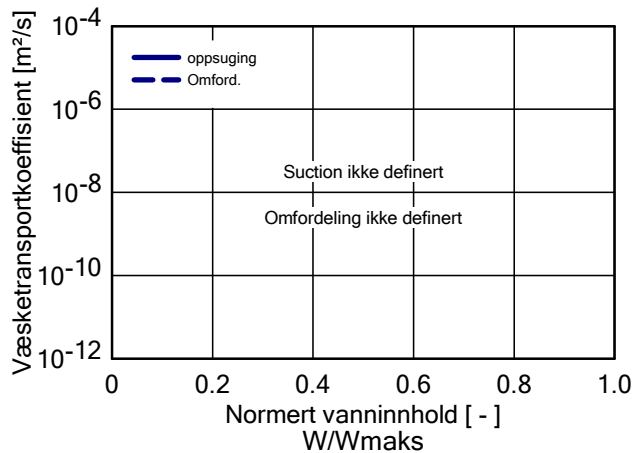
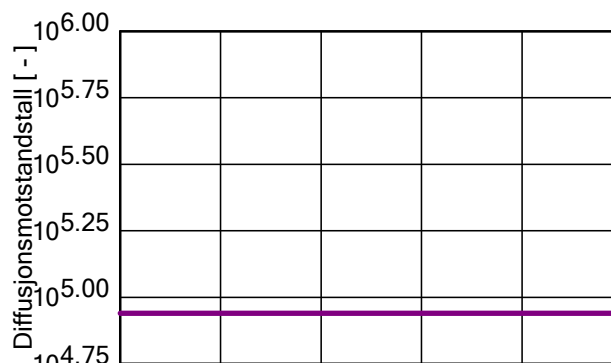
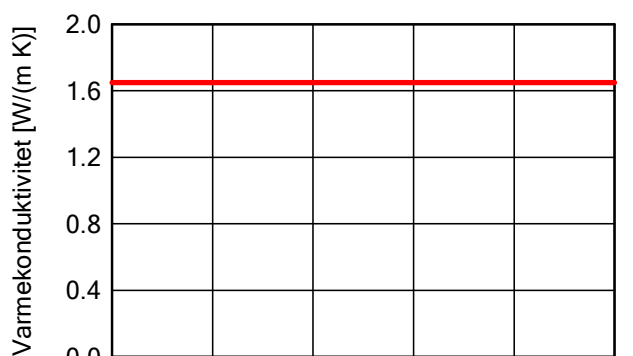
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	30
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.95
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	1500
Varmekoduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	0.04
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	50
Temp.-avh. varmekodukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

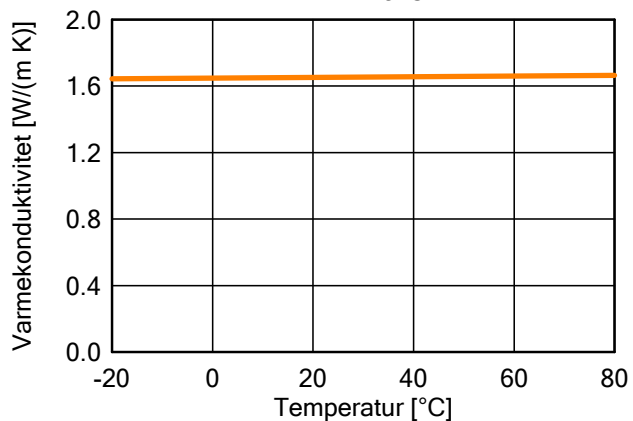
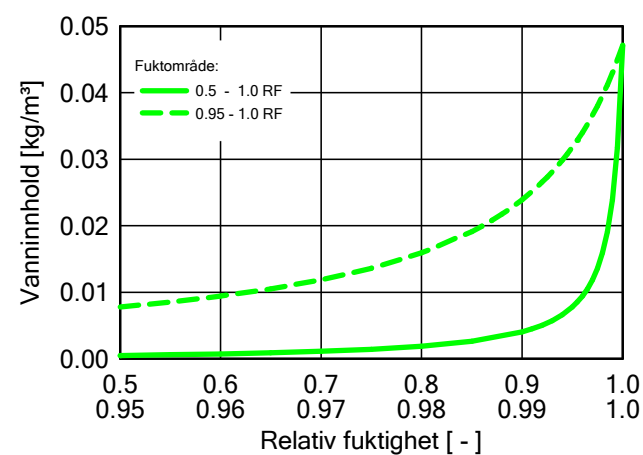
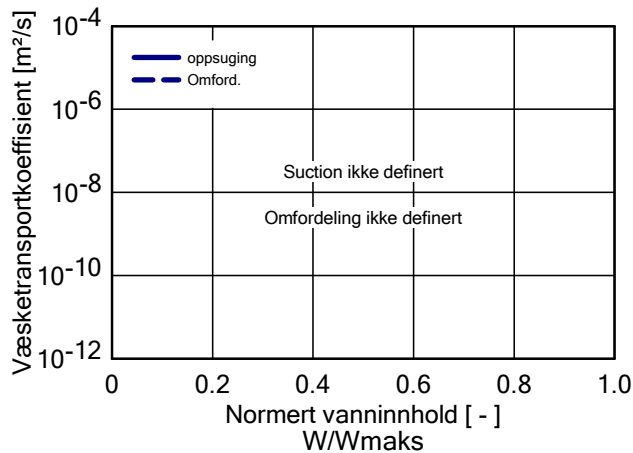
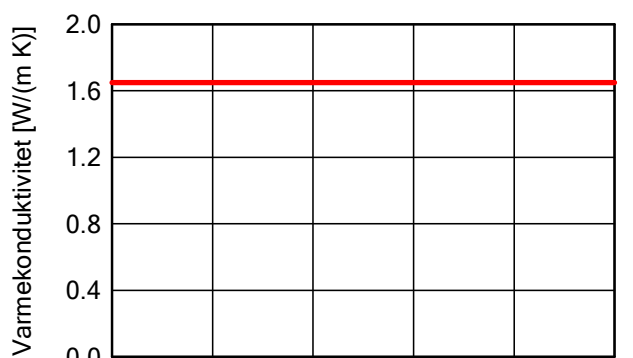
Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

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

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	130
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.001
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	2200
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.65
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	87000
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002

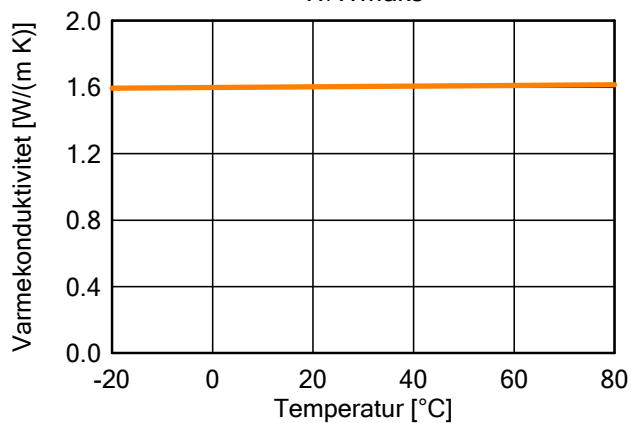
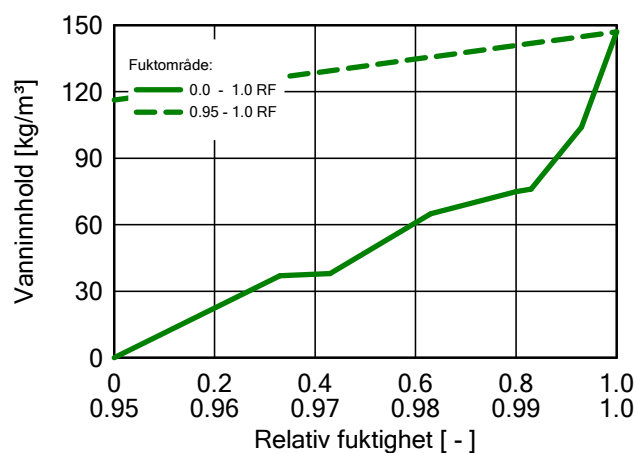
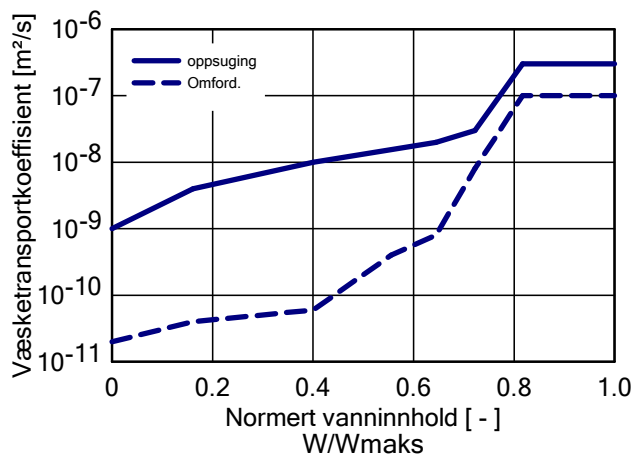
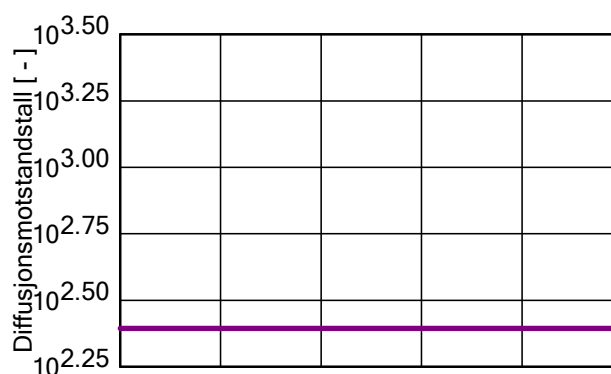
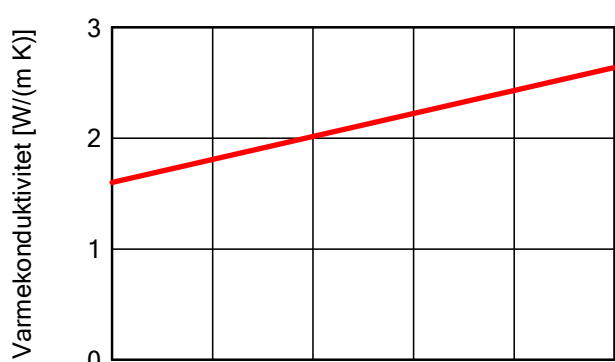




