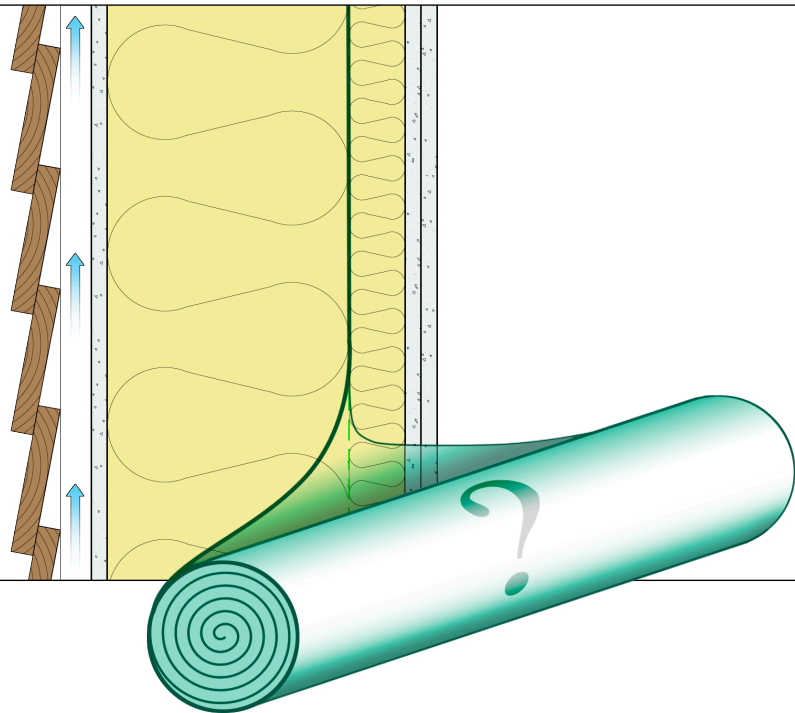




STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

Dampspærre i lette ydervægge

En nødvendighed eller ej?



MASTER I BYGNINGSFYSIK
SBI – STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
AAU – AALBORG UNIVERSITET, KØBENHAVN

Masterspeciale af Marcus Therkelsen, 10 juni 2020



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København
Statens Byggeforskningsinstitut
A. C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Danmark

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto
Telefon: 9940 2285
master@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

04

Titel på masterprojekt:

Dampspærre i lette ydervægge -
En nødvendighed eller ej?

Projektperiode:

Februar – juni 2020

Vejledere:

Torben V. Rasmussen
Martin Morelli

Studerende:

Marcus Therkelsen

Antal normalsider:

51 sider a 2400 anslag

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 10. juni 2020

Resume:

Interessen for træbyggeri er voksende, og der er politisk incitament til at fremme træ i byggeriet for at nedbringe Danmarks CO₂-udledning. CO₂-besparelsen er primært knyttet til, at træ kan substituere energitunge materialer i byggeriet som stål og beton.

Trækonstruktioner skal udføres fugtsikre med et tæthedsplan, der ofte og effektivt består af PE-folie. Nyeste forskning af PE-membraners levetid viser, at visse membransystemers materialeegenskaber foringens væsentligt over tid, hvilket øger interessen for at finde alternative konstruktionsmetoder og materialer med en ydeevne, der sikrer tilstrækkeligt robuste og fugtsikre ydervægskonstruktioner.

Denne rapports formål er at undersøge, om der kan udføres fugtteknisk sikre, lette ydervægskonstruktioner uden en dampspærremembran af PE-folie. Rapporten giver et bud på, i hvilke fugtbelastningsklasser, konstruktioner med en given Z-værdi for det indvendige plan, kan defineres som fugtsikre.

Der er i rapporten udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægge i forskellige fugtbelastningsklasser, hvor dampspærreplanets Z-værdi er skønnet til en række faste værdier knyttet til en række forskellige materialer, som alternativt kan udgøre tæthedsplanet.

Rapporten konkluderer, at det teoretisk set godt kan lade sig gøre at udføre lette ydervægge uden Z-værdier svarende til en dampspærremembran af PE-folie, såfremt konstruktionerne udføres lufttæt, og såfremt Z-værdien for materialerne, der indgår i tæthedsplanet, er tilstrækkelig høj til at sikre imod unødigt opfugtning bag vindspærrepladen som følge af vanddampdiffusion fra indeluften. Beregningerne viser, at Z-værdien for lufttætningsplanet skal være over ca. 15 GPa s m² / kg, for at der ikke opstår stor risiko for skimmelvækst på bagsiden af vindpladen i fugtbelastningsklasse 2.

Resumé

Interessen for træbyggeri er voksende, og der er politisk incitament til at fremme træ i byggeriet for at nedbringe Danmarks CO₂-udledning. CO₂-besparelsen er primært knyttet til, at træ kan substituere energitunge materialer i byggeriet som stål og beton.

Trækonstruktioner skal udføres fugtsikre med et tæthedsplan, der ofte og effektivt består af PE-folie. Nyeste forskning af PE-membraners levetid viser, at visse membransystemers materialeegenskaber forringes væsentligt over tid, hvilket øger interessen for at finde alternative konstruktionsmetoder og materialer med en ydeevne, der sikrer tilstrækkeligt robuste og fugtsikre ydervægskonstruktioner.

Denne rapport formål er at undersøge, om der kan udføres fugtteknisk sikre, lette ydervægskonstruktioner uden en dampspærremembran af PE-folie. Rapporten giver et bud på, i hvilke fugtbelastningsklasser, konstruktioner med en given Z-værdi for det indvendige plan, kan defineres som fugtsikre.

Der er i rapporten udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægge i forskellige fugtbelastningsklasser, hvor dampspærreplanets Z-værdi er skønnet til en række faste værdier knyttet til en række forskellige materialer, som alternativt kan udgøre tæthedsplanet.

Rapporten konkluderer, at det teoretisk set godt kan lade sig gøre at udføre lette ydervægge uden Z-værdier svarende til en dampspærremembran af PE-folie, såfremt konstruktionerne udføres lufttæt, og såfremt Z-værdien for materialerne, der indgår i tæthedsplanet, er tilstrækkelig høj til at sikre imod unødigt opfugtning bag vindspærrepladen som følge af vanddampdiffusion fra indeluftten. Beregningerne viser, at Z-værdien for lufttætningsplanet skal være over ca. 15 GPa s m² / kg, for at der ikke opstår stor risiko for skimmelvækst på bagsiden af vindpladen i fugtbelastningsklasse 2.

Summary

Interest for the use of timber in the building industry is on the rise. The potential for reduced carbon dioxide emissions has attracted attention in both the building industry as well as in the political sphere. Lightweight wooden structures are often highly affected by excessive moisture loads caused by high indoor humidity, and therefore require mitigation by membranes made of such materials as polyethylene.

The purpose of this report is to investigate moisture levels in lightweight timber frame constructions without a mitigating plastic membrane. The report will suggest appropriate moisture loads indexes corresponding to water vapor diffusion resistances of the vapor membrane.

In conclusion, it is theoretically possible to design lightweight timber frame constructions without plastic membranes, as long as certain precautions are taken. These precautions include sufficient air-tightening and the selection of appropriate diffusion resistances of the vapor control layer. Calculations show that safe moisture levels, with no risk of mold spore germination behind the wind barrier, can be obtained when constructions include a vapor retarder with a diffusion resistance of minimum $15 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$, in moisture load index 2.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	6
2 Opgaveformulering	9
2.1 Afgrænsning	9
3 Teori	10
3.1 Ydervæggen som klimaskærm	10
3.2 Lette ydervægges lag	10
3.3 Dampdiffusionsmodstandsfaktor, Z- og S _d -værdi	13
3.4 Kritisk fugtniveau og skimmelsvamp	15
4 Metoder og materialer	20
4.1 Referencekonstruktion	20
4.2 Stationære beregninger	21
4.3 Dynamiske simuleringer	21
4.4 Skimmelgrænse, LIM I	25
5 Resultater	26
5.1 Indledende analyser med forskellige Z-værdier	26
5.2 Dynamiske beregninger, boliger	29
5.3 Fugtforhold i konstruktioner i fugtbelastningsklasse 4 og 5	35
5.4 Z-værdi / fugtbelastning	41
6 Dampspærre i lette ydervægge	43
6.1 Er dampspærre nødvendigt?	43
6.2 Luftspærre, dampspærre - tæthedsplan	45
6.3 Membrantyper	46
6.4 Plademateriale som dampspærre	48
6.5 Dampspærremembraner af PE-folie	49
7 Diskussion	54
7.1 Hygrotermiske simuleringer	54
7.2 Lufttæthed	55
7.3 Forholdet mellem vindspærre og dampspærre	57
7.4 Vurderinger af risiko for skimmel	60
7.5 Orientering, ventilering og fugtadaptiv dampspærre	64
7.6 Fugtforhold i ydervæggen	68

7.7 Hvad viser andre undersøgelser?	71
8 Konklusion	73
9 Perspektivering	74
10 Kilde- og litteraturliste	75
11 Bilagsfortegnelse	79

1 Indledning

Lette ydervægge udføres primært som stål- eller træskeletkonstruktioner. Lette skeletkonstruktioner er fleksible og enkle at udføre, og de kan fremstilles som præfabrikerede facadeelementer, hvilket kan være med til at fremme produktiviteten i byggeriet (Munch-Andersen, 2018). Skeletvægge udført af træ imødekommer ønsker og krav om bæredygtigt byggeri, da anvendelsen af træ og træbaserede materialer er en af de mest effektive måder at lagre kulstof i konstruktionerne på og dermed nedbringe CO₂-belastningen (Johansen, 2014). Dertil kan besparelsen fra substitution af beton og stål med træprodukter lægges til som en reduktion af udledning af CO₂ (Madsen, et al., 2019).

Byggeriet udgør 40% af verdens CO₂-udledning. De 11% kommer fra fremstilling af byggematerialer. Cementproduktionen til beton udgør alene 7% af verdens CO₂-udledning, og til sammenligning står flytrafikken for lidt over 2% af verdens CO₂-udledning (Sonne, 2019). Politiske initiativer i Danmark vil fremme brugen af træ i byggeriet, så byggeriet kan bidrage til regeringens målsætning om at nedbringe Danmarks CO₂-udledning (Lorentsen, 2020).

Træ er et organisk materiale, og der skal udvises ekstra omhu, når det skal indgå i en bygningskonstruktion, da kritisk opfugtning kan føre til skimmel-svamp, nedbrydning og svigt. Ifølge bygningsreglementet skal konstruktioner udføres fugtteknisk sikre, og der stilles krav om, at fugt ikke må medføre skade på konstruktioner eller risiko for personers sundhed. I §335 præciseres det, at "bygninger skal sikres mod skadelig akkumulering af fugt som følge af fugttransport fra indeluften" (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019).

Fugttransport fra indeluften sker både ved diffusion og konvektion. For at sikre ydervæggen mod fugttransport (og for at overholde bygningsreglementets krav om lufttæthed) etableres et tæthedsplan ved at der indbygges en dampspærremembran, på den varme side af konstruktionen.

Dampspærremembranen i lette ydervægge udgøres ofte og effektivt af en plastfolie af polyetylen (PE).

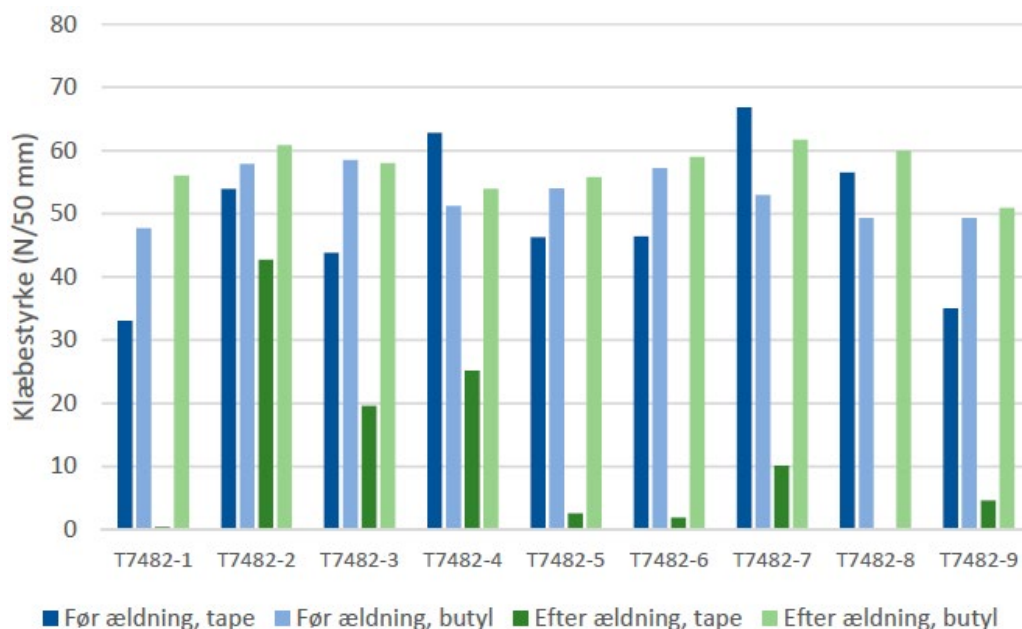
PE er en af de mest producerede plasttyper i verden. Plastproduktionen er på verdensplan steget kraftigt gennem de sidste 50 år, og plastproduktionen forventes at blive fordoblet inden for de næste 20 år. Der produceres i dag ca. 80 mio. ton plast årligt, hvoraf næsten 80% anvendes til plastfolie. En del af den plastfolie anvendes som membraner i byggeriet (Rasmussen, et al., 2018).

Desværre udgør plast p.t. en stor klimamæssig udfordring, hvor op imod 12 millioner ton plast hvert år ender i verdenshavene. Her bliver plasten langsomt nedbrudt til små stykker mikroplast, hvor den, udover at gøre skade på naturen, fisk og fugle, også gør skade på mennesker. Mængden af plast i verdenshavene forventes at blive fordoblet frem mod 2025. (Nielsen, et al., 2015)



Figur 1. Op imod 12 millioner ton plast ender hvert år i verdenshavene, hvor den langsomt bliver nedbrudt til små stykker mikroplast. Foto: Shutterstock fra (Videnskab.dk, 2018).

Et byggeri skal opføres så det overholder gældende bygningsreglement i hele dets levetid. Nyeste forskning af PE-membraner har påvist, at mange typer PE-membraner ændrer materialeegenskaber over tid. Specielt fandt man, at klæbestyrken for PE-membraner med tapede samlinger faldt væsentligt efter en gennemført accelereret ældning, svarende til ca. 15-20 års realtid, når det antages at der i gennemsnit er ca. 18 °C på det sted i konstruktionen, hvor membranen indbygges (Rasmussen, et al., 2020).



Figur 2. Klæbestyrke for 9 forskellige PE-membransystemer (T7482-1 – T7482-9) før og efter accelereret ældning (svarende til ca. 15-20 års realtid) for systemer med tapede samlinger (tape) og membraner samlet med butylbånd (butyl). Bemærk at klæbestyrken for membransystemer med tapede samlinger falder væsentligt for mange af typerne efter accelereret ældning (Rasmussen, et al., 2020, figur 56).

Når traditionelle dampspærremembraner af PE-folie har begrænset levetid, så øges interessen for at finde alternative, fugtsikre løsninger. Alternative løsninger må ikke give risiko for skimmelvækst eller nedbrydning af træ og træbase-rede materialer.

Et litteraturstudie (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, 2017) konkluderede bl.a., at det er forhold i konstruktionen som dampspærrens dampdiffusions-modstand og den fugtbelastning, konstruktionen udsættes for, der har betydning for, om der er risiko for skimmelvækst i konstruktionen.