# WUFI Pro 6.2 NonCommercial

Materiale: Betong B45

Egenskap	Enhet	Verdi
Romdensitet	[kg/m <sup>3</sup> ]	2220
Porøsitet	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.18
Spes. varmekapasitet, tørr	[J/(kg K)]	850
Varmekonduktivitet tørr, 10°C	[W/(m K)]	1.6
Vanndampdiffusjonsmotstand	[ - ]	248
Varmekonduktivitetsspåslag	[%/M.-%]	8
Temp.-avh. varmekondukt. Tillegg	[W/(m K <sup>2</sup> )]	0.0002



## Randvilkår

## Ute (venstre side)

Sted for klima: Trondheim; NBI / NTNU  
 Temperaturforskyvning: 0.0 °C  
 Orientering / Helning: Vest / 0 °  
 Avkjøling ved stråling om natten: nei

## Inne (høyre side)

Inneklima: EN 13788  
 Fuktklasse 3; Temperatur: 20 °C

## Overflaters overgangskoeffisient

## Ute (venstre side)

Navn	Merknader	Enhet	Verdi
Varmemotstand - inkluderer langbølget strålingsbidrag	Tak	[(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 ja
Sd-verdi	Ingen overflatebehandling	[m]	----
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall	Lys	[-]	0.2
Langbølget strålingsemissivitet	Lys	[-]	0.9
Regnvannabsorpsjonstall	Avhengig av komponenthe	[-]	1,0
Eksplisitt strålingsbalanse			nei

## Inne (høyre side)

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

## Resultater fra siste beregning

## Status for beregning

Dato/tid for beregning	04.05.2019 14:30:10
Regnetid	1 min,28 sek.
Begynn / Avslutt beregning	01.01.2019 / 01.01.2023
Antall konvergensfeil	5

## Numerisk kvalitetssjekk

Samlet fukttransport, utv. (kl,dl)	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0 -0,12
Samlet fukttransport, innv. (kr,dr)	[kg/m <sup>2</sup> ]	9,43 2,28
Balanse 1	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,83
Balanse 2	[kg/m <sup>2</sup> ]	-11,83

Vanninnhold [kg/m<sup>2</sup>]

	Start	Slutt	Min.	Maks.
Totalt vanninnhold	28,12	16,09	16,06	28,12

Vanninnhold [kg/m<sup>3</sup>]

Sjikt/Materiale	Start	Slutt	Min.	Maks.
PVC membrane	0,00	0,01	0,00	0,03
ROCKWOOL TOPROCK DD	0,00	0,56	0,00	1,05
Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	4,72	4,64	2,69	6,08
Aspen Aerogels - Spaceloft Grey	4,72	4,05	2,14	5,75
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK)	0,46	0,25	0,10	0,86
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,00
PE-Folie 0,2 mm (sd = 87 m)	0,00	0,00	0,00	0,01
Betong B45	140,00	79,67	79,55	140,03

## Tidsintegralet av strømningsstetthetene

Varmestrømstetthet, venstre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-2041,5
Varmestrømstetthet, høyre side	[MJ/m <sup>2</sup> ]	-342,54
Fuktstrømmer, venstre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	-0,12
Fuktstrømmer, høyre side	[kg/m <sup>2</sup> ]	11,9

## Hygrotermiske kilder

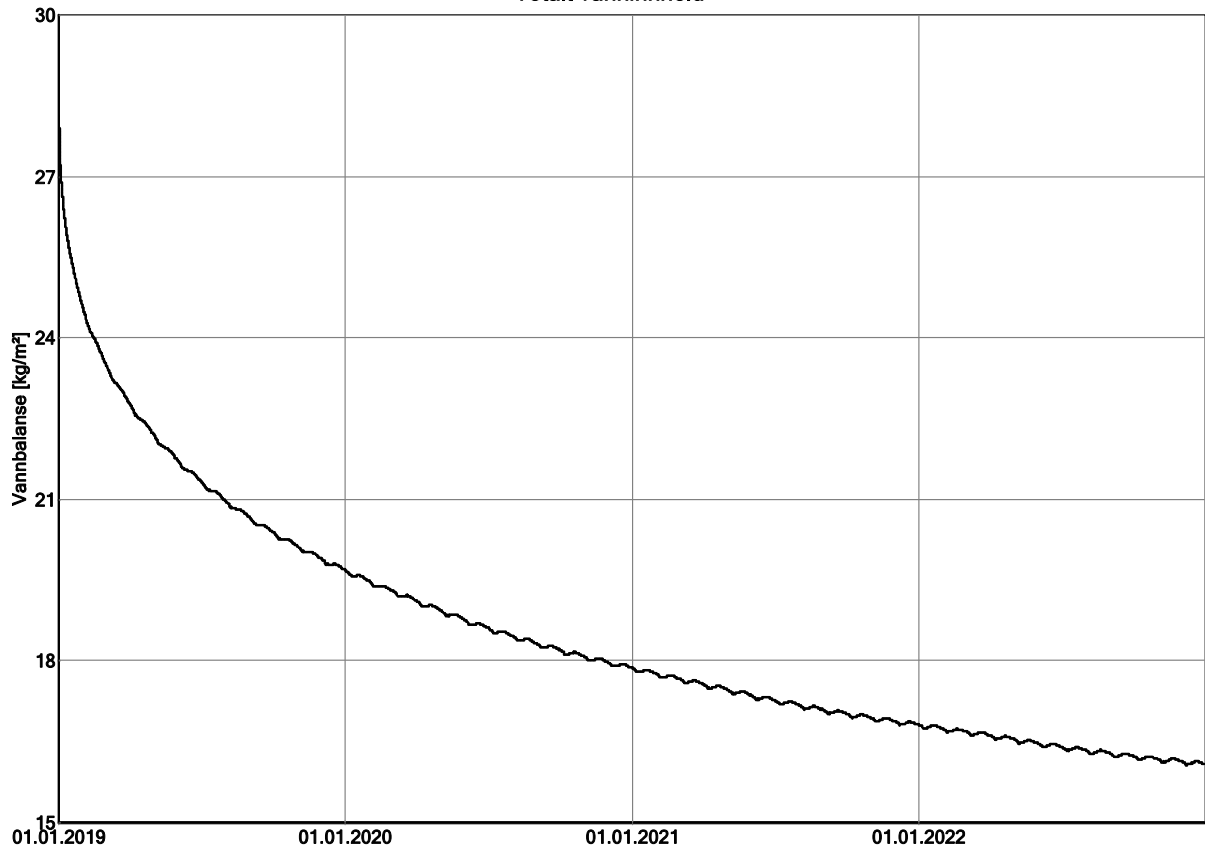
Varmekilder	[MJ/m <sup>2</sup> ]	0,0
Fuktilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0

## WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### Hygrotermiske kilder (Fortsett)

Begrensete fuktkilder	[kg/m <sup>2</sup> ]	0,0
-----------------------	----------------------	-----

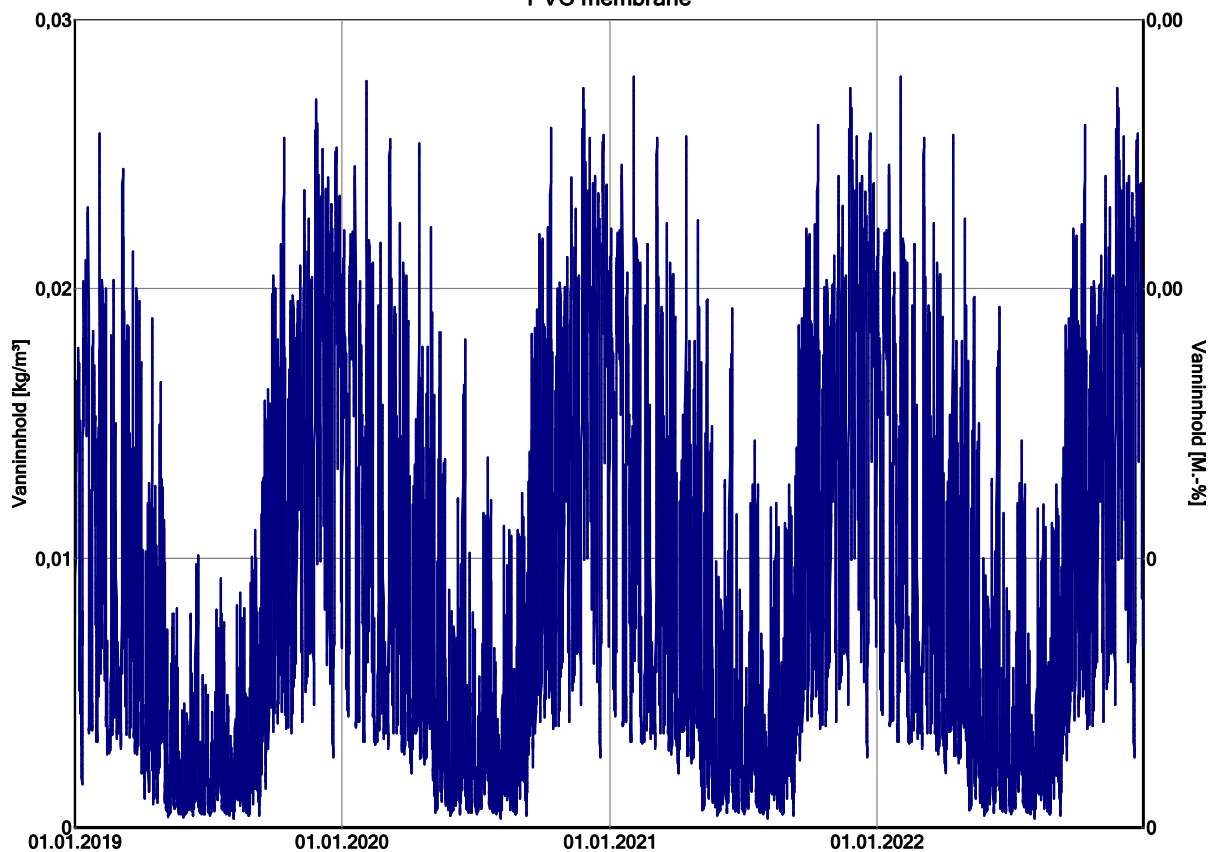
### Totalt vanninnhold



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

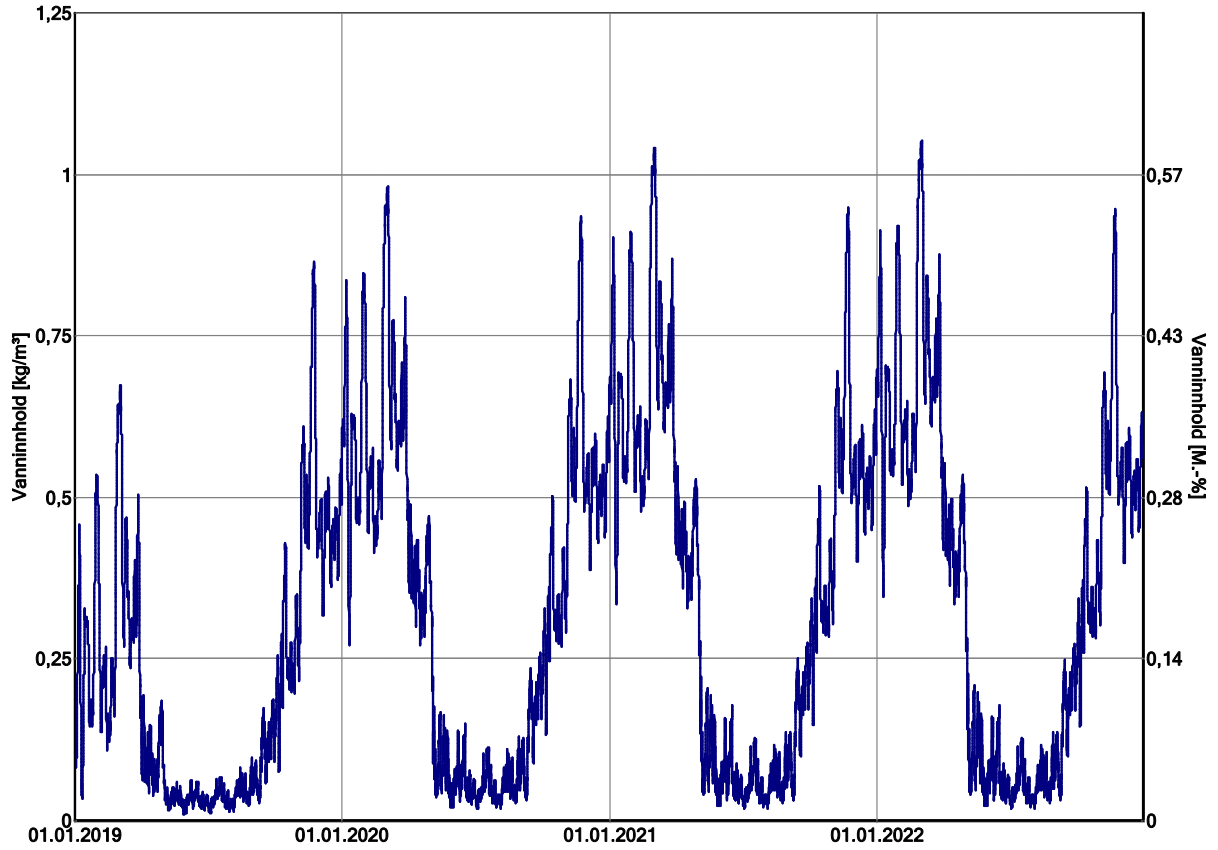
### PVC membrane



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

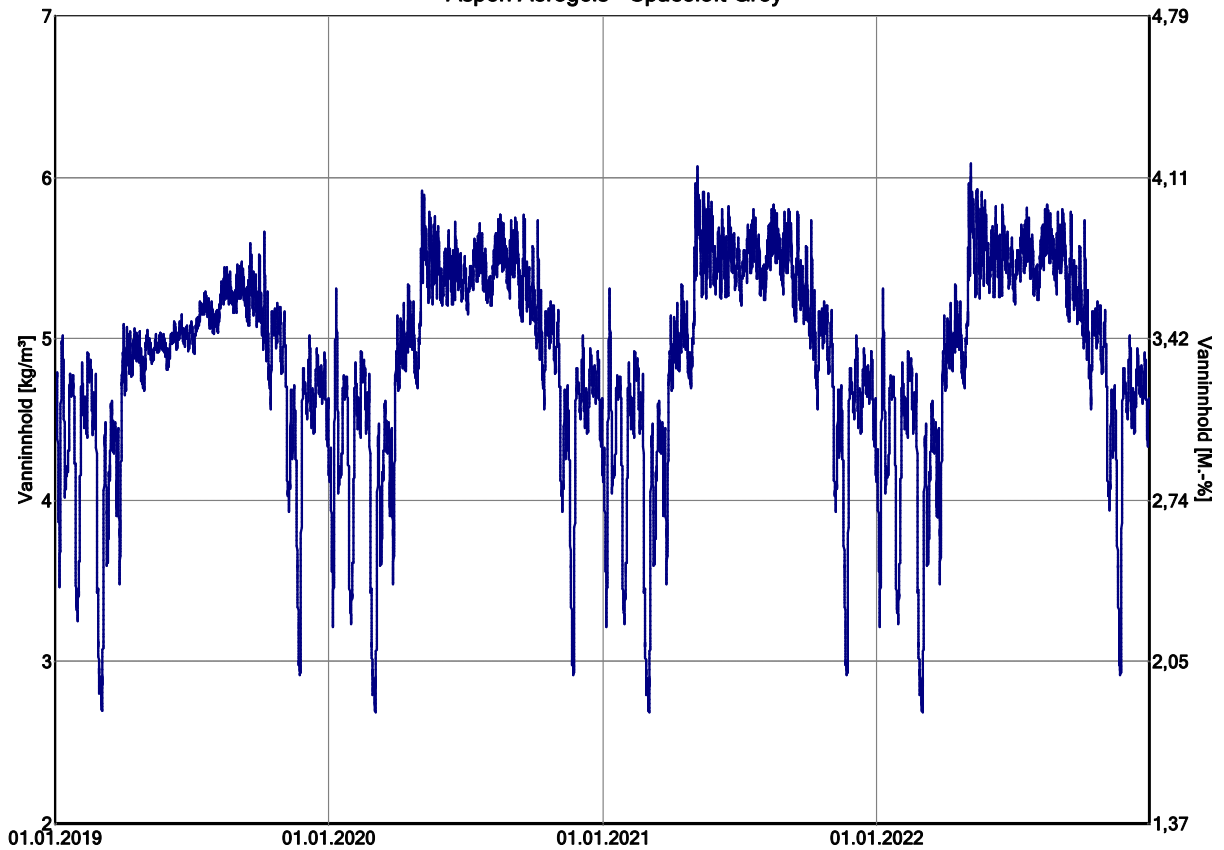
### ROCKWOOL TOPROCK DD



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

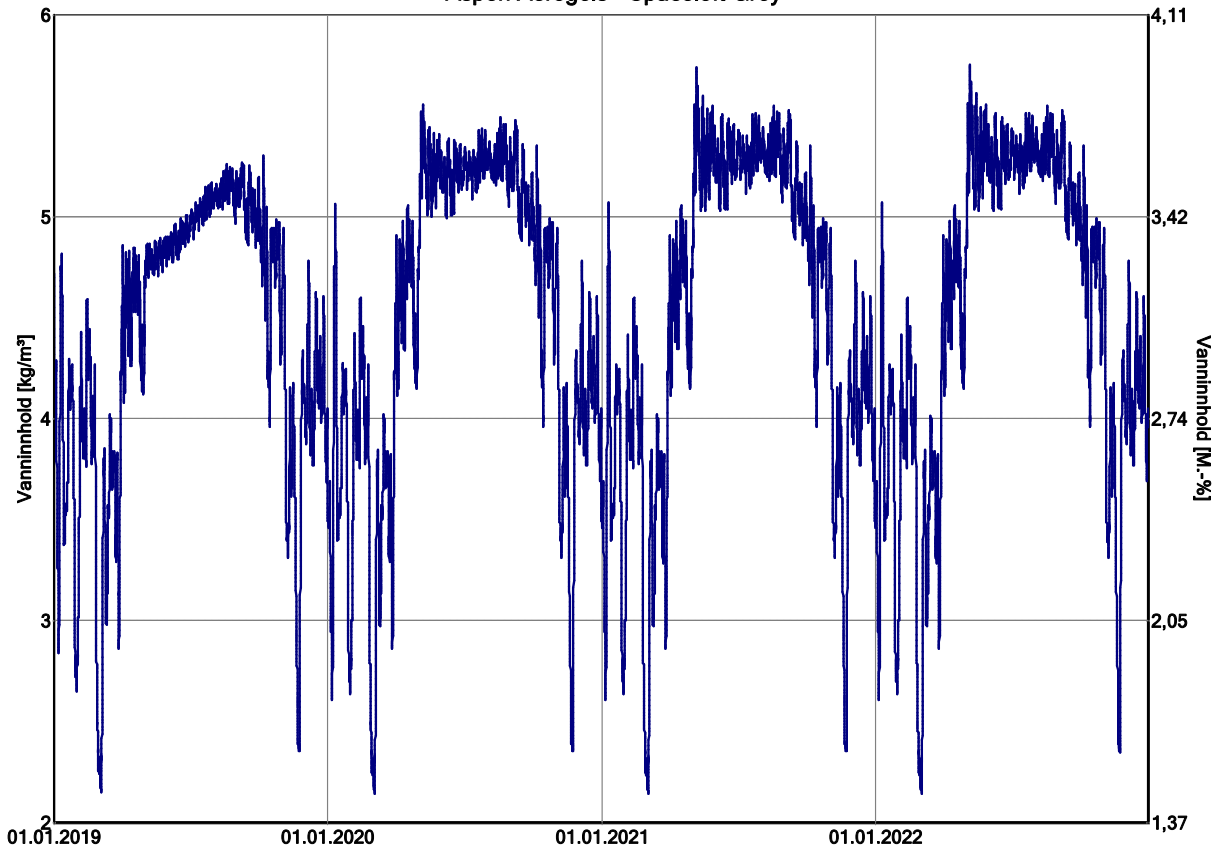
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