I denne rapport undersøges fugtforholdene i lette trækonstruktioner ved forskellige fugtbelastninger og en række valgte Z-værdier for dampspærreplanet.

2 Opgaveformulering

Denne rapports formål er at undersøge, om der kan udføres fugtteknisk sikre, lette ydervægskonstruktioner uden en dampspærremembran af PE-folie.

Rapporten vil undersøge fugtforholdene i væggens isoleringslag ved forskellige fugtbelastningsklasser og ved forskellige Z-værdier for det indvendige tæthedsplan.

Rapporten vil give et bud på, i hvilke fugtbelastningsklasser, konstruktioner med en given Z-værdi for det indvendige plan vil være fugtsikre.

2.1 Afgrænsning

I denne rapport fokuseres der på de fugttekniske forhold, der gør sig gældende for lette ydervægskonstruktioner.

Ydervæggen som klimaskærm skal opfylde mange krav. Fx stilles der krav til brand, statik, akustik, materialers indeklimapåvirkninger osv., hvilket alle er vigtige emner at have for øje, men emner, der ikke vil blive berørt nærmere i denne rapport.

Der tages udgangspunkt i de lette - primært træbaserede - ydervægskonstruktioner. Mange af principperne vil dog kunne overføres til tunge ydervægskonstruktioner, kombinationer af tunge og lette konstruktioner og ydervægskonstruktioner med massivtræselementer (CLT-byggeri).

Udgangspunktet for projektet er, at de undersøgte lette ydervægge kan overholde de gældende energikrav, hvilket almindeligvis svarer til en U-værdi for ydervægge på ca. $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Munch-Andersen, 2018).

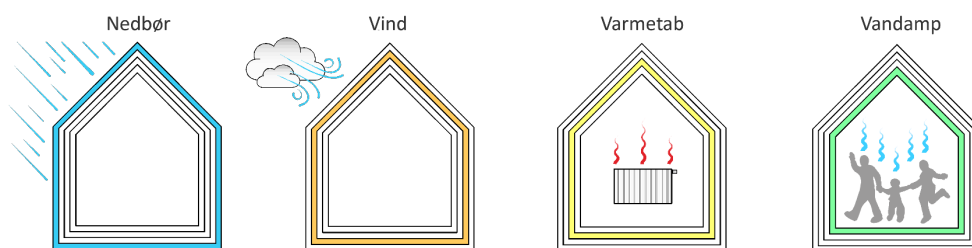
Rapporten tager udgangspunkt i dampspærrens Z-værdi, og analyser vil blive foretaget på baggrund af hygrotermiske simuleringer (udført i WUFI Pro). På den måde kan dette studie betragtes som et forstudie for en fremtidig fuldskalaundersøgelse af fugtforhold i lette ydervægge.

Der arbejdes primært med fugtbelastningsklasserne for boliger, som udgør bygninger i klasse 1-3. Dog er nogle af resultaterne for sammenlignelighedens skyld, også udvidet til at omfatte andre bygninger end boliger, som udgør bygninger i klasse 4-5, fx industrikøkkener, vaskerier og svømmehaller.

3 Teori

3.1 Ydervæggen som klimaskærm

De konstruktioner der adskiller inde- og udeklimaet betegnes klimaskærmen. Ydervæggen indgår i bygningens klimaskærm og skal beskytte mod vind, regn og kulde samt påvirkninger som følge af bygningens brug. Ydervæggen skal isoleres og lufttættes, så der ikke sker unødigt energispild og konstrueres så der ikke opstår fugtniveauer, som er kritiske i forhold til vækst af skimmelsvamp, råd og trænedbrydende svampe. En korrekt opbygget ydervæg er med til at sikre et godt og sundt indeklima (Møller, Brandt, & Pedersen, 2016).



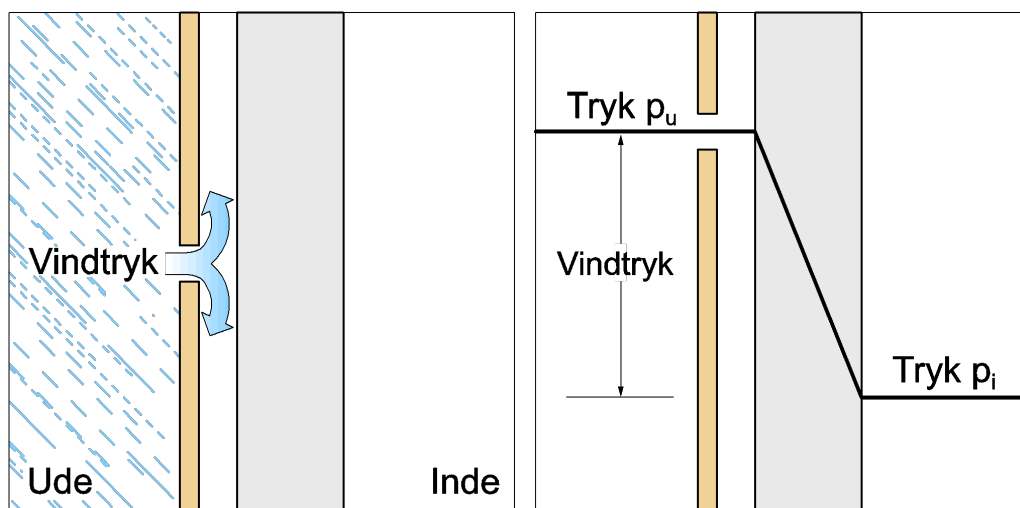
Figur 3. Klimaskærmen udsættes for forskellige påvirkninger fra vejrliget og fra bygningens brug. Lette ydervægge opbygges af lag, med hver sin funktion for at sikre mod påvirkningerne. Efter (Møller, Brandt, & Pedersen, 2016, figur 10).

3.2 Lette ydervægges lag

Lette ydervægge opbygges af forskellige materialegag med forskellige funktioner, der hver især sikrer ydervæggen mod de påvirkninger den udsættes for. I modsætning til de tunge ydervægge, hvor ét materialegag kan have flere funktioner samtidig (fx er formuren typisk både regnskærm og vindspærre) har lagene i lette ydervægge hver deres klart definerede opgave. På den måde kan der vælges materialer til hvert enkelt lag, der bedst muligt egner sig til den pågældende opgave.

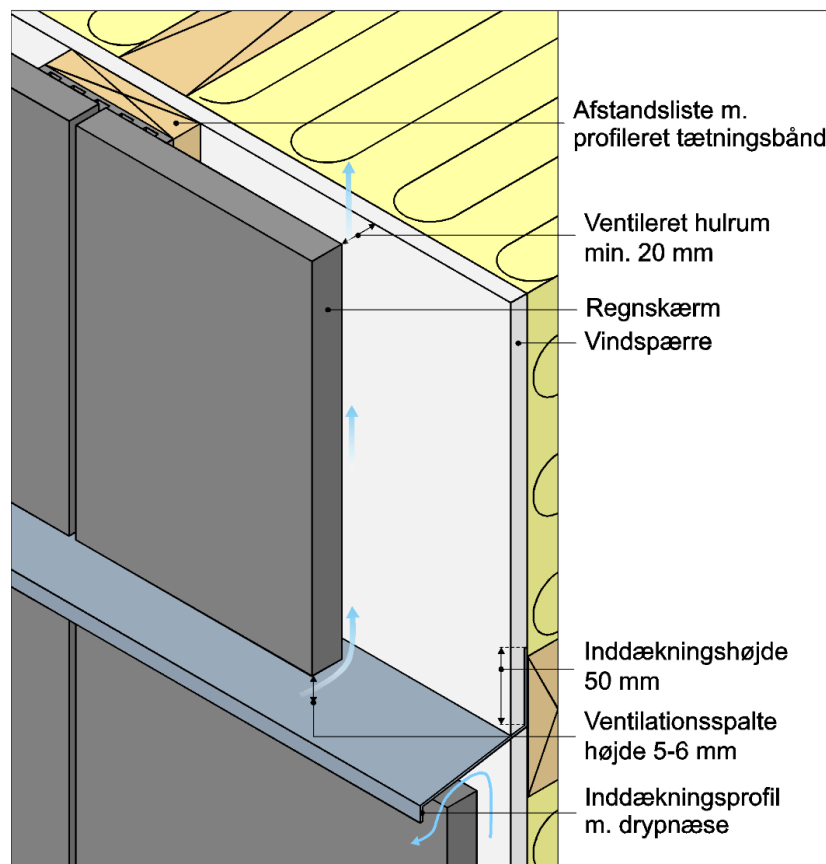
3.2.1 Regnskærm

Regnskærmen er ydervæggens yderste del, og den bliver derfor påvirket af vind og vejr. Regnskærmens opgave er at aflede den nedbør der rammer væggen. Siden 1950'erne har regnskærmen været udført efter to-trinstætningsprincippet, hvor der bag regnskærmen etableres en ventileret luftspalte med åbninger til det fri, der udligner vindtrykket over regnskærmen. Trykdulningen sikrer, at det vand der rammer regnskærmen ikke påvirkes af nogen kraft, der kan drive vandet ind i væggen, og ventilationen i spalten fjerner den vanddamp der diffunderer ud gennem væggen (Brandt, 2013).



Figur 4. To-trinstætningsprincippet med en udvendig regnskærm og ventilationsspalte foran en vindtæt konstruktion. Åbninger til det fri udligner vindtrykket over regnskærmen og sikrer, at regnvand kun i begrænset omfang kan blive drevet gennem åbninger i regnskærmen (Brandt, 2013, figur 38).

Med en afstand på 20-25 mm mellem regnskærm og vindplade kan der opnås den nødvendige trykudligning. Regnskærmens åbninger til det fri skal udgøre 0,25-1,0 % af ydervæggens areal og fordeles ligeligt foroven og forneden. Det er en forudsætning, at vindpladen er udført tilstrækkeligt tæt, specielt med fokus på gennembrydninger for VVS- og elinstallationer, for at to-trinstætningsprincippet virker. Det skal også sikres, at det vand der alligevel er trængt ind bag regnskærmen, kan ledes ud igen, som det ses på figur 5 (Christensen & Bunch-Nielsen, 2005).



Figur 5. Inddækning ved vandret ventilationsåbning med metalprofil der sikrer, at det vand der trænger ind bag regnskærmen, kan ledes ud igen. Ventilationen i spalten fjerner den vanddamp der diffunderer ud gennem ydervæggen. (Møller, Brandt, & Pedersen, 2016, figur 40)

3.2.2 Vindspærre

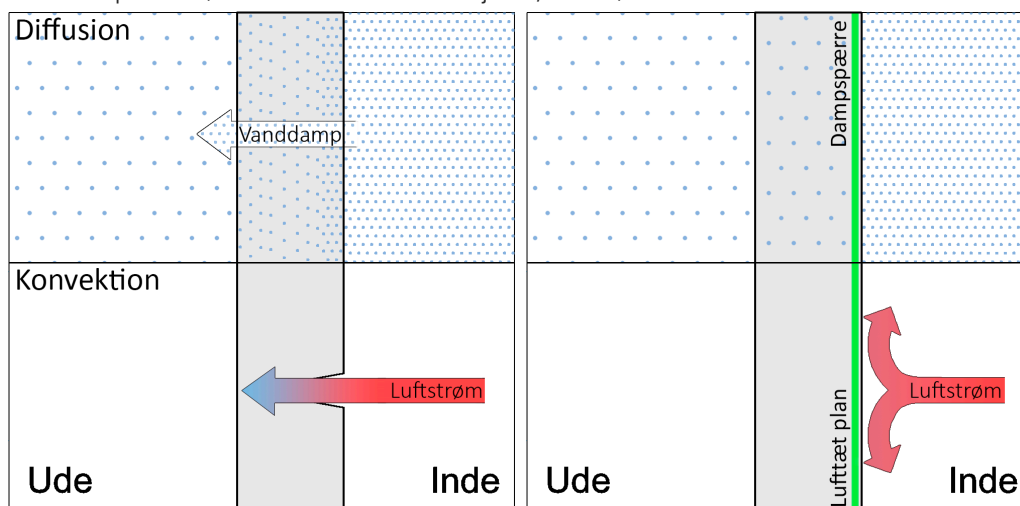
Den inderste del i to-trinstætningsprincippet er vindspærren. Vindspærrens opgave er at optage vindbelastningen og forhindre luftstrømning ind i porøse isoleringsmaterialer, så isoleringsevnen bliver nedsat. Vindspærren skal være så diffusionsåben, at den fugt der måtte trænge ind i konstruktionen, har mindst 10 gange lettere ved at komme ud igen på den udvendige side, end den havde for at trænge ind. Dampdiffusionsmodstanden for vindspærren må altså højst være 1/10 af dampdiffusionsmodstanden for dampspærren. For bygninger i fugtbelastningsklasse 1 og 2 er det tilstrækkeligt, at dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre er 1:5. Der anvendes almindeligvis en vindspærre med en dampdiffusionsmodstand på mindre end 10 GPa s m²/kg (Brandt, 2013). Vindspærren vil ofte stå uafdækket i dele af byggeperioden, hvorfor andre forhold som vindspærrens bestandighed og robusthed også bør overvejes (Christensen & Bunch-Nielsen, 2005).

3.2.3 Varmeisolering

Varmeisoleringens opgave er at reducere varmetabet gennem ydervæggen og dermed mindske udgifterne til opvarmning. En velisoleret ydervæg sikrer om vinteren god termisk komfort indendørs. En passende høj indvendig overfladetemperatur forhindrer ubehagelig kuldestråling og kondensdannelse på væggens indvendige overflade. Isoleringsmaterialets varmeledningsevne er udtrykt ved λ -værdien. Jo lavere varmeledningsevne et materiale har, jo bedre isolerer det. Lette ydervægge isoleres ofte med mineraluldsbaserede isoleringsprodukter med λ -værdier på omkring 0,034-0,037 W/mK. (Møller, Brandt, & Pedersen, 2016)

3.2.4 Tæthedsplanet – lufttæthed og damptæthed

Indvendigt opbygges ydervæggen både lufttæt og damptæt. I lette træskeletkonstruktioner kan begge disse funktioner slås sammen i samme lag kaldet tæthedsplanet (Rasmussen & Nicolajsen, 2007).



Figur 6. Tæthedsplanet gør ydervæggen lufttæt og damptæt. Tæthedsplanet sikrer mod infiltration, der kan medføre trækgener og unødigt energiforbrug til opvarmning, mod exfiltration, hvor ydervæggen opfuges som følge af fugtkonvektion og mod fugttransport ved diffusion. Efter (Christensen & Andersen, 1972) og (Brandt, 2013).

Ydervæggens indvendige plan skal være tilstrækkeligt *lufttæt* for at undgå forøget energiforbrug til opvarmning som følge af infiltration og for at undgå, at ydervæggen opfugtes ved exfiltration, hvor varm, fugtig indeluft transporteres med en luftstrøm gennem utætheder i det lufttætte plan ud i ydervæggen.

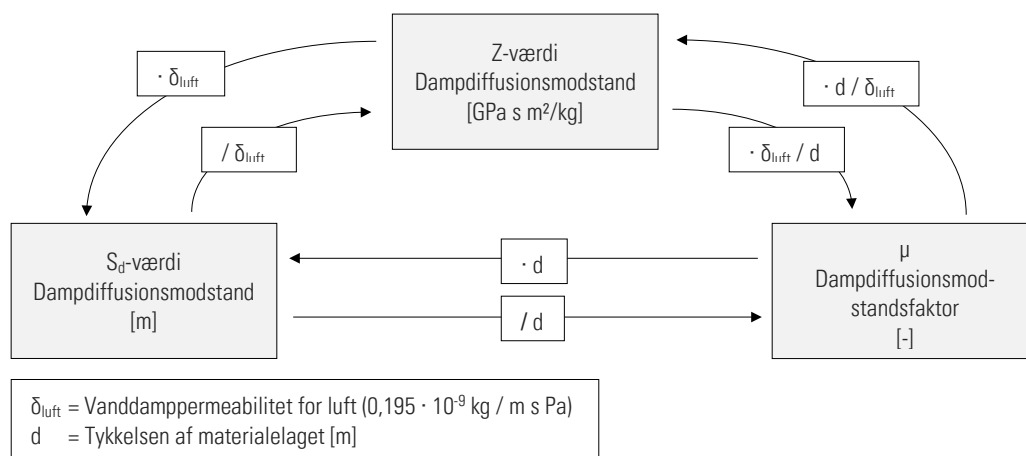
Ydervæggens indvendige plan skal være tilstrækkeligt *dampptæt* for at forhindre indeluftens indhold af vanddamp i at diffundere ud i ydervæggen og opfugte den. Et materialelag med en Z-værdi på mindst 50 GPa s m² / kg anses for at have tilstrækkelig stor dampdiffusionsmodstand til at opfylde dampptætheden.