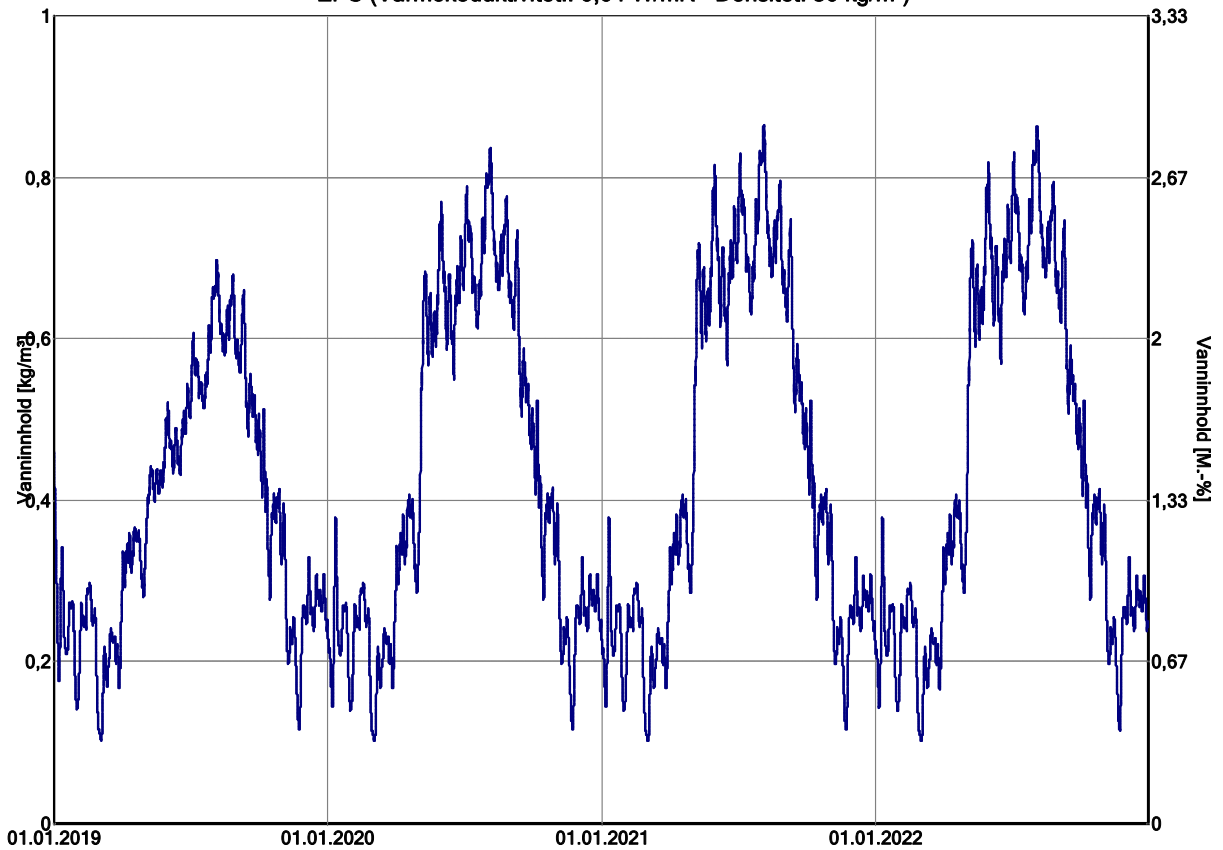
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