I praksis klares begge funktioner, både luft- og dampptætheden, i samme lag, ved at indbygge en dampspærremembran af PE-folie, der er i sig selv meget dampptæt (med en Z-værdi på omkring 250-500 GPa s m² / kg). Forudsat at den er udført omhyggeligt med tilstrækkeligt lufttætte samlinger, udgør den også det lufttætte plan.

For at beskytte dampspærremembranen mod utilsigtede gennembrydninger og mekaniske påvirkninger, og for at muliggøre trækning af installationer i ydervæggen uden gennembrydninger af membranen, kan den placeres et stykke inde i konstruktionen, dog med højst 1/3 af konstruktionens samlede isolans på den varme side af membranen.

3.3 Dampdiffusionsmodstandsfaktor, Z- og S_d-værdi

Denne rapport kigger på dampspærreplanets vanddampdiffusionsmodstand. I Danmark er vi vant til at bruge Z-værdien, men i andre lande, fx tyskland, og i de hygrotermiske beregningsprogrammer bruges S_d-værdien og vanddampdampdiffusionsmodstandsfaktoren, μ . Sammenhængen er her beskrevet kort, og vist i figur 7.



Figur 7. Omregning mellem Z-værdi, S_d-værdi og dampdiffusionsmodstandsfaktor. Vanddamppermeabiliteten for luft er 0,195 · 10⁻⁹ kg / m s Pa, når lufttemperaturen er 23 °C (Gottfredsen & Nielsen, 1997).

3.3.1 Dampdiffusionsmodstand, Z-værdi

Et materiales vanddamppermeabilitet, δ , beskriver dets gennemtrængelighed over for vanddamp. Permeabiliteten divideret med materialelagets tykkelse, d , giver vanddampdiffusionsmodstanden, Z-værdien. Jo større Z-værdien er, jo mindre vanddamp kan der diffundere gennem materialet.

3.3.2 Dampdiffusionsmodstandsfaktor, μ

Et materiales dampdiffusionsmodstand kan også beskrives med vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ . μ er dimensionsløs og er en faktor for hvor stor vanddampdiffusionsmodstanden i et materiale er sammenlignet med vanddampdiffusionsmodstanden i luft. For meget permeable materialer, fx mineraluld, er μ -faktoren tæt på 1, mens den øges for materialer med større dampdiffusionsmodstand.

3.3.3 Dampdiffusionsmodstand, S_d

I Tyskland udtrykkes dampdiffusionsmodstanden som S_d -værdien. Et materiales μ -faktor ganget med tykkelsen, d [m] giver S_d -værdien i [m]. S_d -værdien udtrykker den tykkelse, som et luftlag skulle have haft for at have den samme dampdiffusionsmodstand.

3.3.4 Eksempel A - Gipsplade

En standard gipsplade i en let ydervæg har tykkelsen $d = 0,013$ m og vanddamppermeabilitet $\delta = 0,026 \mu\text{g} / \text{m s Pa}$. Gipspladen har derfor Z-værdien: $Z = d / \delta = 0,5 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$.

Vanddamppermeabilitet for luft, $\delta_{\text{luft}} = 0,195 \cdot 10^{-9} \text{ kg} / \text{m s Pa}$ (Gottfredsen & Nielsen, 1997). Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren for gips som materiale, $\mu = Z \cdot \delta_{\text{luft}} / d = 7,5$. Med andre ord er dampdiffusionsmodstanden for gips som materiale 7,5 gange større end dampdiffusionsmodstanden for luft.

Vanddampdiffusionsmodstanden for den 13 mm tykke gipsplade kan udtrykkes med S_d -værdien: $S_d = \mu \cdot d = 0,1$ m. Gipspladen yder med andre ord samme modstand mod vanddampdiffusion, som et luftlag på 10 cm ville gøre.

3.3.5 Eksempel B - Dampspærremembran af PE-folie

En dampspærremembran af 100 % ren PE har tykkelsen, $d = 0,0002$ m (0,20 mm) og producenten har oplyst S_d -værdien til 140 m.

Z-værdien for dampspærremembranen er: $Z = S_d / \delta_{\text{luft}} = 718 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$, og vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren for membranmaterialet er: $\mu = S_d / d = 700.000$.

Af hensyn til den numeriske beregningsmetode i WUFI Pro bør alle membraner beregnes som min. 1 mm tykkelse. Da data er oplyst for den tyndere membran, må dampdiffusionsmodstandsfaktoren omregnes, så den kan anvendes i beregningsprogrammet, svarende til et materiale der er 1 mm tykt. Dampdiffusionsmodstandsfaktoren nedjusteres, og det kompenserer den øgede materialetykkelse for.

I WUFI Pro skal den justerede vanddampdiffusionsmodstandsfaktor for membranmaterialet være: $\mu = S_d/d = 140.000$. Den beregnede dampdiffusionsmodstand for et 1 mm tykt lag svarer nu til den af producenten oplyste dampdiffusionsmodstand for et 0,2 mm tyndt lag.

Membrantykkelsen har stor indflydelse på dampdiffusionsmodstanden. Uvil-dige undersøgelser af PE-membraners materialeegenskaber viste, at der var god overensstemmelse mellem den målte membranfladetykkelse og den målte Z-værdi. Undersøgelsen viste også, at der for den samme membrantype findes afvigelser i fladetykkelsen i forhold til den deklarerede (Rasmussen, et al., 2020).

3.4 Kritisk fugtniveau og skimmelsvamp

Når det skal vurderes om en konstruktion er fugtteknisk sikker, kigges der på fugtindholdet i materialerne og den relative fugtighed (RF) i luften. Hvis fugtindholdet i luften er højt, over 75 % RF, kan der dannes skimmelsvamp på en organisk overflade, fx træ. Hvis fugtindholdet i træet stiger til 20 vægt-% svarende til en fugtligevægt med luften på ca. 85-90 % RF, vil træet kunne blive angrebet af råd eller trænedbrydende svampe (Brandt, 2013).

3.4.1 Skimmelsvamp

Skimmelsvamp er den første indikator på, at noget ikke er fugtteknisk sikkert. Skimmelsvampe gror på overflader og nedbryder ikke træ, som de trænedbrydende svampearter kan. Skimmelsvamp er mistænkt for at kunne give luftvejsproblemer og astma, hvis mennesker eksponeres for skimmel i indeklimaet.



Figur 8. Skimmelsvamp i vægkonstruktion (Skanmark, 2020).

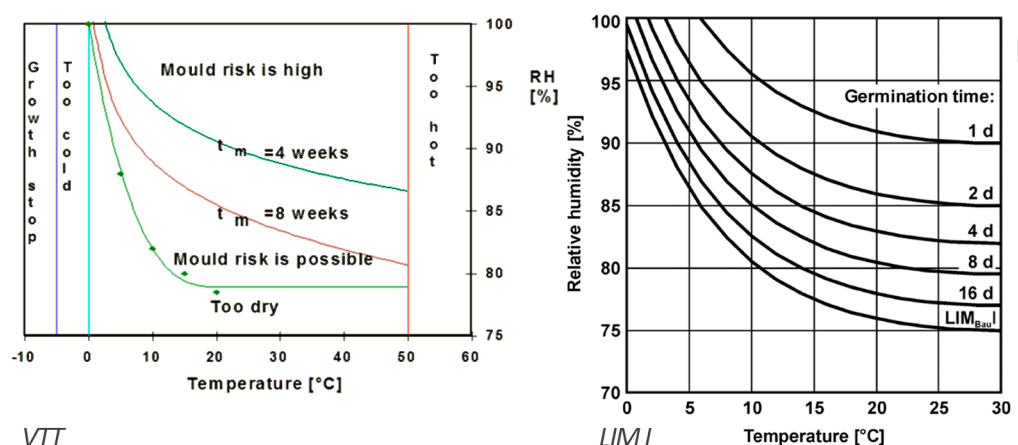
Udviklingen af skimmelsvamp på en overflade afhænger i høj grad af, hvor stor vandaktiviteten, a_w (RF på overfladen) er. Er a_w større end 0,75, vil der være risiko for, at der kan dannes skimmelsvamp. De fleste skimmelsvampearter trives bedst ved a_w på 0,80-0,95. Når først svampesporerne er begyndt at spire, kan svampen vokse videre under mindre optimale forhold. Svampe kan fx overleve længe ved en vandaktivitet på 0,45 eller lavere (Thrane, 2019).

Udover fugt (og næring, som stort set altid er til stede fx i papir, lim, træ, støv, savsmuld, tapet osv.) skal den rette temperatur være til stede, for at der kan ske svampevækst. De fleste svampearter vil have optimale vækstbetingelser ved 20-30 °C. Skimmelsvampe kan ikke vokse ved temperaturer under frysepunktet og ved temperaturer over 40 °C, men de kan sagtens overleve ved langt højere temperaturer, og ved temperaturer under frysepunktet, for derved at kunne begynde at spire igen, når den rette temperatur og RF er til stede (Thrane, 2019).

3.4.2 Forskellige skimmelmodeller

Det er vanskeligt præcist at forudsige skimmelsvampevækst, og der er udviklet mange forskellige matematiske modeller til at forudsige, om der opstår risiko for skimmelsvamp og vækst på forskellige overflader. Modellerne er alle baseret på forsimplede antagelser, der ikke alle beskriver den praktiske virkelighed lige godt. Modellerne viser forskellige grænser for, hvornår der er risiko for skimmelvækst (Thrane, 2019).

To af de mest anvendte modeller for vurdering af skimmelvækst på overflader og i konstruktioner er VTT-modellen og LIM-modellen.



Figur 9. To af de mest anvendte modeller for vurdering af skimmelvækst er VTT-modellen (tv) og LIM-modellen (th). I LIM I-modellen kan det fx aflæses, at hvis der på en organisk overflade over 4 dage konstant er 15 °C og 85 % relativ fugtighed, så vil der ske skimmelvækst. Figurer fra (Viitanen, et al., 2015).

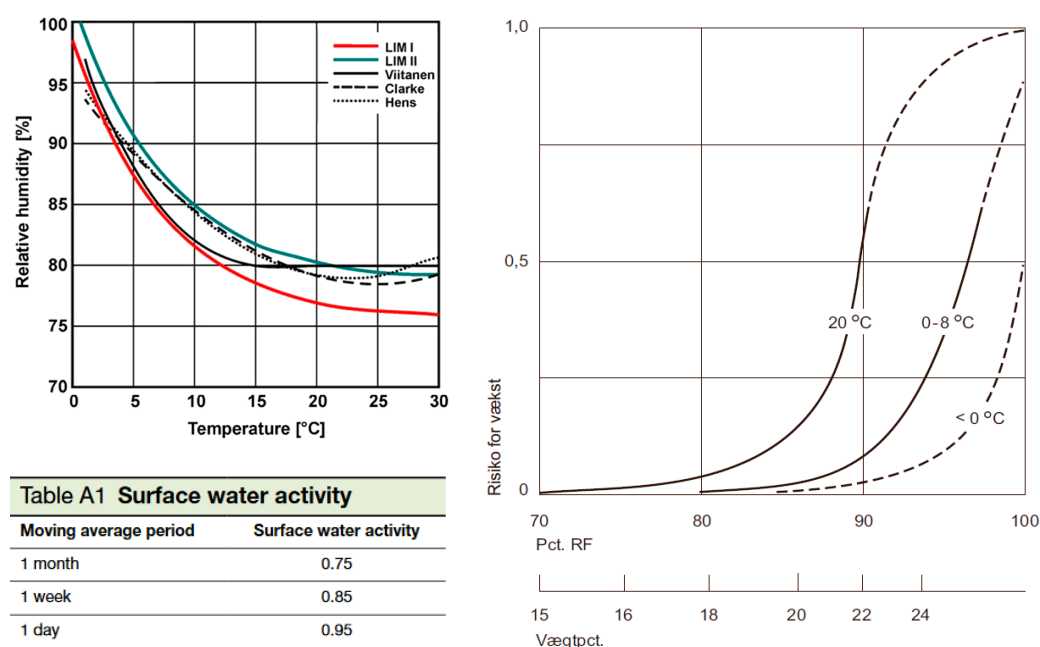
VTT-modellen er en videnskabelig model baseret på laboratorieundersøgelser af skimmelvækst på forskellige materialer, oprindeligt på fyrre- og grantræ, og senere udvidet til en række andre materialer. VTT-modellen klassificerer væksten efter et skimmelindeks, 0-6, hvor 0 er ingen vækst og 6 er en helt dækket overflade (Ojanen, et al., 2010).

LIM-modellen er en teoretisk model udviklet til forudsigelse af skimmelvækst i konstruktioner og på overflader. Modellen kan bruges på forskellige materialeklasser, LIM 0 - LIM II, hvor LIM 0 er under optimale vækstbetingelser, LIM I er vækst på organisk materiale og LIM II er vækst på uorganisk materiale (Sedlbauer, 2002).

Til begge modeller er der udviklet software og tilføjelsesprogrammer til WUFI Pro, der viser vækstforløbet. Programmerne giver et let aflæseligt overblik over evt. udvikling af skimmelvækst.

En af de væsentlige forskelle på de to modeller er, at VTT-modellen begrænser skimmelvæksthastigheden til en klima-afhængig maksimalværdi, mens LIM-modellen viser kontinuerlig vækst, så længe der er passende vækstbetingelser (Viitanen, et al., 2015).

Ud over VTT- og LIM-modellen findes der andre modeller og kriterier for, hvornår der er risiko for skimmel. DS/EN ISO 13788:2013 definerer en kritisk grænse for skimmelvækst ved $RF > 80\%$. Engelske undersøgelser af lette ydervægskonstruktioner definerede skimmelrisiko ud fra kriterier angivet i de engelske bygningsregulativer, hvor kriterierne var baseret på vandaktiviteten, a_w , og tid (figur 10, nederst tv) (Marincioni, Lorenzetti, & Altamirano-Medina, 2019).

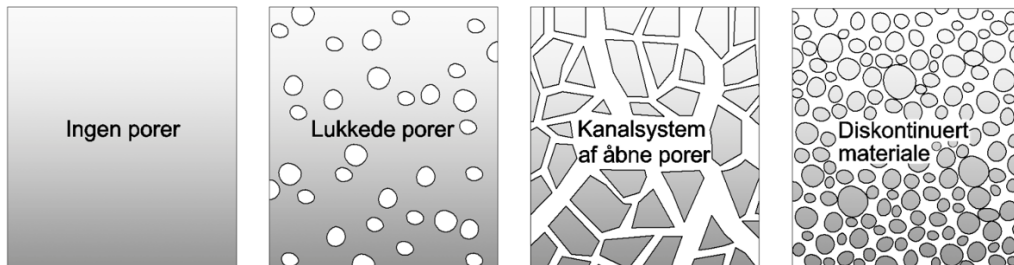


Figur 10. Forskellige modeller for forudsigelse af skimmelvækst. Øverst (tv) er vist en sammenstilling af bl.a. LIM- og VTT-modellen (Ojanen, et al., 2010, figur 3). Nederst (tv) ses skimmelkriterier angivet i de engelske bygningsregulativer (HM Government, 2010, tabel A1). Figuren (th) viser risiko for skimmelsvampevækst på træ, som afhænger af temperatur og træets vandindhold udtrykt som vægtprocent vand eller RF (Valbjørn, 2003, figur 52).

For vurdering af skimmelrisiko henviser Brandt (2013) dels til tidligere danske publikationer (der inkluderer svenske skimmelmodeller af ældre dato), dels til VTT-modellen og dels til LIM-modellen. I SBI-vejledning om håndtering af fugt i byggeriet vises LIM-modellen for hhv. organiske og uorganiske materialer (Møller E. B., 2010). Det samme gør sig gældende i materialet til kommende SBI-anvisninger om skimmelsvampe (Thrane, 2019). I denne rapport vurderes skimmelrisiko ud fra LIM-modellen.

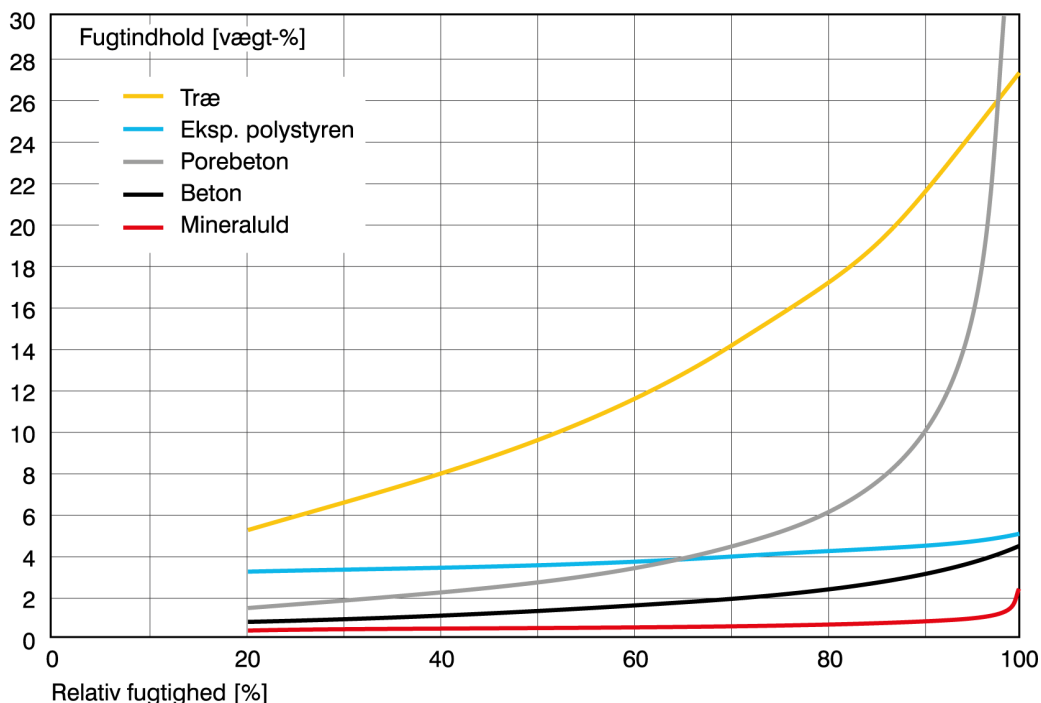
3.4.3 Sammenhængen mellem vægtprocent og relativ fugtighed

De fleste materialer der anvendes i byggeriet, på nær glas og metal, er hygroskopiske. De indeholder et poresystem, hvis form og størrelse har betydning for hvordan materialet kan optage og afgive fugt, og hvordan fugt kan transporteres gennem materialet (Brandt, 2013). Poresystemer inddeles ud fra materialestrukturen i 4 grupper, se figur 11.

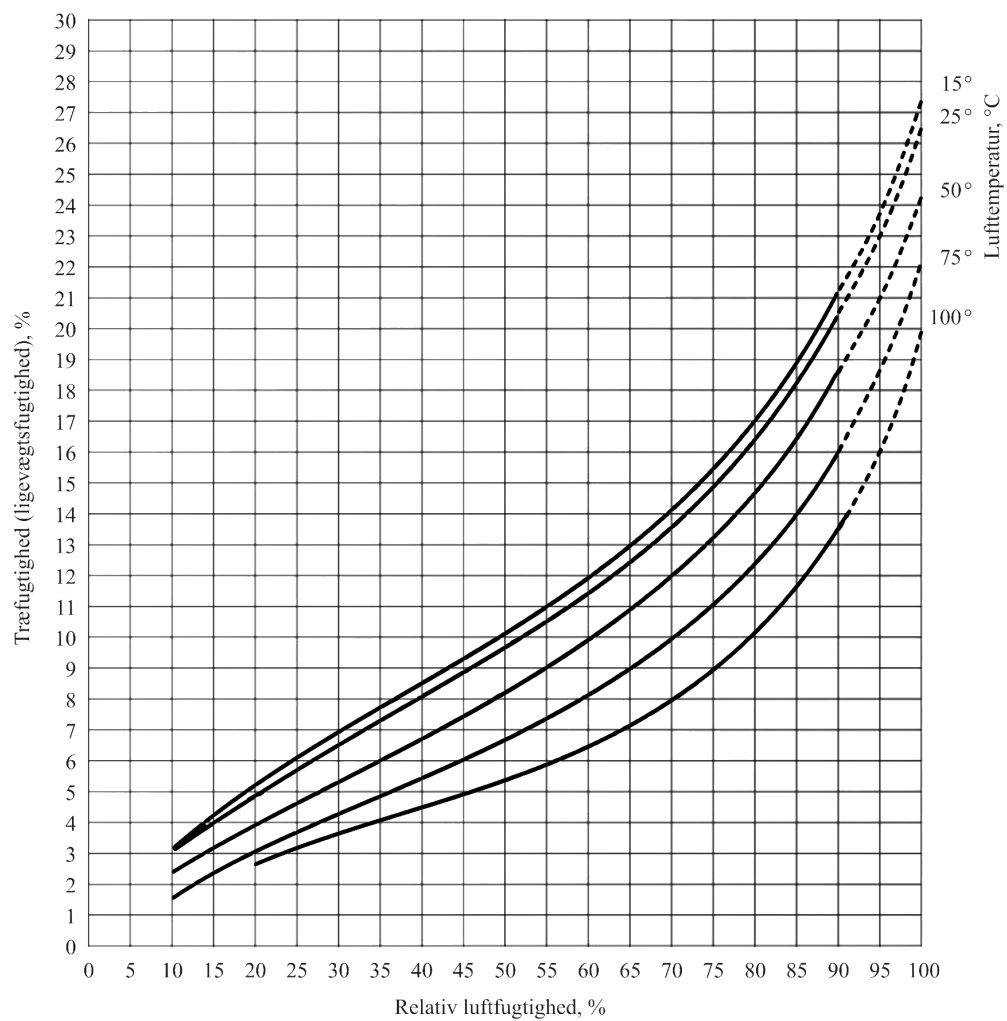


Figur 11. Materialer uden porer, fx glas og metal (tv). Materialer med lukkede porer, fx celleglas, EPS og XPS (mtv). Materialer med sammenhængende poresystem omfatter de mest almindelige byggematerialer, fx træ, tegl, beton og letbeton (mth). Diskontinuerte materialer, fx grus og mineraluld. (Brandt, 2013, figur 8).

Hygroskopiske materialer optager og afgiver fugt indtil de går i ligevægt med fugtindholdet i luften omkring dem. Sammenhængen mellem materialets fugtindhold og luftens relative fugtighed afhænger af materialetypen, og aflæses på fugtligevægtskurver, sorptionskurver. Kurvernes form kan være meget forskellige inden for samme materialegruppe, det afhænger bl.a. materialets densitet og porestruktur, men generelt har træ og træbaserede materialer ved en given RF et højere fugtindhold end fx tegl og beton ved samme RF (Brandt, 2013).



Figur 12. Sorptionskurver for forskellige materialer. Af figuren kan det aflæses, at hvis porebeton er i fugtligevægt ved 90 % RF, så har det et fugtindhold på 10 vægtprocent. (Rode, 2012, figur 4.7).



Figur 13. Sorptionskurver for træ ved forskellige lufttemperaturer viser sammenhængen mellem RF og træfugtighed i vægtprocent. (Thomassen, 2000, figur 13)

4 Metoder og materialer

4.1 Referencekonstruktion

Der er taget udgangspunkt i en referencekonstruktion af træskelet med udvendig, ventileret træbeklædning og vindspærreplade. Dampspærren er placeret et stykke inde i isoleringen, og indvendigt er der forskalling/isolering og 2 gipsplader. Konstruktionen er opbygget efter almen teknisk fælleseje, med en U-værdi $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ og som beskrevet i (Munch-Andersen, 2018). U-værdien er eftervist i bilag A.

4.1.1 Målepunkter

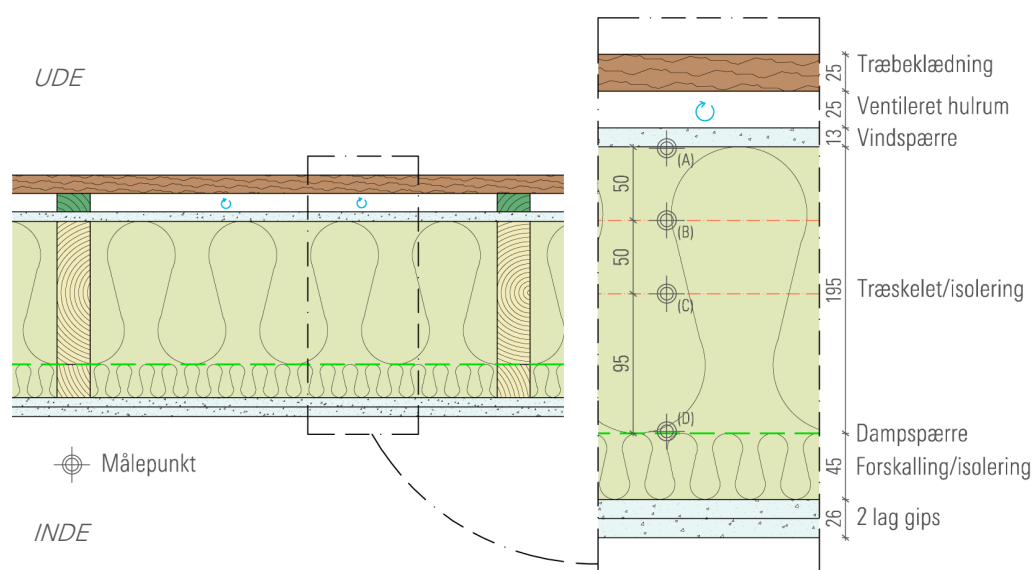
Målepunkterne i beregningerne (pkt. A, B, C og D) er alle placeret i isoleringen, på den kolde side af dampspærren. Placeringerne fremgår af figur 14.

Pkt. A er lige bag vindpladen

Pkt. B er i den yderste del af isoleringslaget, 50 mm fra vindpladen

Pkt. C er midt i isoleringslaget, 100 mm fra vindpladen

Pkt. D er lige bag dampspærren, på udvendig side.



Figur 14. Referencekonstruktion, vandret snit. Målepunkterne (A-D) er placeret i isoleringen, på den kolde side af dampspærren. I referencekonstruktionen er dampspærren en 0,20 mm PE-folie, isoleringen er mineraluld og vindspærren er en vindgipsplade.

4.2 Stationære beregninger

Stationære beregninger er udført for at give et hurtigt overblik over fugtforholdene i konstruktionen og kan ses som et supplement til de dynamiske beregninger.

4.2.1 Materialeparametre og randbetingelser (stationære beregninger)

De stationære beregninger er udført som beskrevet i DS/EN 13788. Beregningsopstillingen er vist i bilag B. Materialedata og randbetingelser:

- λ -værdier er iht. DS 418:2011
- δ og Z-værdier er iht. (Brandt, 2013)
- Randbetingelser ude er efter testreferenceåret, TRY iht. (Brandt, 2013).
- Randbetingelser inde er iht. (Brandt, 2013) tabel 4
- RF_{inde} for fugtbelastningsklasse 5 er ikke angivet i tabel 4, og er derfor beregnet iht. DS/EN ISO 13788.

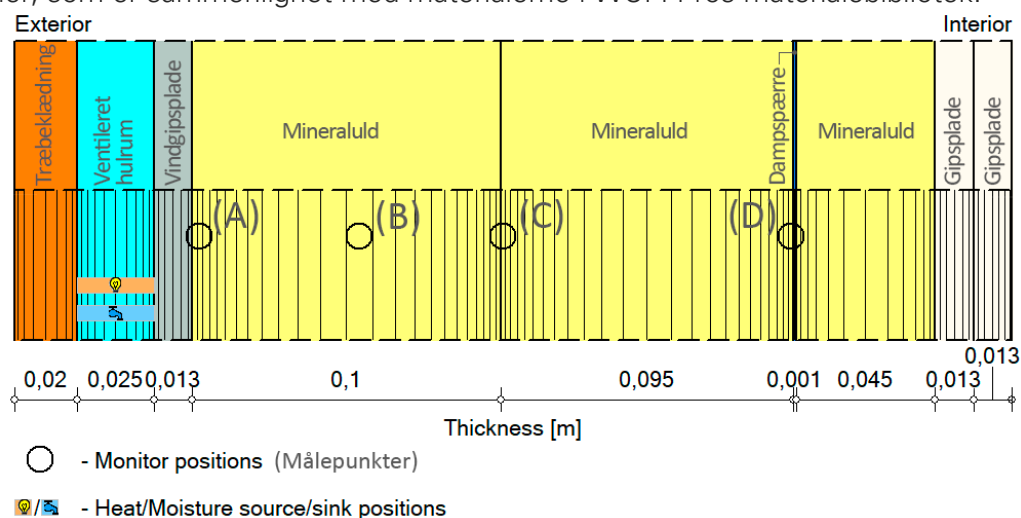
Stationære beregninger i afsnit 5.1.1 er vist for fugtbelastningsklasse 3, da alle boliger forventes at ligge i denne klasse eller lavere.

4.3 Dynamiske simuleringer

Simuleringer er udført med WUFI Pro, der er udviklet til beregning af realistiske varme- og fugttransportprocesser i bygningskonstruktioner (Fraunhofer, 2019).

4.3.1 Referencemodellen

Referencemodellen i WUFI Pro er opbygget med samme geometri og materialer som defineret i afsnit 4.1. I referencemodellen er materialerne, på nær dampspærremembranen, udvalgt fra WUFI Pros materialebibliotek så de svarer til almindeligt anvendte materialer i det danske byggeri. Der er lagt vægt på producenters oplysninger om fugt- og varmeegenskaber for udvalgte materialer, som er sammenlignet med materialerne i WUFI Pros materialebibliotek.



Figur 15. Referencekonstruktion som den er opbygget i WUFI Pro, lodret snit. Målepunkterne (A-D) er placeret i isoleringen, på den kolde side af dampspærren. "Heat/Moisture source/sink positions" angiver at der er indsat et ventileret hulrum i simuleringssmodellen med et luftskifte på 30 h^{-1} .

4.3.2 Materialeparametre

Materialeparametre for materialerne i referencemodellen fremgår af tabel 1.

Tabel 1. Materialeparametre for materialerne i referencemodellen.

Materialeparametre					
Materiale	Densitet	Porøsitet	Specifik varme- kapacitet	Varme- ledningsevne	Vanddampdiffusionsmod- standsfaktor
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
Træbeklædning	420	0,75	1600	0,13	50
Vindgipsplade	1153	0,52	1200	0,32	16
Mineraluld	32,5	0,95	840	0,032	1
Dampspærre	130	0,001	2300	2,3	0-100.000 ¹
Gipsplade	850	0,65	850	0,20	8,3

¹ Membraner med forskellige dampdiffusionsmodstande, se tabel 2.