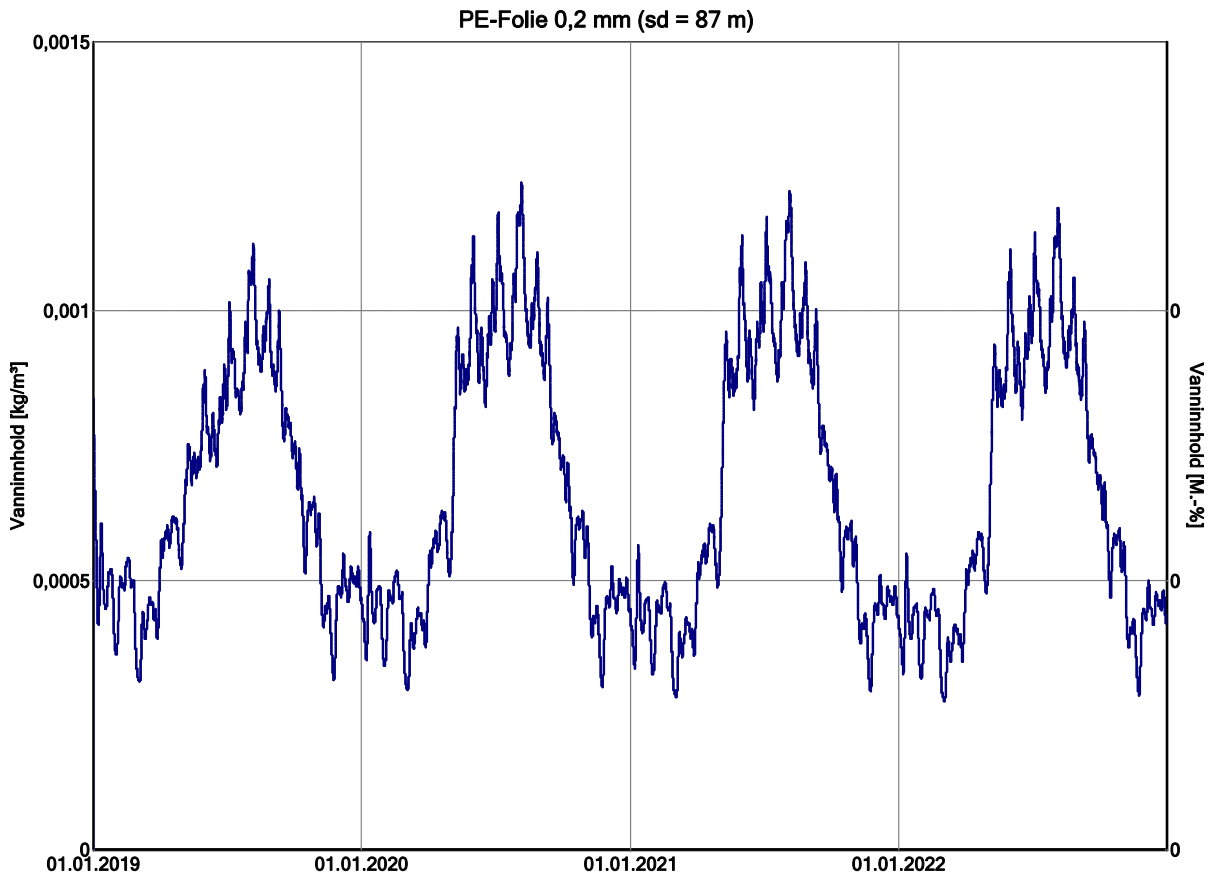
WUFI Pro 6.2 NonCommercial

### EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³)



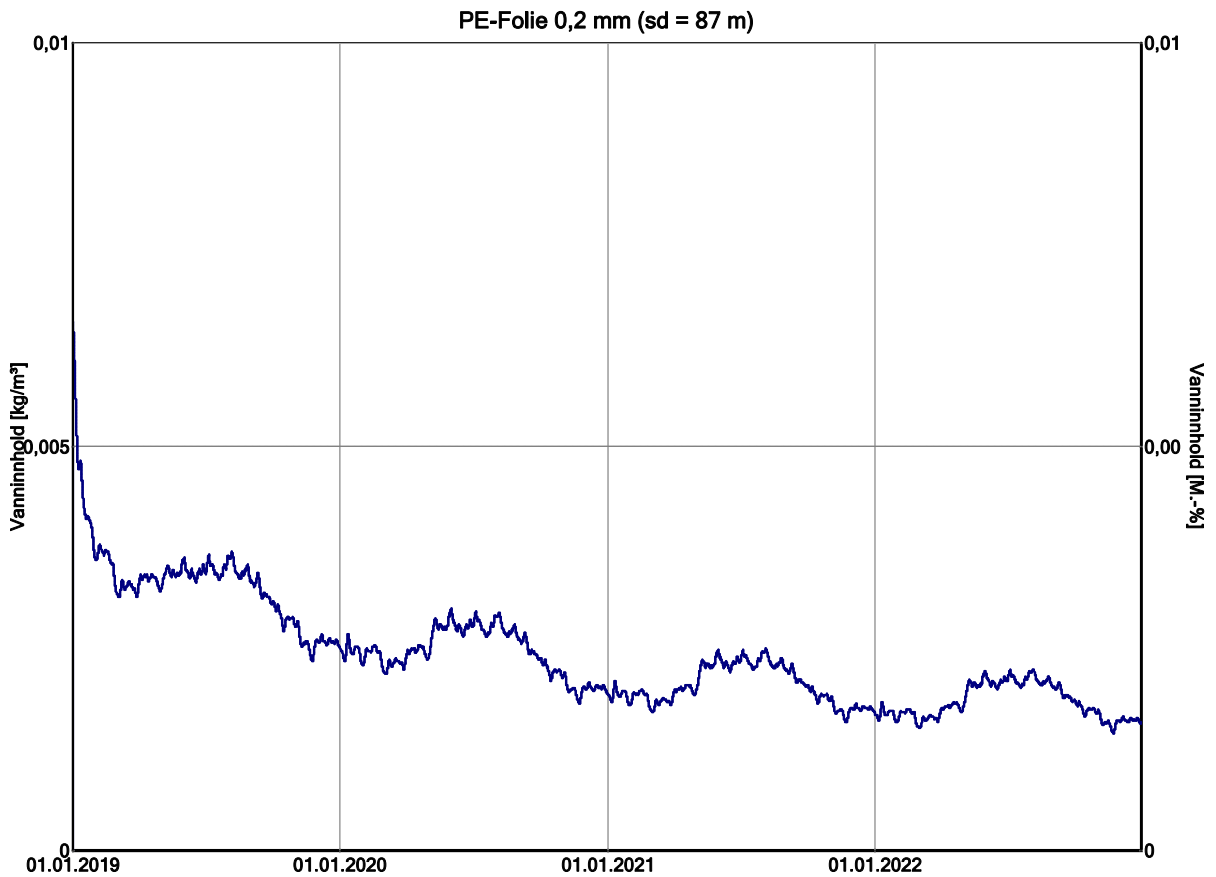
WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