De dynamiske simuleringer ønskes udført med forskellige, valgte Z-værdier for dampspærreplanet. I WUFI Pro lader dette sig gøre ved at indsætte et membranmateriale med en tilhørende vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ . For at kunne lave simuleringer, hvor det kun er dampdiffusionsmodstanden for dampspærreplanet der ændres, som det gøres for de stationære beregninger, er der valgt en generisk membrantype fra Fraunhoferbiblioteket, dvs. en membran der ikke er producentspecifik, hvor kun vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren skifter for hver type. De øvrige materialeparametre for membrantypen er ens. De generiske membrantyper i Fraunhoferbiblioteket er benævnt ved deres S_d -værdi, og passer ikke alle med de valgte Z-værdier. Membrantypen i Fraunhoferbiblioteket er duplikeret, og kun μ er justeret i de dupliserede typer for at kunne lave simuleringer med valgte Z-værdier for dampspærreplanet, som svarer nogenlunde overens med Z-værdierne i de stationære beregninger. For sammenlignelighedens skyld tydeliggøres i tabel 2.

Tabel 2. Sammenligning mellem Z-værdier brugt i de stationære beregninger og figurer, og S_d - og μ -værdier brugt i WUFI Pro simuleringsprogrammet.

Stationære beregninger										
Z-værdi [GPa m ² s / kg]	-	150	-	50	25	10	5	3	1,5	0
Dynamiske beregninger										
S_d -værdi [m]	100	-	20	10	5	2	1	0,6 ¹	0,3 ¹	0
Z-værdi [GPa m ² s / kg]	512,82	-	102,56	51,28	26,64	10,26	5,13	3,08	1,54	0
μ [-]	100.000	-	20.000	10.000	5.000	2.000	1.000	600	300	0

¹ Dupliserede membrantyper med justeret vanddampdiffusionsmodstandsfaktor.

4.3.3 Overgangsmodstande

Overgangsmodstande for varmetransmission og fugtmodstand fremgår af tabel 3. Overgangsisolanserne er defineret iht. DS 418:2011. Det tages udgangspunkt i en ubehandlet træbeklædning, og derfor er der ikke indsat nogen udevendig fugtmodstand (no coating). Indvendig fugtmodstand er defineret for sili-katmaling ($S_d = 0,01$ m, hvilket svarer til en Z-værdi på 0,05 GPa s m² / kg). Strålingsabsorptans er defineret for ubehandlet træ.

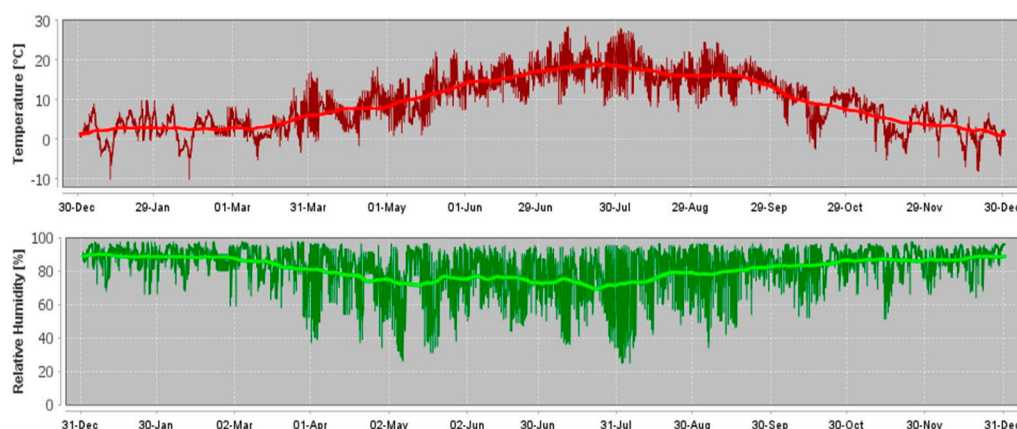
Tabel 3. Overgangsmodstande for varmetransmission og fugtmodstand.

Overgangsmodstande	Værdi	Enhed	Kommentar
Udvendig overgangsisolans, R_{se}	0,04	[m ² K/W]	Vandret varmestrøm
Udvendig fugtmodstand, $S_{d,ude}$	0	[m]	Ingen overfladebehandling
Kortbølget strålingsabsorptans	0,4	[-]	Ubehandlet grantræ
Jordens strålingsreflekstans	0,2	[-]	WUFI Pro standardværdi
Indvendig overgangsisolans, R_{si}	0,13	[m ² K/W]	Vandret varmestrøm
Indvendig fugtmodstand, $S_{d,inde}$	0,01	[m]	Silikatmaling

4.3.4 Indeklima, udeklima og orientering

Indeklimaet simuleres iht. DS/EN 13788. Det bemærkes, at indetemperaturen simuleres som en middelværdi på 20 °C, hvilket er et par grader lavere end normale indendørsforhold, hvor en bedre isoleret klimaskærm giver højere indetemperaturer, som det fx også ses efter energirenoveringer (Niras, 2013).

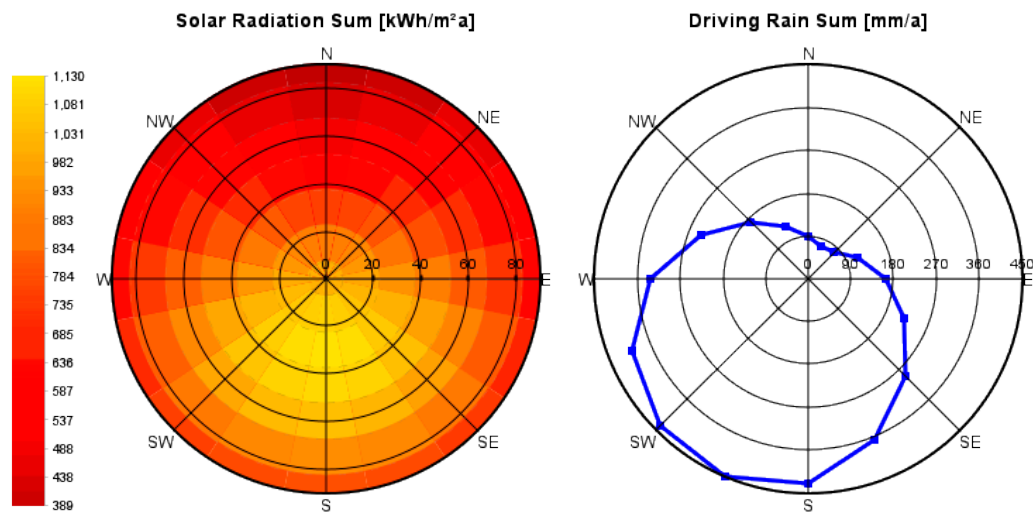
Udeklimaet er sat til Lund; LTH Data, hvilket er det udeklimadatasæt der kommer tættest på danske forhold. I datasættet findes ikke skydækkedata, derfor er der indsat en skydækkfaktor på 0,66, hvilket svarer godt overens med Danmarks årlige middelskydække (1874-2004) på 65 %, og 67 % i 2011-2012 (Cappelen & Hesselbjerg, 2005) og (Cappelen, 2020)



Figur 16. Udeklimadata, Lund LTH Data, temperatur og relativ fugtighed.

Orienteringen er valgt til nord, der har den laveste slagregnsbelastning og laveste solindstråling. Da beklædningen er ventileret efter to-trinstætningsprincippet og da målepunkterne ligger bag vindpladen (i isoleringslaget) er slagregnen uden betydning. Solstråling er derimod ikke uden betydning, idet mere solbeskinnede bygningsdele vil have større udtørningspotentiale end de mindre solbeskinnede. For at være på den sikre side er den mindre solbeskinnede nordvendte orientering valgt, som det anvises i (Fraunhofer IBP, 2018). Der er tale om en konservativ tilgang idet udtørningspotentialet for nordsiden er mindst. Andre og tilsvarende danske undersøgelser af fugtforhold i lette træskeletkonstruktioner blev simuleret med både nord- og sydvendt orientering, og det kunne ses, at RF generelt var højere ved den nordvendte orientering (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, 2017).

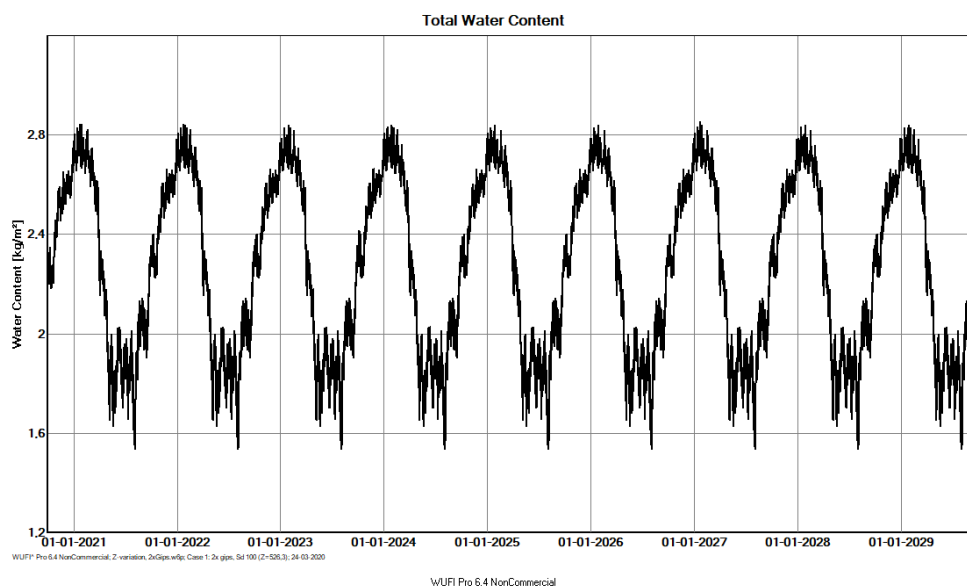
Andre norske undersøgelser af fugtforhold i træskeletkonstruktioner var ligeledes simuleret med en nordvendt orientering (Gullbrekken, et al., 2015).



Figur 17. Udeklimadata, Lund LTH Data, solstråling og regnbelastning.

4.3.5 Simuleringsperiode og databehandling

Grafen i figur 18 viser en simuleringen af referencekonstruktionen foretaget over en 9-årig periode. Modellen stabiliseres allerede efter et år. Simulationerne udføres indtil der opnås periodestabilitet, typisk 3 år, hvorefter data fra det sidste simuleringsår præsenteres.

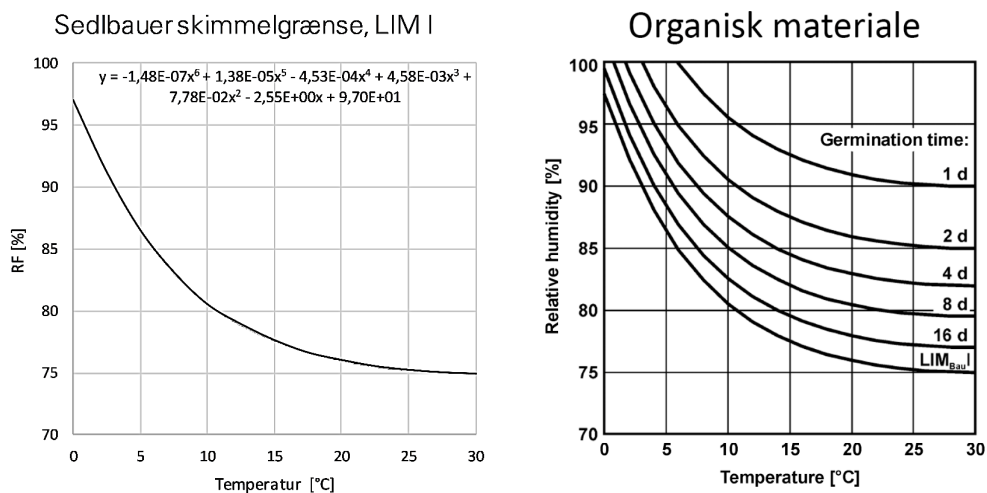


Figur 18. Figuren viser at simuleringsmodellen stabiliseres. Her er der foretaget en simulering over 9 år.

Figurer der viser simuleringer over et år er for tydelighedens skyld vist som glidende ugegennemsnit, der giver et godt overblik. Perioder, hvor det er relevant at zoom ind, og kigge nærmere på de faktiske forhold er vist med timeværdier.

4.4 Skimmelgrænse, LIM I

Skimmelrisiko vurderes på baggrund af (Sedlbauer, 2002) for organiske materialer, LIM I. Skimmelgrænsen, der er vist i resultatgraferne, er beregnet ud fra formelen angivet i figur 19, der viser den nedre grænse for skimmelvækst på organiske overflader i RF som funktion af temperaturen.



Figur 19. Skimmelrisiko vurderes på baggrund af LIM I-modellen for organiske materialer. Skimmelgrænsen i resultatgraferne er indtegnet som funktion af temperaturen angivet formelen i figuren (tv). Det ses, at kurven passer fint overens med LIM I-modellen (th).

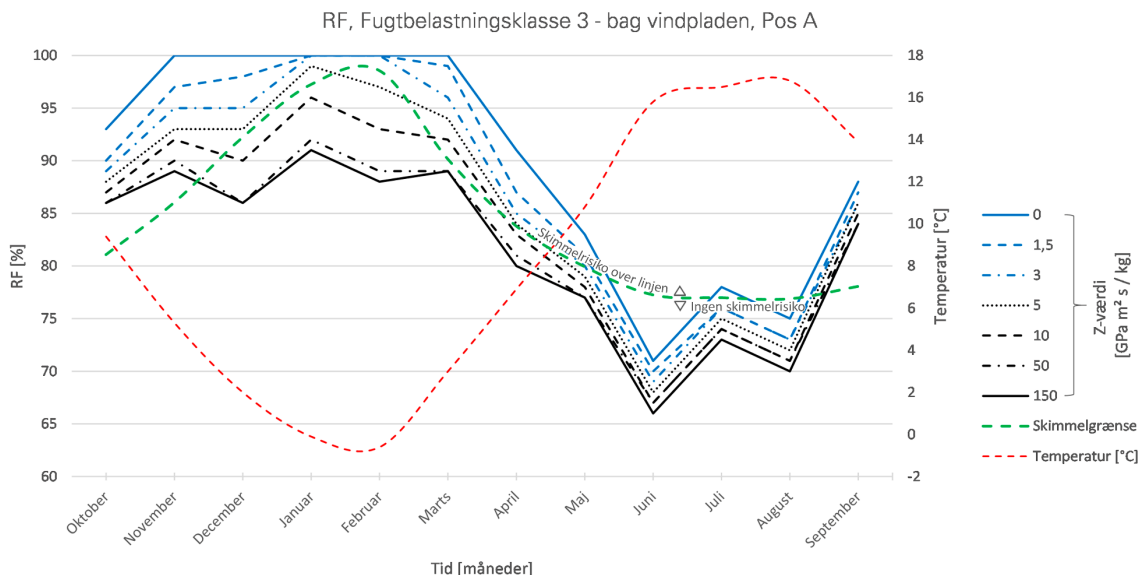
5 Resultater

5.1 Indledende analyser med forskellige Z-værdier

5.1.1 Stationære beregninger, forskellige Z-værdier

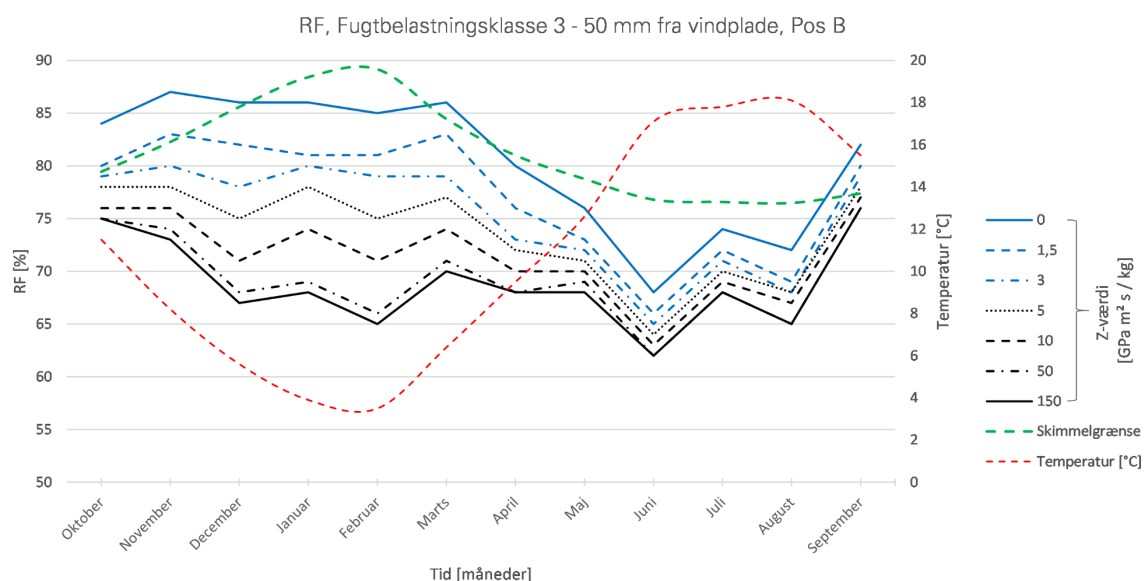
Resultater for stationære beregninger i fugtbelastningsklasse 3, over et år, for målepunkt A-D. Der er vist resultater af beregninger med forskellige valgte Z-værdier for dampspærreplanet, Z-værdier fra 0 – 150 GPa m² s / kg. Den relative fugtighed i målepunktet for de forskellige Z-værdier er vist med blå og sorte kurver. Temperaturen i målepunktet er vist med punkteret rød kurve. Skimmegrænsen er temperaturafhængig og varierer derfor over året. Da der i stationære beregninger arbejdes med månedsgennemsnit, kan skimmelgrænsen kun ses som vejledende. En egentlig vurdering af skimmelrisiko skal foretages på baggrund af de dynamiske simuleringer. Skimmelgrænsen er vist med punkteret grøn kurve og aflæses i % RF, og skal forstås således, at der på tidspunkter, hvor RF (blå og sorte kurver) ligger over grænsen, vil være risiko for skimmeldannelse i det pågældende målepunkt i konstruktionen.

Af figur 20 fremgår det, at der en stor del af året er risiko for skimmeldannelse bag vindpladen i ydervægskonstruktionen (Pos A) når dampdiffusionsmodstanden i materialelaget 'dampspærre' er lille, < 3 GPa m² s / kg (blå kurver). Omvendt fremgår det også, at der en stor del af året ingen risiko er for skimmeldannelse bag vindpladen når dampdiffusionsmodstanden i dampspærreplanet er stor (Z > 50 GPa s m² / kg) Den prikkede sorte kurve (Z = 5 GPa m² s / kg), og punkterede sorte kurve (Z = 10 GPa m² s / kg) ligger tæt på skimmelgrænsen og vil være interessant at kigge nærmere på i de dynamiske beregninger.



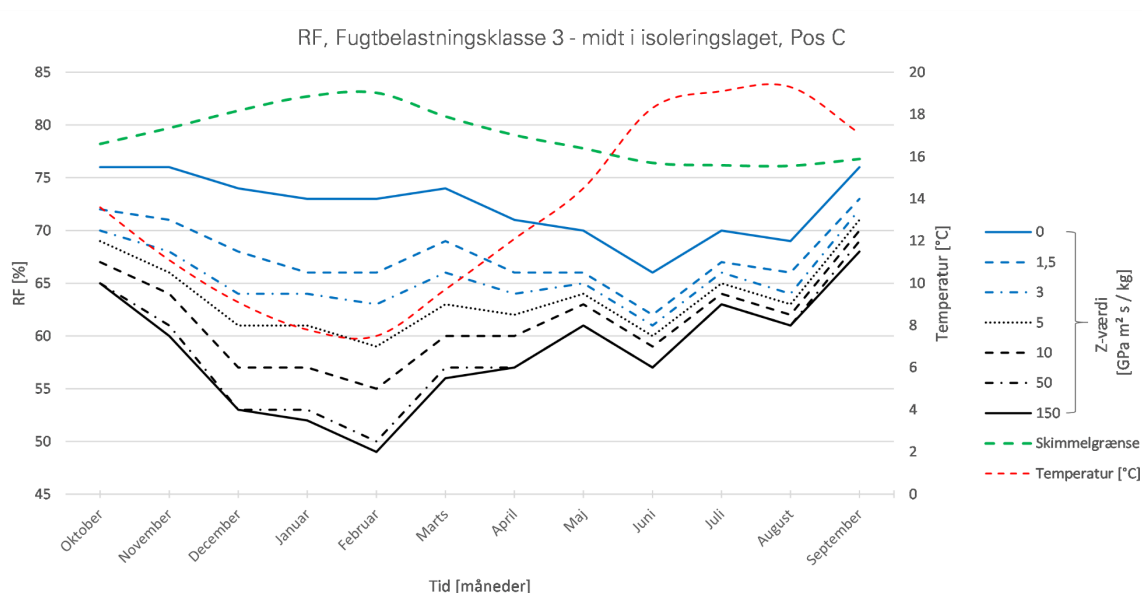
Figur 20. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 3. Skimmelgrænsen er beregnet som funktion af temperaturen og aflæses i % RF. Det ses at der en stor del af året er risiko for skimmeldannelse bag vindpladen i ydervægskonstruktionen, når dampdiffusionsmodstanden i dampspærrelaget er under 3 GPa s m² / kg.

Af figur 21 fremgår det, at der 50 mm fra vindpladen, i Pos. B, stort set ingen risiko er for skimmeldannelse, uanset dampspærreplanets Z-værdi. Det ses, at RF generelt ligger lavere og med mindre spænd hen over året, i Pos B, end for punktet lige bag vindpladen, i Pos A.



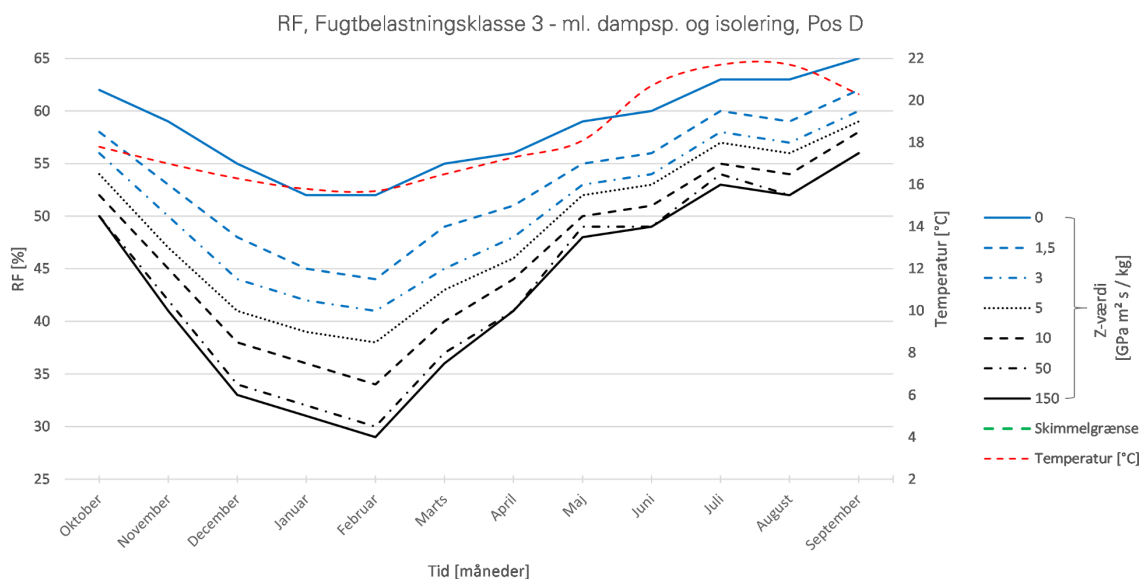
Figur 21. RF og temperatur 50 mm fra vindpladen (Pos B) i fugtbelastningsklasse 3. Der er mindre risiko for skimmeldannelse på dette sted i ydervæggen end længere ude, bag vindpladen.

Af figur 22 ses det, at der midt i isoleringslaget, i Pos C, er en højere temperatur og der ses lavere RF. På dette sted i konstruktionen er der ingen risiko for skimmelvækst.



Figur 22. RF og temperatur midt i isoleringslaget (Pos C) i fugtbelastningsklasse 3. Her er ses der ingen skimmelrisiko, selv ikke ved konstruktioner med lave Z-værdier for dampspærreplanet.

Af figur 23 fremgår temperatur og RF for målepunktet i isoleringslaget, lige bag dampspærren, i Pos D. Skimmelgrænsen ses ikke, da den ligger væsentligt over diagramområdet (mellem 75-77 % RF). Der ses ingen risiko for skimmelvækst lige bag dampspærren, uanset dampspærrens Z-værdi.



Figur 23. RF og temperatur lige bag dampspærreplanet (på den kolde side af dampspærren) (Pos D) i fugtbelastningsklasse 3. Der er ingen risiko for skimmel dannelse på dette sted i ydervæggen. Skimmelgrænsen ses ikke, da den ligger væsentligt over diagramområdet.

5.1.2 Sammenfatning – stationære beregninger

De stationære beregninger giver en umiddelbar indikation om, at der ved de høje Z-værdier $> 50 \text{ GPa m}^2 \text{ s / kg}$, ikke er stor forskel i RF for fugtbelastningsklasse 3. Det svarer fint overens med det almene tekniske fællereje, der anviser, at en dampspærre har tilstrækkelig stor dampdiffusionsmodstand, hvis den har en Z-værdi $> 50 \text{ GPa m}^2 \text{ s / kg}$, når den anvendes i boliger (Brandt, 2013). Ud fra den betragtning vil det være interessant at kigge nærmere på konstruktioner, hvor dampspærreplanet's Z-værdi ligger lavere end $50 \text{ GPa m}^2 \text{ s / kg}$. Det kunne også ses, at de mest kritiske relative fugtigheder forekommer i målepunktet bag vindpladen (Pos A) og at RF bliver mindre kritisk, jo længe ind mod den varme side af konstruktionen der kigges.

5.2 Dynamiske beregninger, boliger

Resultater fra de dynamiske beregninger for boliger der befinder sig i fugtbelastningsklasse 2 og 3 præsenteres i det følgende. Simuleringerne er udført for alle 4 positioner i konstruktionen (Pos A-D). Generelt viser de dynamiske simuleringer samme tendens som ses ved de stationære beregninger; at de mest kritiske fugtniveauer findes lige bag vindpladen (Pos A), og derfor er resultatgrafer for denne position vist i rapporten. Resultater fra de øvrige positioner findes i bilag C.

Resultaterne præsenteres først for hhv. fugtbelastningsklasse 3 og derefter fugtbelastningsklasse 2 med Z-værdier fra 0-50 GPa s m² / kg i afsnit 5.2.1 og 5.2.2. I afsnit 5.2.3 præsenteres resultaterne for fugtbelastningsklasse 2 og 3 i samme figur, og for overblikkets skyld er der her kun medtaget 3 forskellige Z-værdier.

Figurer der viser et forløb over et helt år er angivet som glidende ugegennemsnit. Skimmelgrænsen på disse figurer er ligeledes glidende ugegennemsnit, og kan derfor kun bruges som en indikator for, på hvilke tidspunkter af året det vil være relevant at kigge nærmere på fugtforholdene i konstruktionen. I afsnit 5.2.3 undersøges kritiske tidspunkter nærmere, og her er resultatgrafer vist som timeværdier.

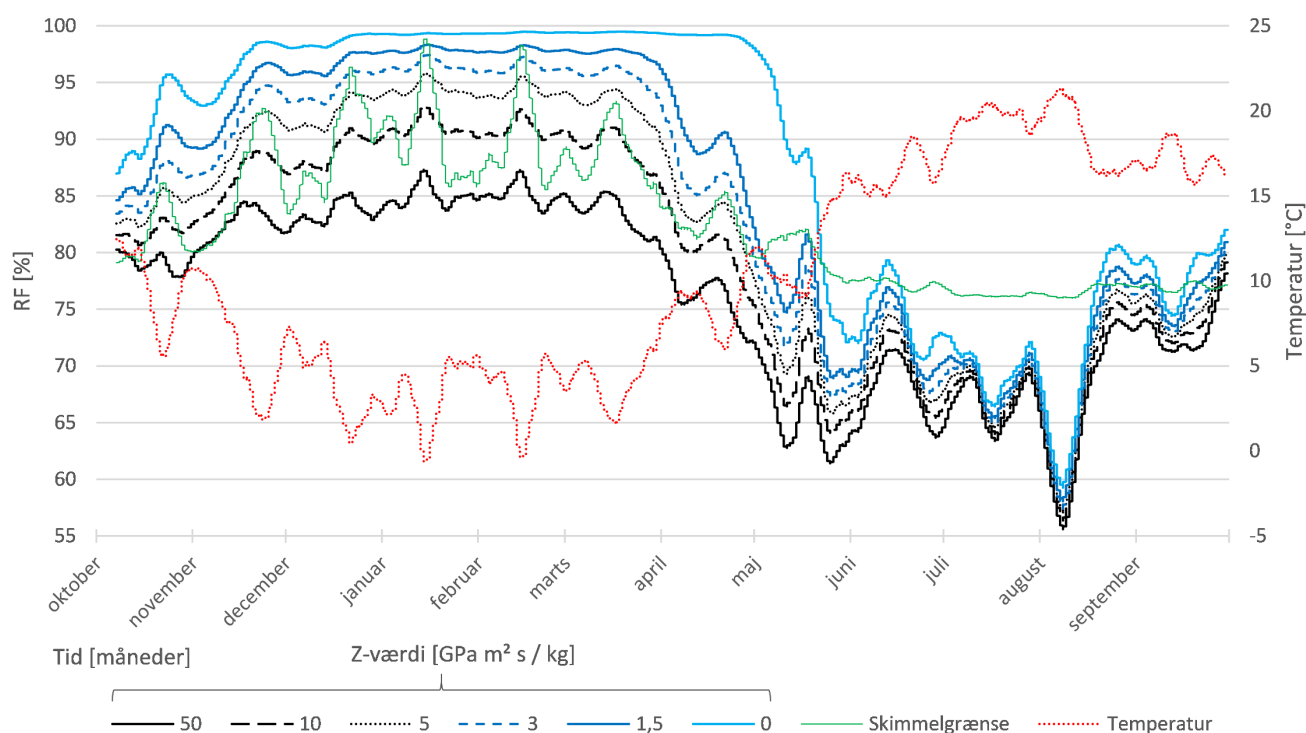
I afsnit 5.2.4 er fugtbelastningsklasse 1-3 medtaget i samme figur, med Z-værdier fra 0-50 GPa s m² / kg. Resultatkurver for alle måneder findes i bilag D i større format.