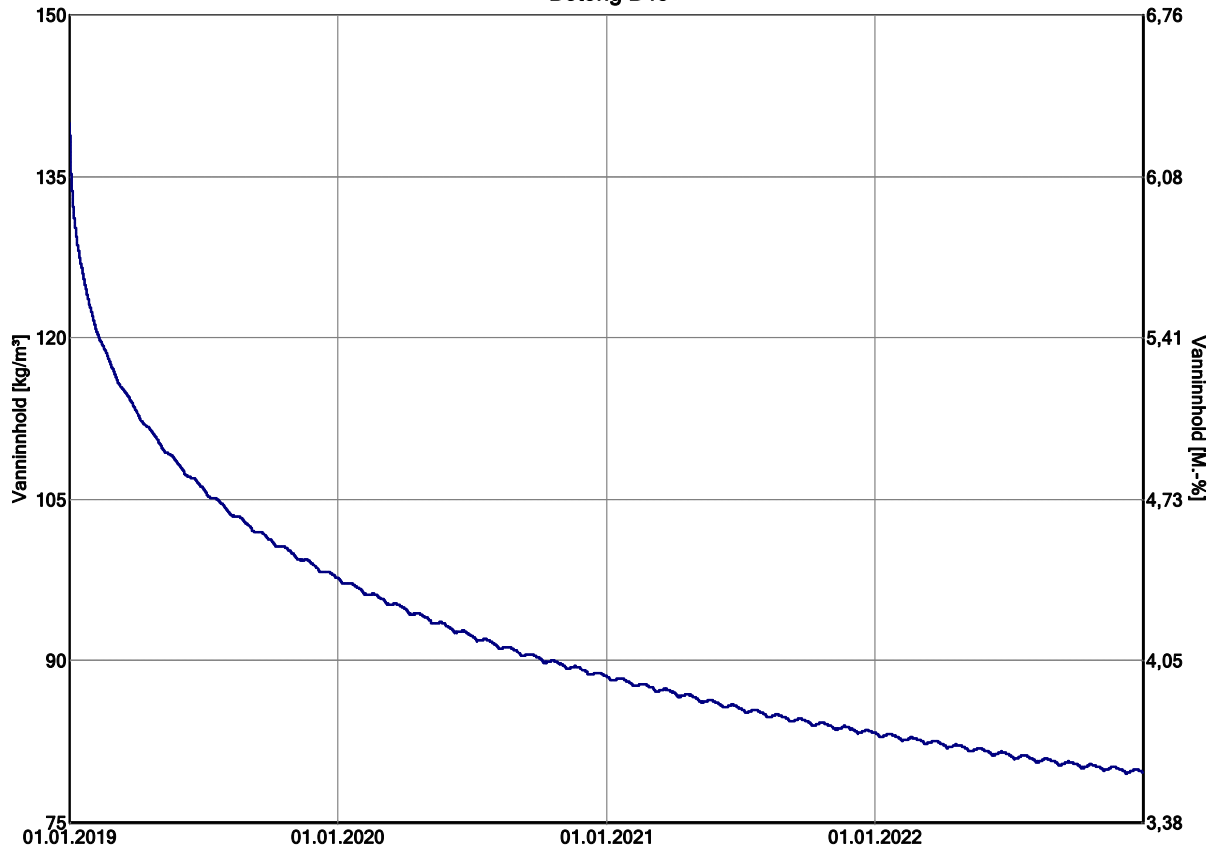


WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial



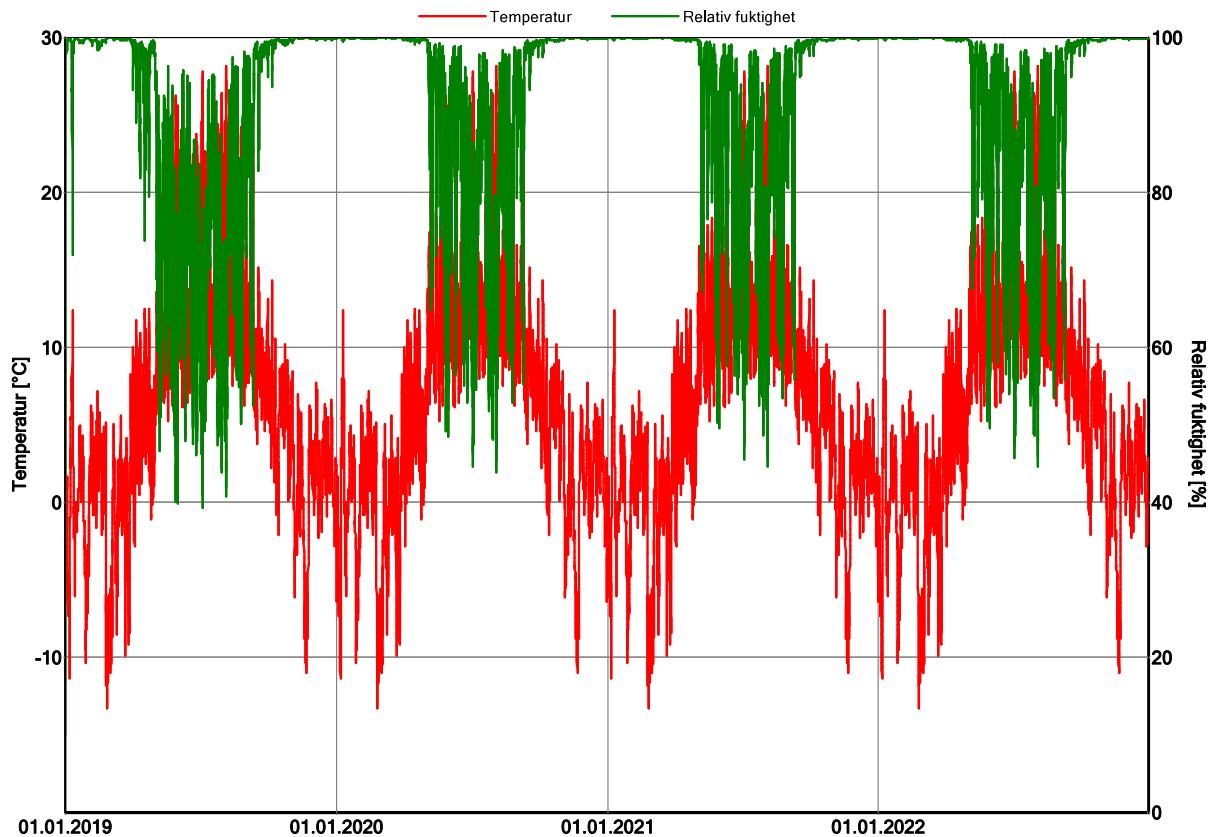
### Betong B45



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

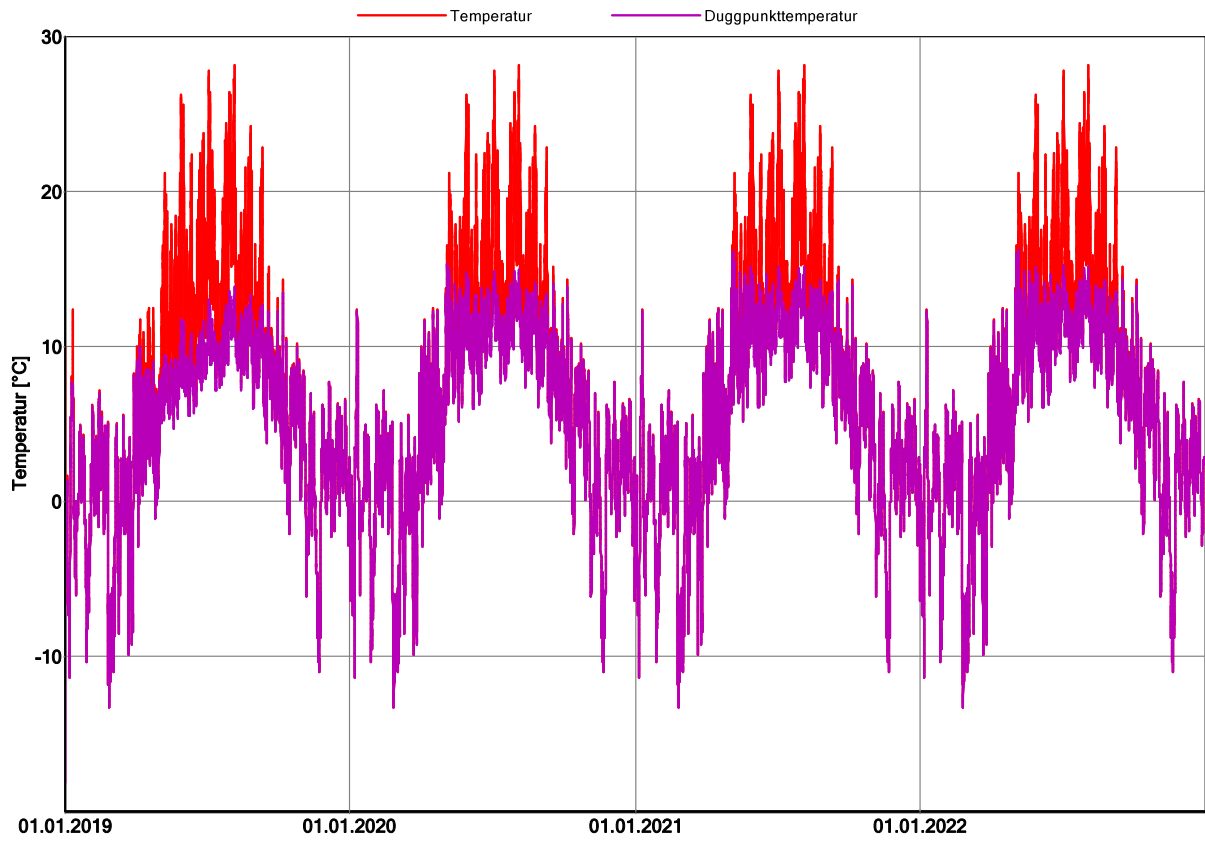
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000121 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

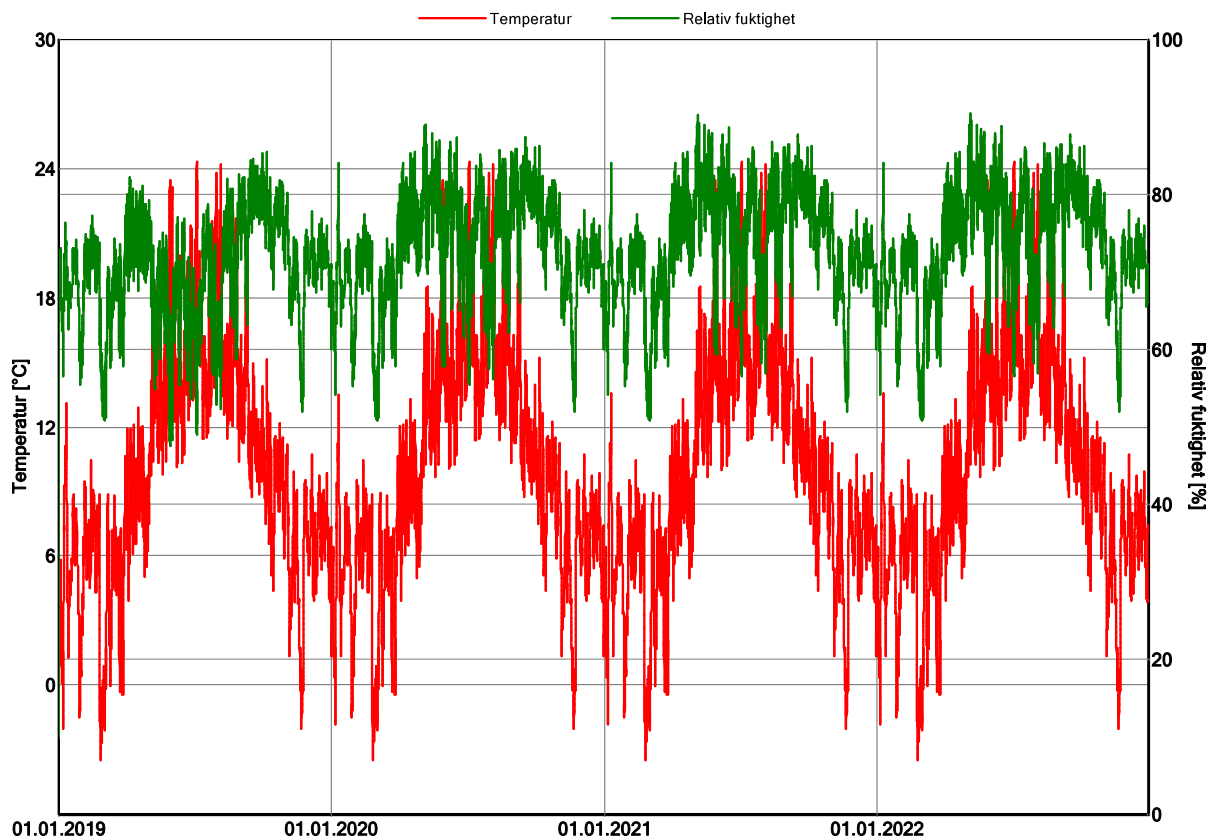
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,000121 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

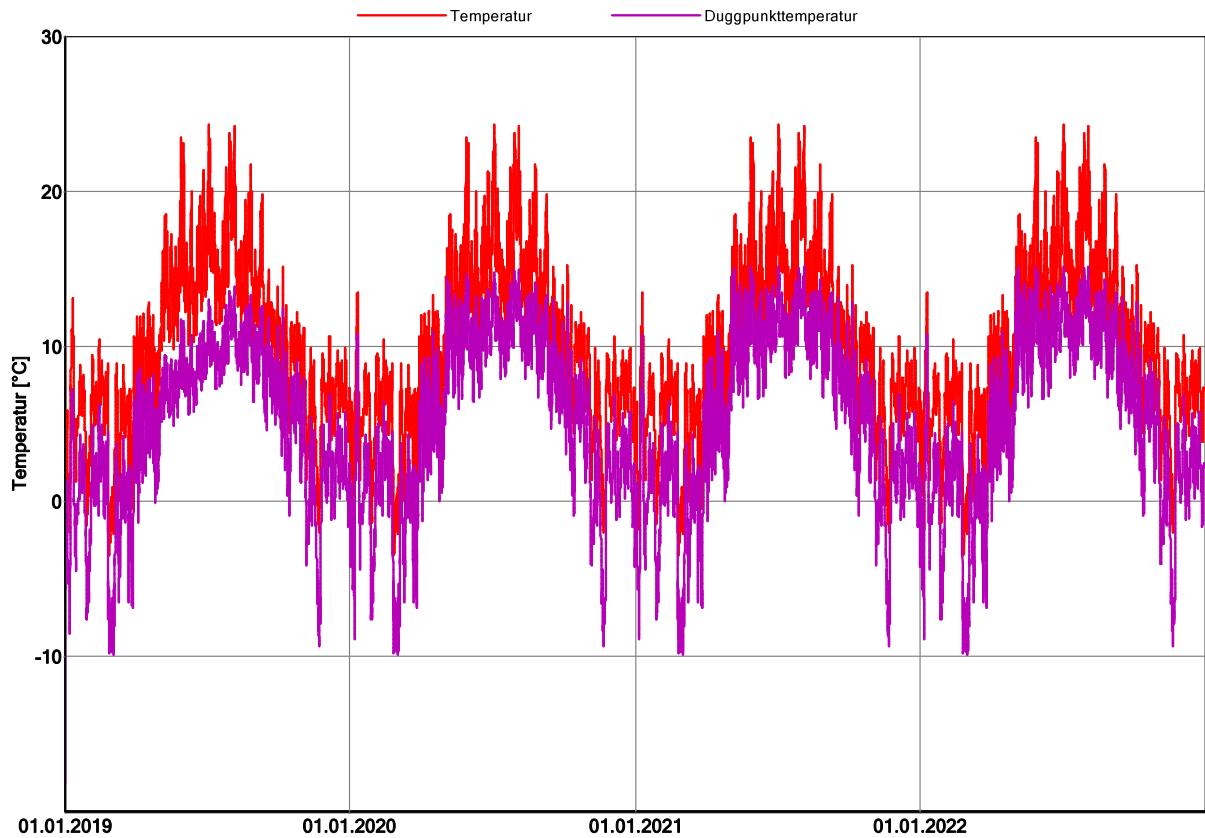
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,052892 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