5.2.1 Simuleringer, forskellige Z-værdier, fugtbelastningsklasse 3

Resultater fra dynamiske beregninger i fugtbelastningsklasse 3, over et år, for målepunkt A, lige bag vindpladen, er vist i figur 24. Figuren viser forskellige simuleringer med forskellige, valgte Z-værdier for dampspærreplanet. Z-værdierne ligger mellem 0 – 50 GPa m² s / kg. (Den præcise Z-værdi, der er anvendt i simuleringen, fremgår af tabel 2, afsnit 4.3.2.) Den relative fugtighed i målepunktet for de forskellige Z-værdier er vist med blå og sorte kurver. Temperaturen i målepunktet er vist med punkteret rød kurve. Værdierne er vist som glidende ugegennemsnit.

For alle 4 målepunkter (Pos A - Pos D, der findes i bilag C) ses der generelt et tilsvarende billede af fugtforholdene som ved de stationære beregninger. For alle målepunkter ses det, at jo lavere dampspærreplanets Z-værdi er, jo højere RF aflæses i målepunktet. Det ses også, at forskellen i RF er størst om vinteren og mindst om sommeren.

RF, Fugtbelastningsklasse 3, Pos A

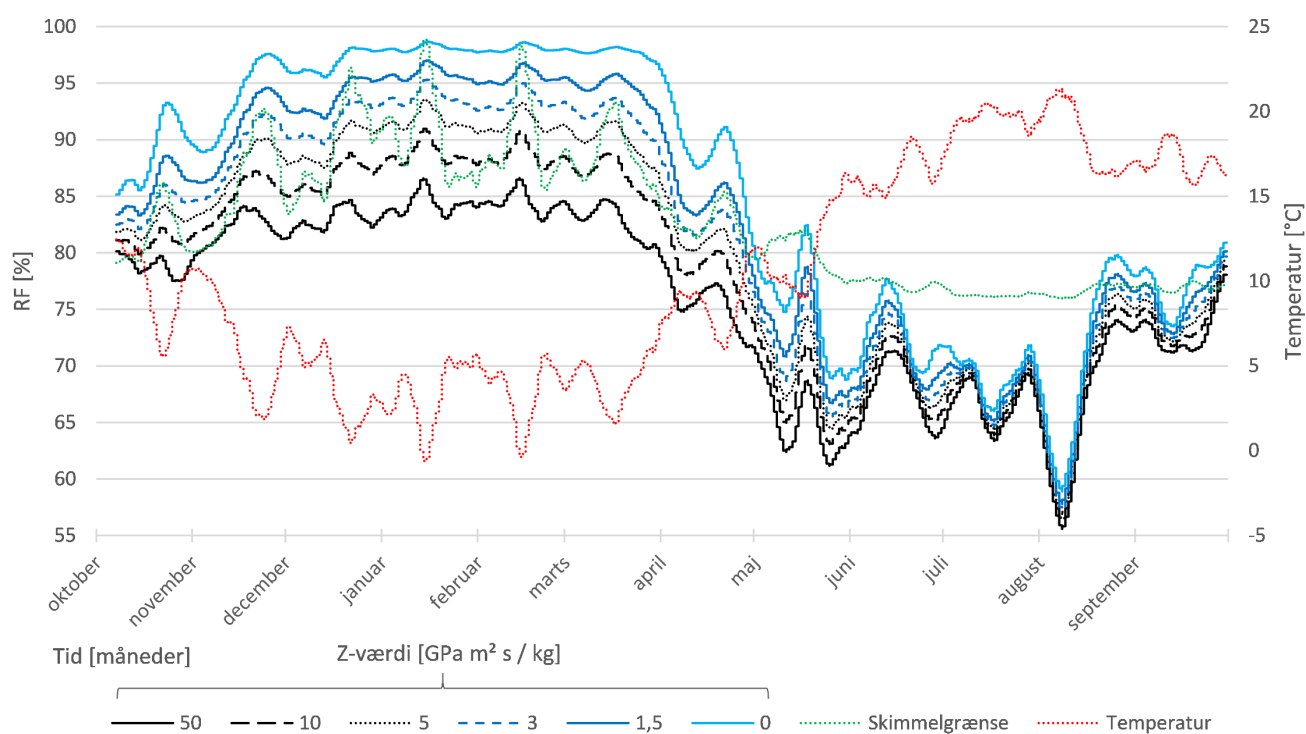


Figur 24. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 3. Værdierne er vist som glidende ugegnennemsnit. Skimmelgrænsen er beregnet som funktion af temperaturen og vist i % RF, som glidende ugegnennemsnit, og er derfor kun orienterende.

5.2.2 Simuleringer, forskellige Z-værdier, fugtbelastningsklasse 2

Tilsvarende resultater fra dynamiske beregninger i fugtbelastningsklasse 2, over et år, for målepunkt A-D, her vist for position A, lige bag vindpladen.

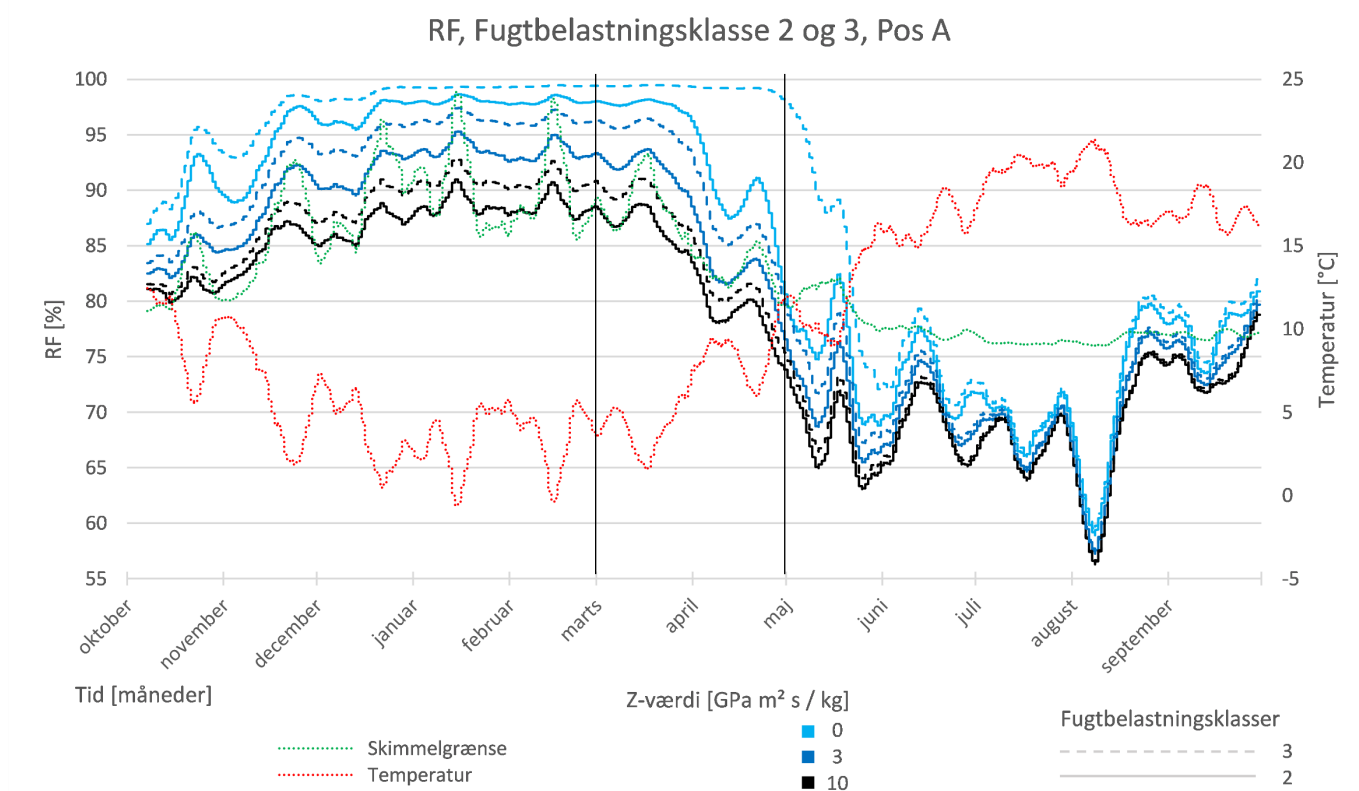
RF, Fugtbelastningsklasse 2, Pos A



Figur 25. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 2. Værdierne er vist som glidende ugegnennemsnit. Skimmelgrænsen er beregnet som funktion af temperaturen og vist i % RF, som glidende ugegnennemsnit, og er derfor kun orienterende. Resultatgrafer for de øvrige positioner findes i bilag C.

5.2.3 Simuleringer, forskellige Z-værdier, fugtbelastningsklasse 2 og 3

Fugtforholdene i fugtbelastningsklassen for boliger, i klasse 2 og 3, med Z-værdierne; 0, 3 og 10 GPa s m² / kg vurderes nærmere. Der kigges på forårsmånederne marts-maj, hvor temperaturen er stigende og hvor den relative fugtighed stadig er høj. Det ses af figur 26, at perioden marts-maj (mellem de 2 lodrette linjer) stort set dækker over det spænd i temperatur og RF, som er gældende for de øvrige kritiske måneder.



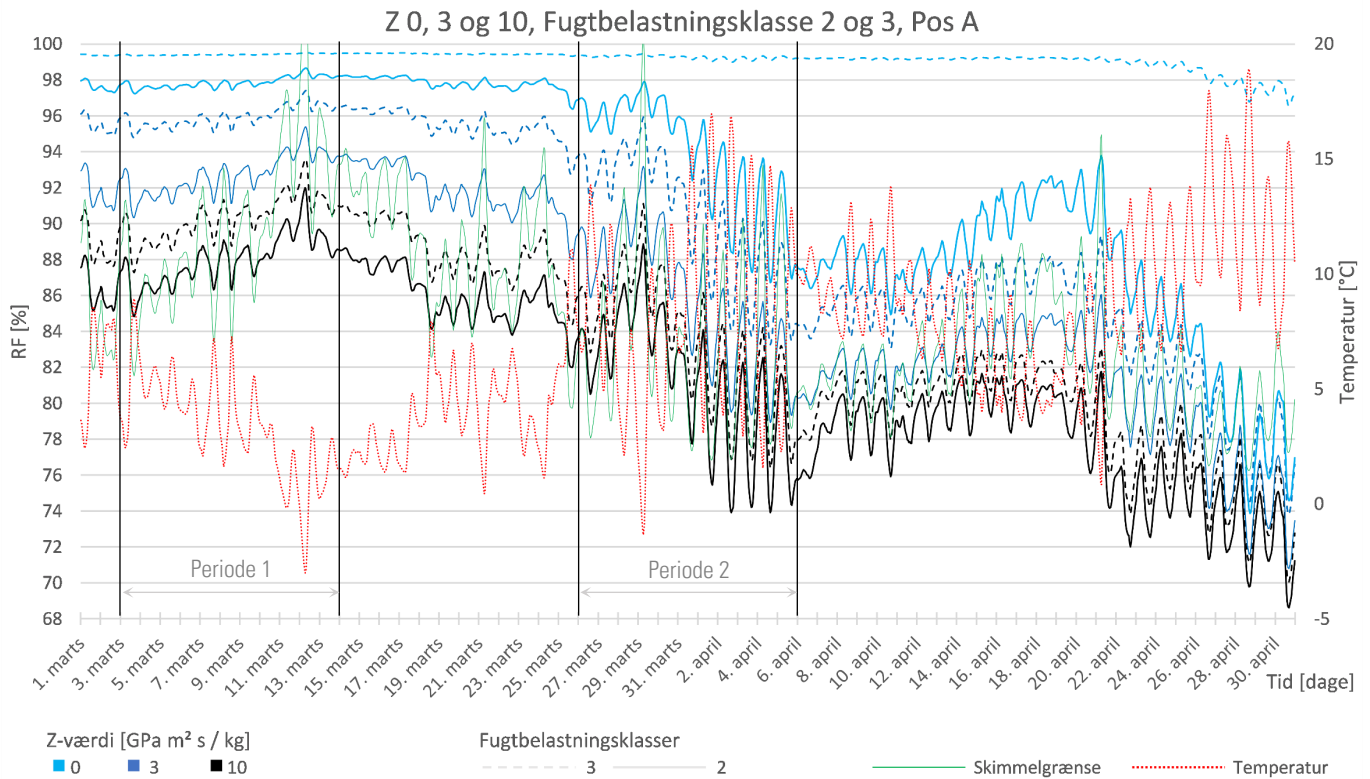
Figur 26. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 2 og 3. Værdierne er vist som glidende ugegensnit. Skimmelgrænsen er beregnet som funktion af temperaturen og vist i % RF, som glidende ugegensnit, og er derfor kun orienterende. Kurverne viser en forskydning mellem fugtbelastningsklasserne ved samme Z-værdi.

Figur 27 viser RF bag vindpladen i perioden marts – maj med timeværdier. For konstruktioner med lave Z-værdier for dampspærreplanet (0 og 3 GPa s m² / kg) ses kritiske forhold i stort set hele perioden i begge fugtbelastningsklasser. For konstruktioner med en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg, ses det, at der i fugtbelastningsklasse 2 kun er kortvarige perioder, hvor grænsen for skimmelrisiko krydses, og at der i fugtbelastningsklasse 3 findes RF bag vindpladen der er væsentligt tættere på skimmelgrænsen.

Da der i fugtbelastning 2 og 3 er høj risiko for skimmel bag vindpladen i en konstruktion med en Z-værdi i dampspærreplanet på 3 GPa s m² / kg, og da der ses en noget lavere risiko for skimmel i en konstruktion med en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg, vurderes det interessant at kigge

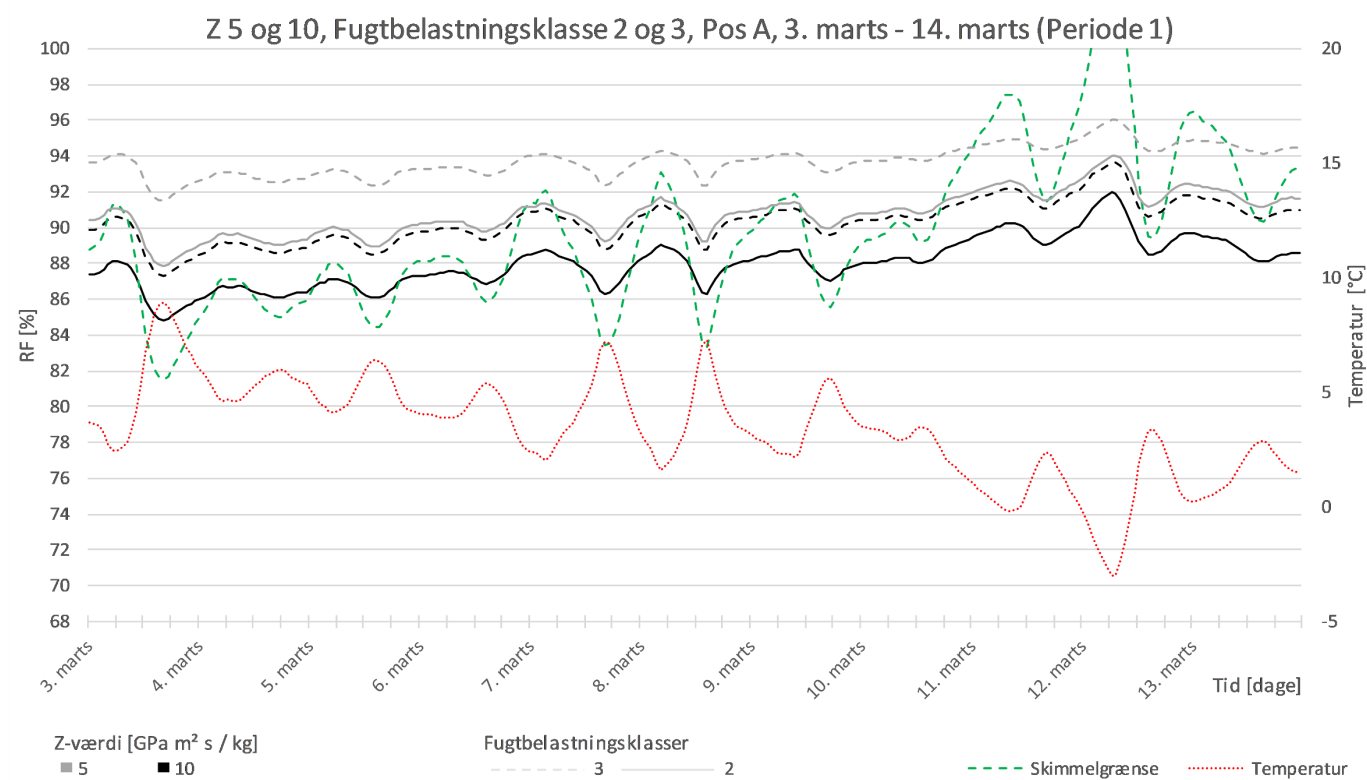
nærmere på, hvordan det ser ud med en konstruktion med en Z-værdi for dampspærreplanet på 5 GPa s m² / kg.