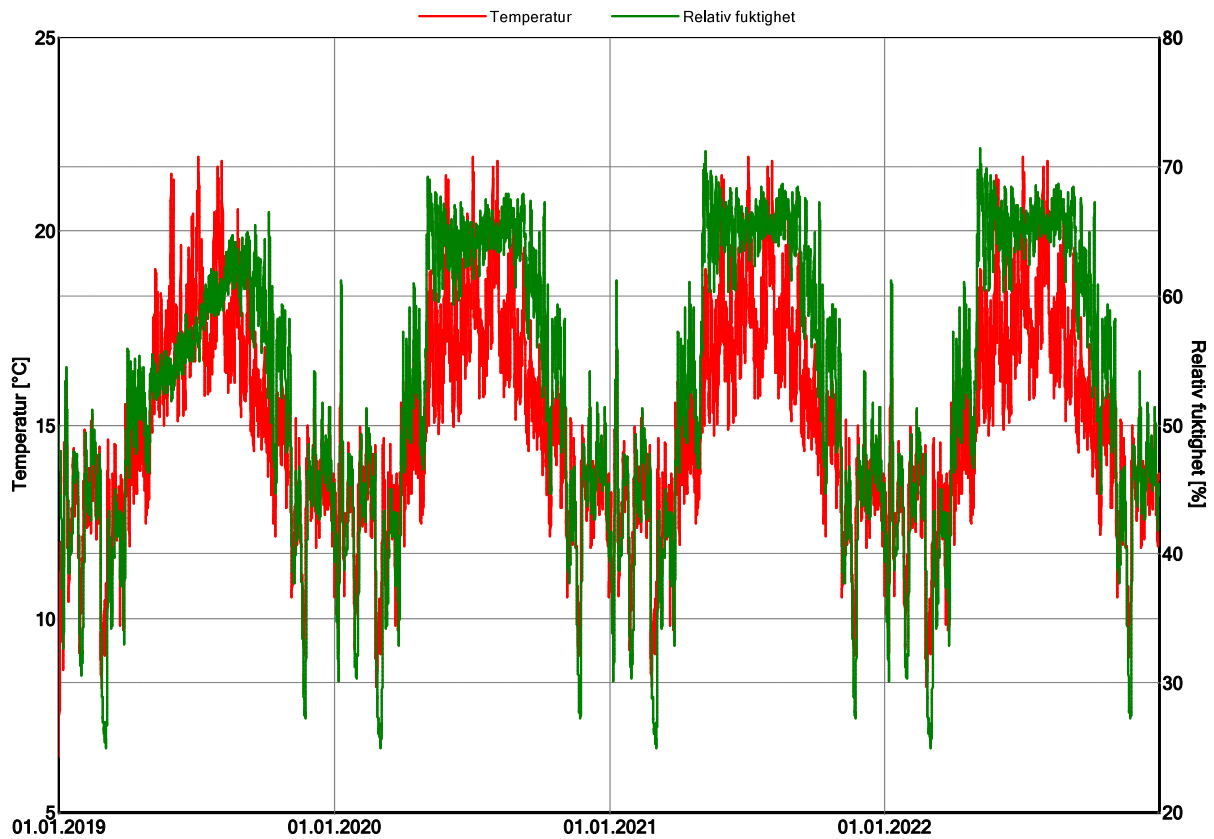
### ROCKWOOL TOPROCK DD (0,052892 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

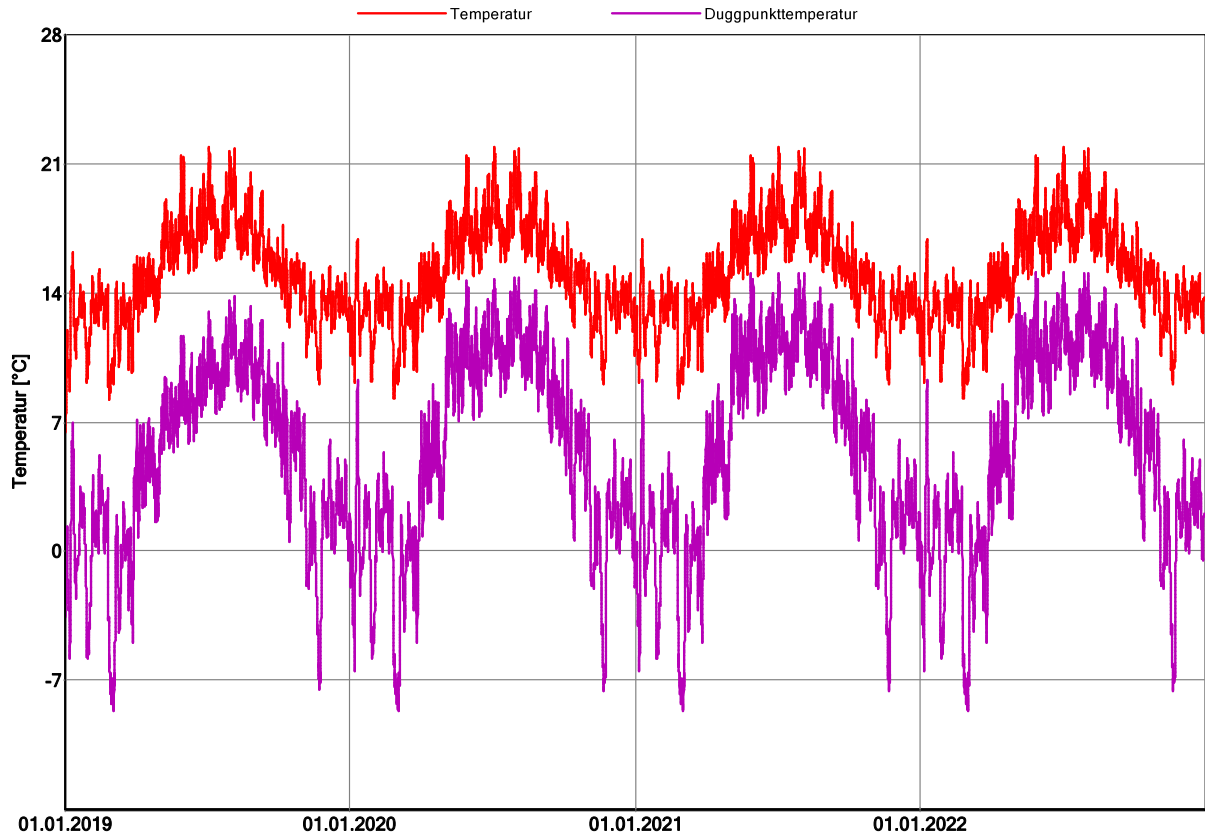
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

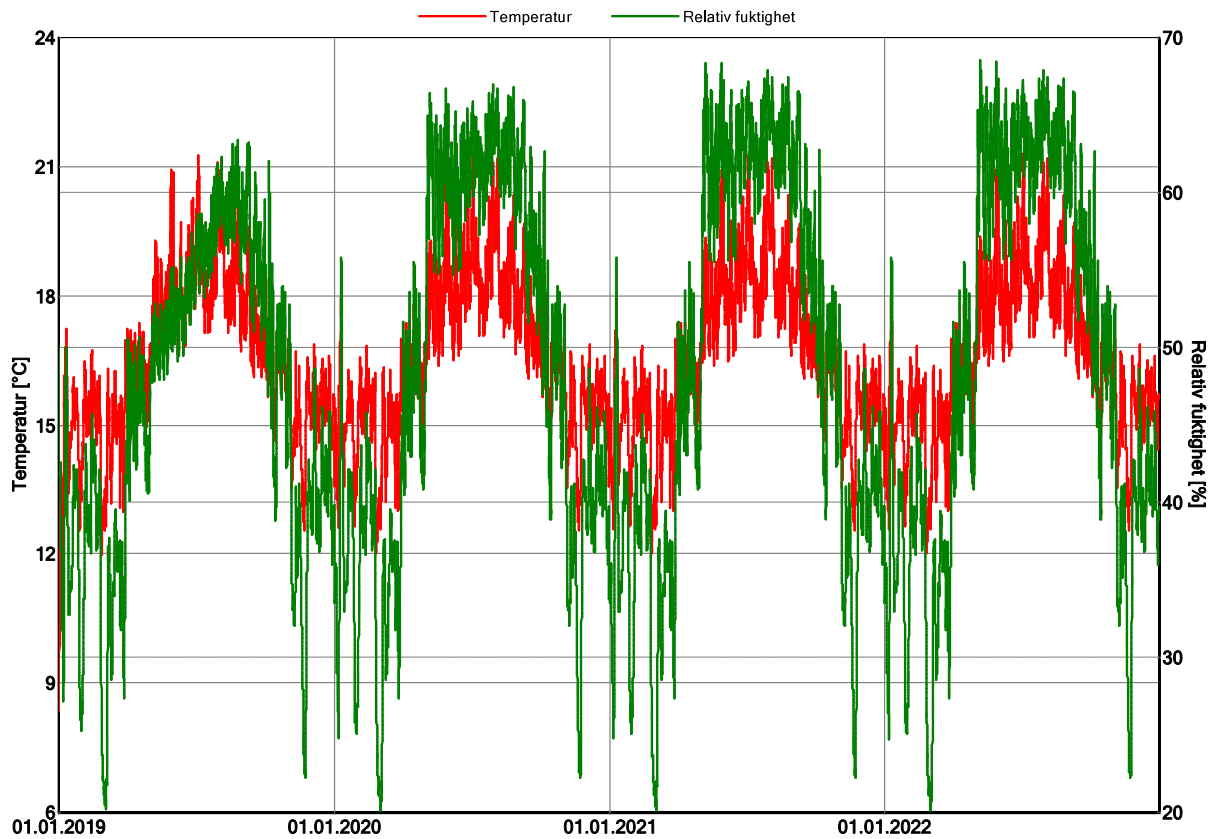
### Aspen Aerogels - Spaceloft Grey (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

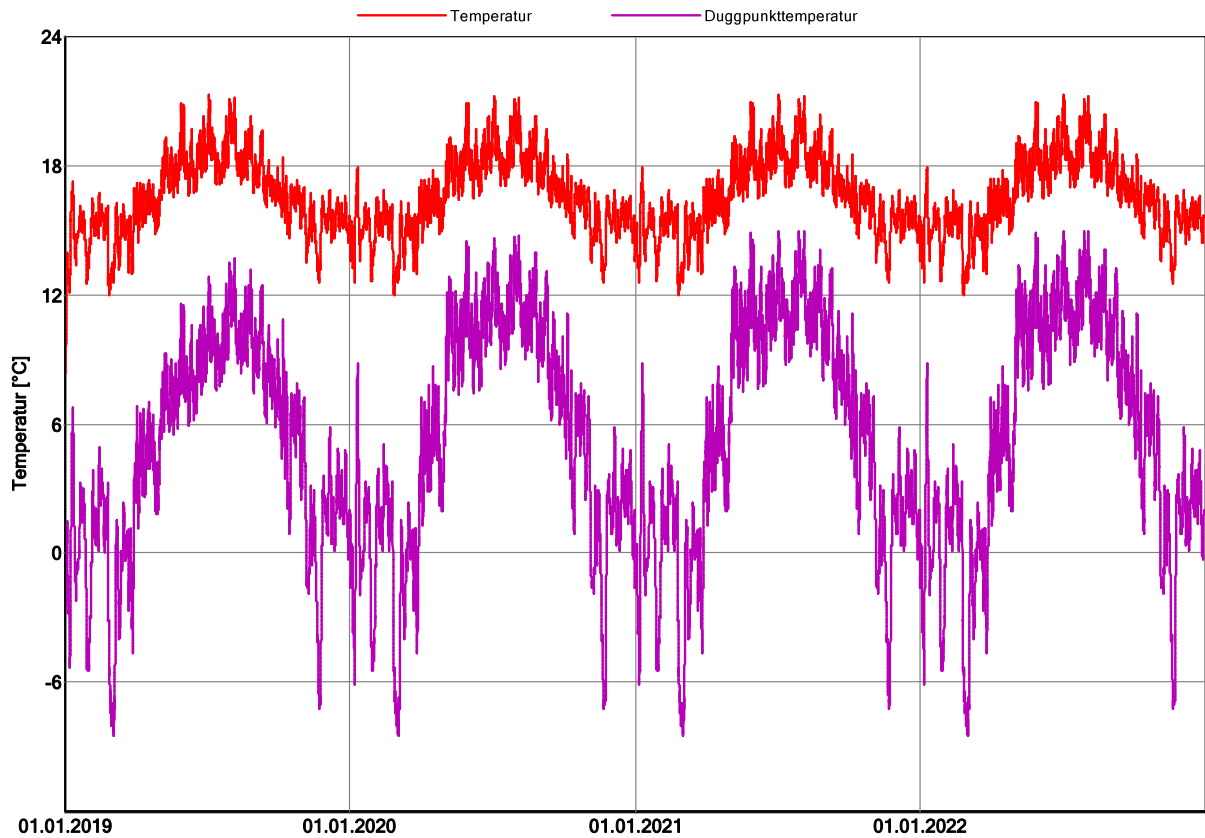
### EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m<sup>3</sup>) (0,000794 m)



WUFI Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

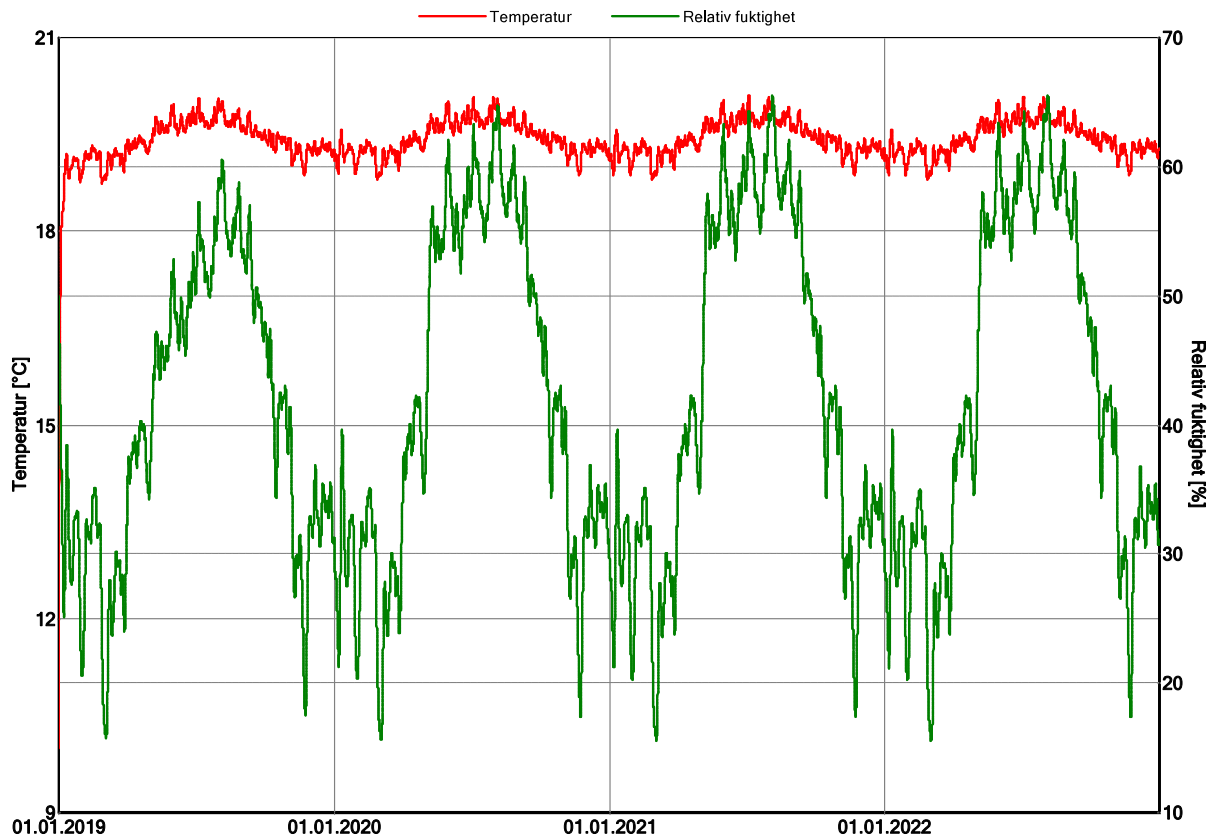
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,000794 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

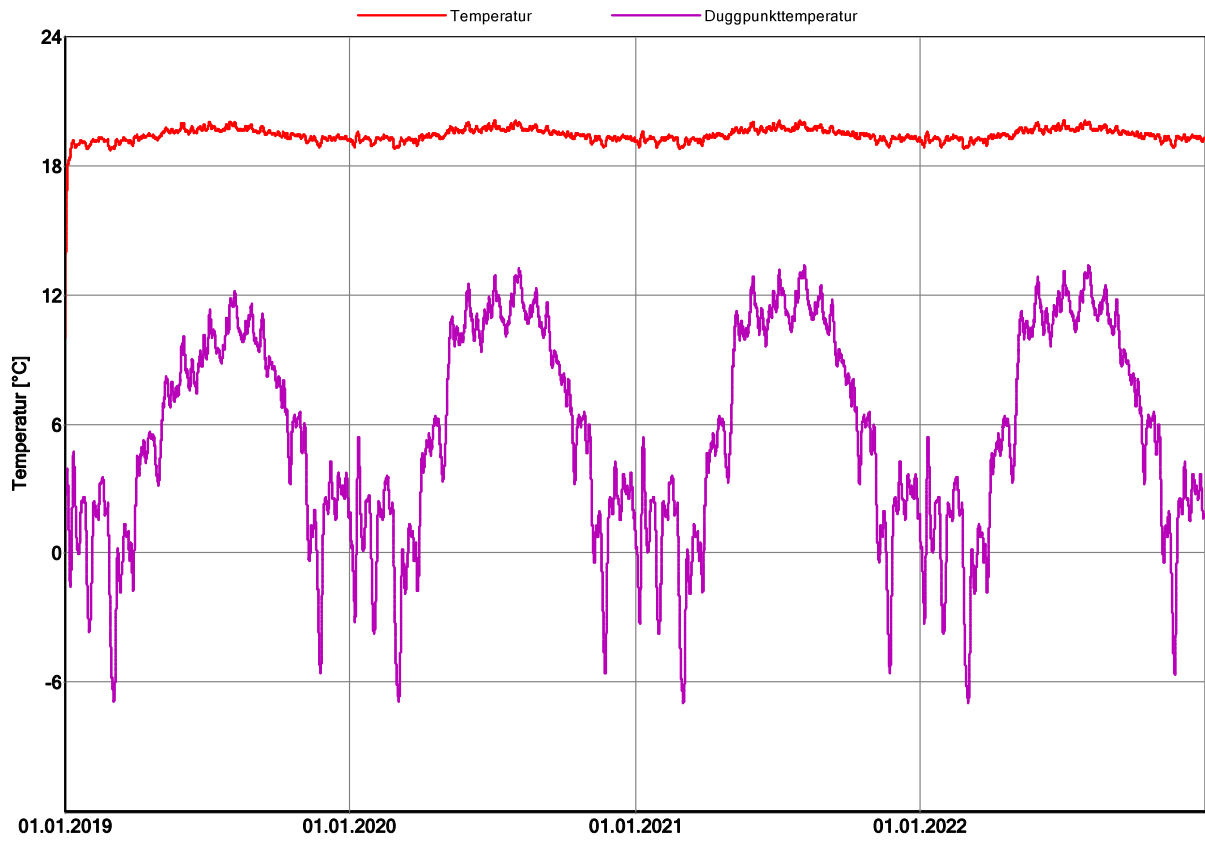
EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049921 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

WUFI Pro 6.2 NonCommercial

EPS (Varmekoduktivitet.: 0,04 W/mK - Densitet: 30 kg/m³) (0,049921 m)



WUFI\* Pro 6.2 NonCommercial; Analyse bacheloroppgave 04.05.2019,w6p; Variant 7: #10 Aerogel terrasse uten betongdekke lite byggfukt; 04.05.2019