Dette er vist i de 2 zoomede områder (mellem de lodrette streger) for dagene fra 3. marts til 14. marts (Periode 1) i figur 28, og 26. marts til 6. april (Periode 2) i figur 29, hvor konstruktionen med en Z-værdi for dampspærreplanet på 5 GPa s m² / kg er inkluderet.

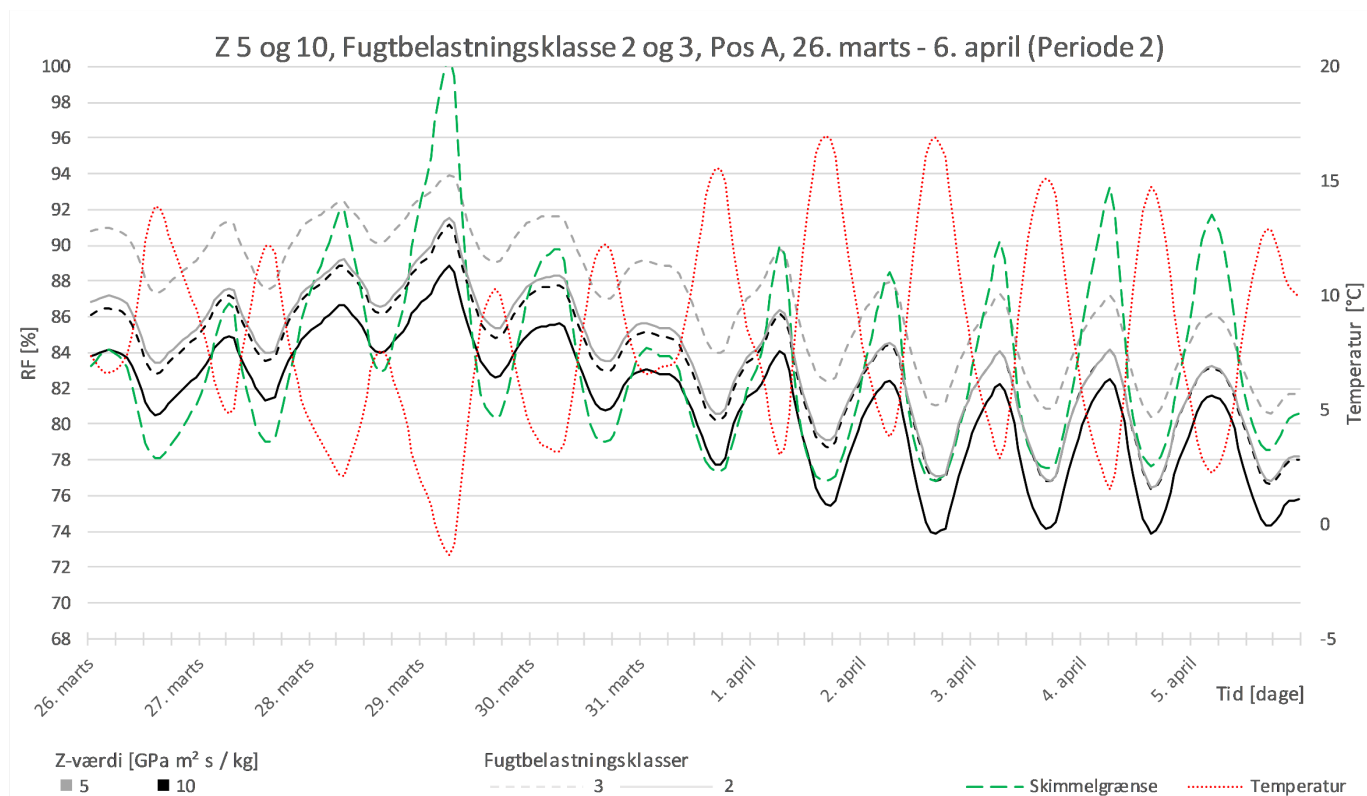


Figur 27. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 2 og 3 for perioden marts til maj. Værdierne er vist som timeværdier.

Det ses af figur 28 og 29, at den relative fugtighed bag vindpladen, for konstruktioner med en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg, i fugtbelastningsklasse 3, og 5 GPa s m² / kg i fugtbelastningsklasse 2 er stort set ens. Der findes sammenhængende perioder, hvor den relative fugtighed bag vindpladen for de to konstruktioner er over skimmelgrænsen. For konstruktionen med en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg, i fugtbelastningsklasse 2, ses der ingen længere, sammenhængende periode hvor den relative fugtighed bag vindpladen ligger over skimmelgrænsen. For konstruktionen med en Z-værdi for dampspærreplanet på 5 GPa s m² / kg, i fugtbelastningsklasse 3, ses der længere perioder, hvor den relative fugtighed bag vindpladen ligger over skimmelgrænsen.

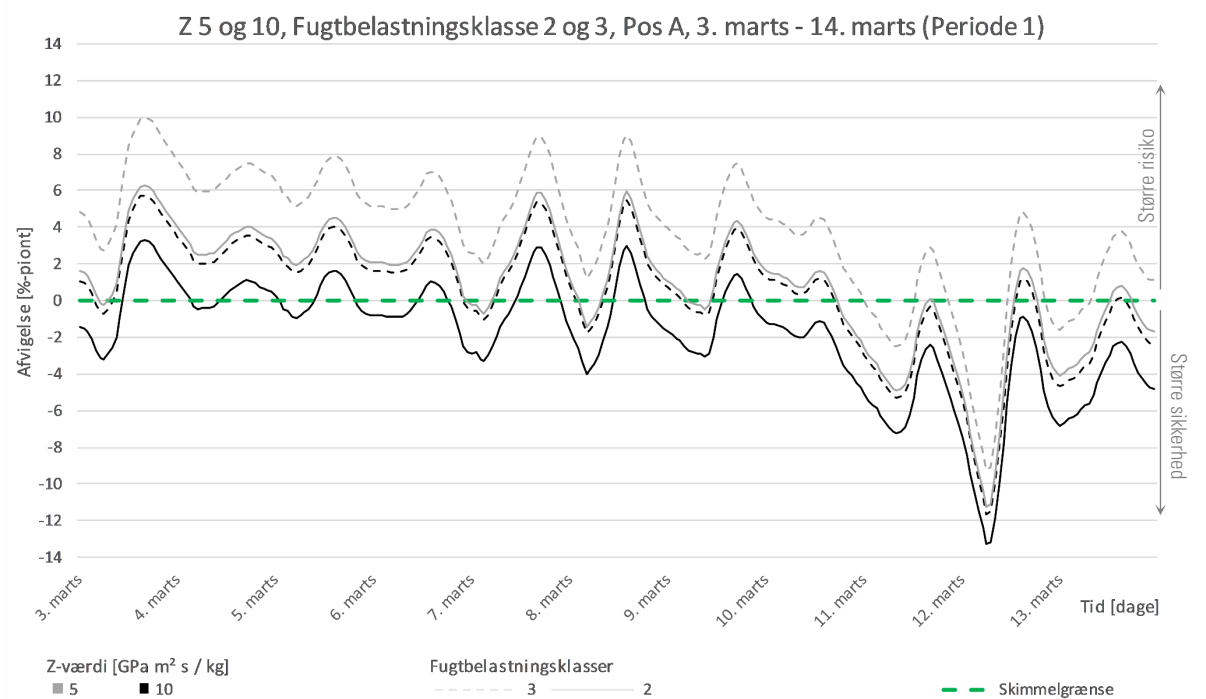


Figur 28. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 2 og 3 i periode 1 (3. marts - 14. marts).

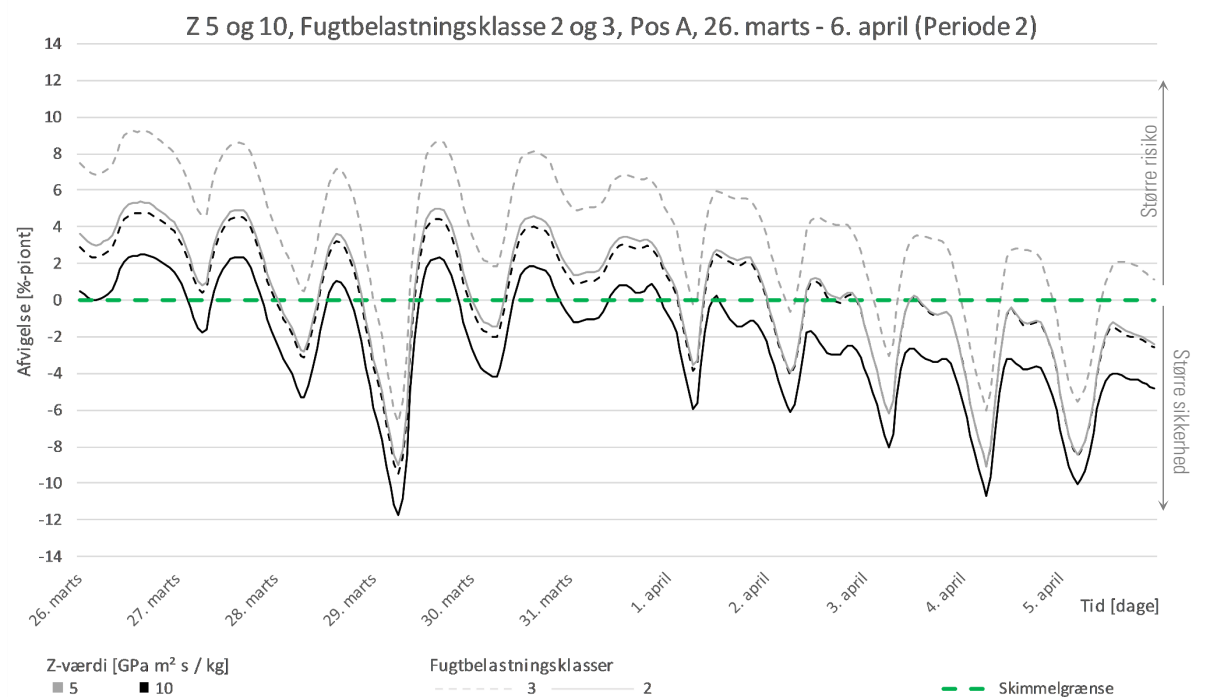


Figur 29. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 2 og 3 i periode 2 (26. marts – 6. april)

De sammenhængende perioder er tydeliggjort i figur 30 og 31, hvor afvigelsen fra skimmelgrænsen i procentpoint er afsat på y-aksen.



Figur 30. Afvigelse fra skimmelgrænsen i %-point for Periode 1. Jo større afvigelse over grænsen, jo større skimmelrisiko er der.

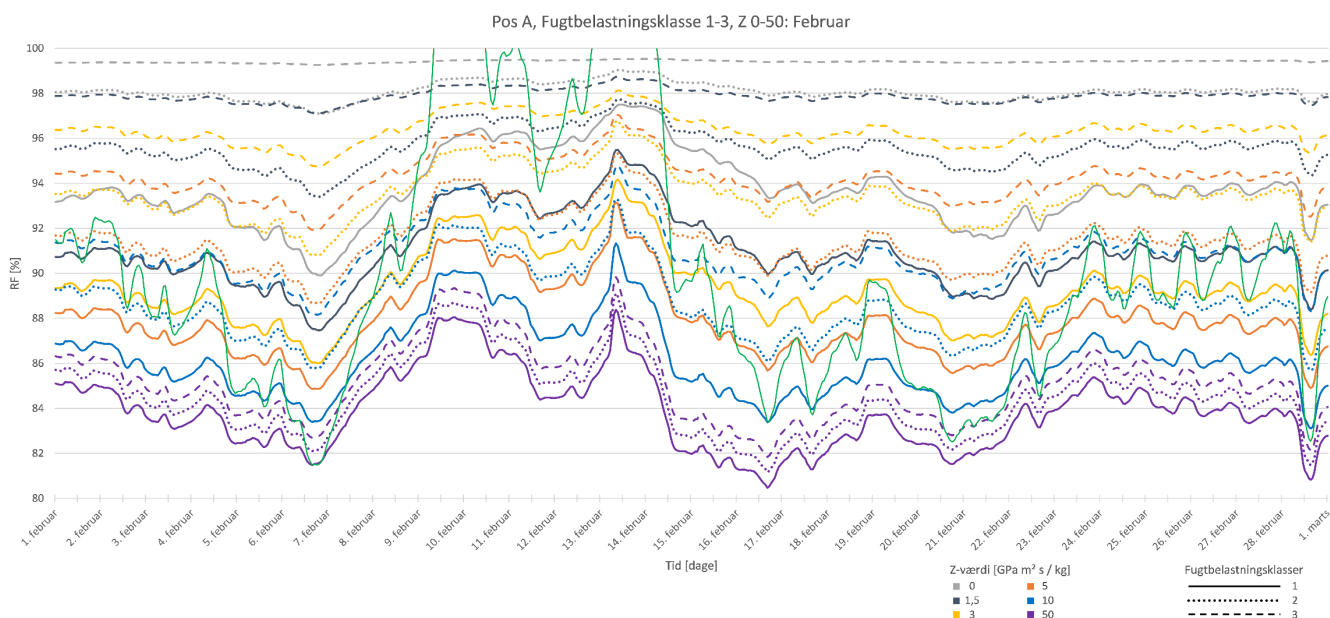


Figur 31. Afvigelse fra skimmelgrænsen i %-point for Periode 2. Jo større afvigelse over grænsen, jo større skimmelrisiko er der.

5.2.4 Fugtforhold bag vindpladen for bygninger i fugtbelastningsklasse 1-3

Af simuleringerne for boliger ses det, at en konstruktion med en Z-værdi på ca. 10 GPa s m² / kg i dampspærreplanet vil gå an i et parcelhus med normal beboelsestæthed og ventilation (fugtbelastningsklasse 2) men vil være forbundet med skimmelrisiko i en lejebolig med ukendt beboelsestæthed (fugtbelastningsklasse 3).

Fugtforholdene bag vindpladen i konstruktioner med Z-værdier i dampspærreplanet fra 0-50 GPa s m² / kg, i fugtbelastningsklasse 1-3 er analyseret nærmere, og danner baggrund for vurdering af skimmelrisiko bag vindspærren, vist i tabel 4 i afsnit 5.4. Figur 32 viser timeværdier for februar måned. Skimmelgrænsen, LIM I, er påtegnet som funktion af temperaturen (temperatur er ikke vist i figuren). Figurer for alle måneder er vist i bilag D i større format, inkl. supplerende beregninger for vinterhalvåret, hvor Z-værdier for dampspærreplanet på 15, 20 og 25 GPa s m² / kg er simuleret.



Figur 32. RF bag vindplade (Pos A) for fugtbelastningsklasse 1-3, februar måned. Figurer for øvrige måneder findes i bilag D.

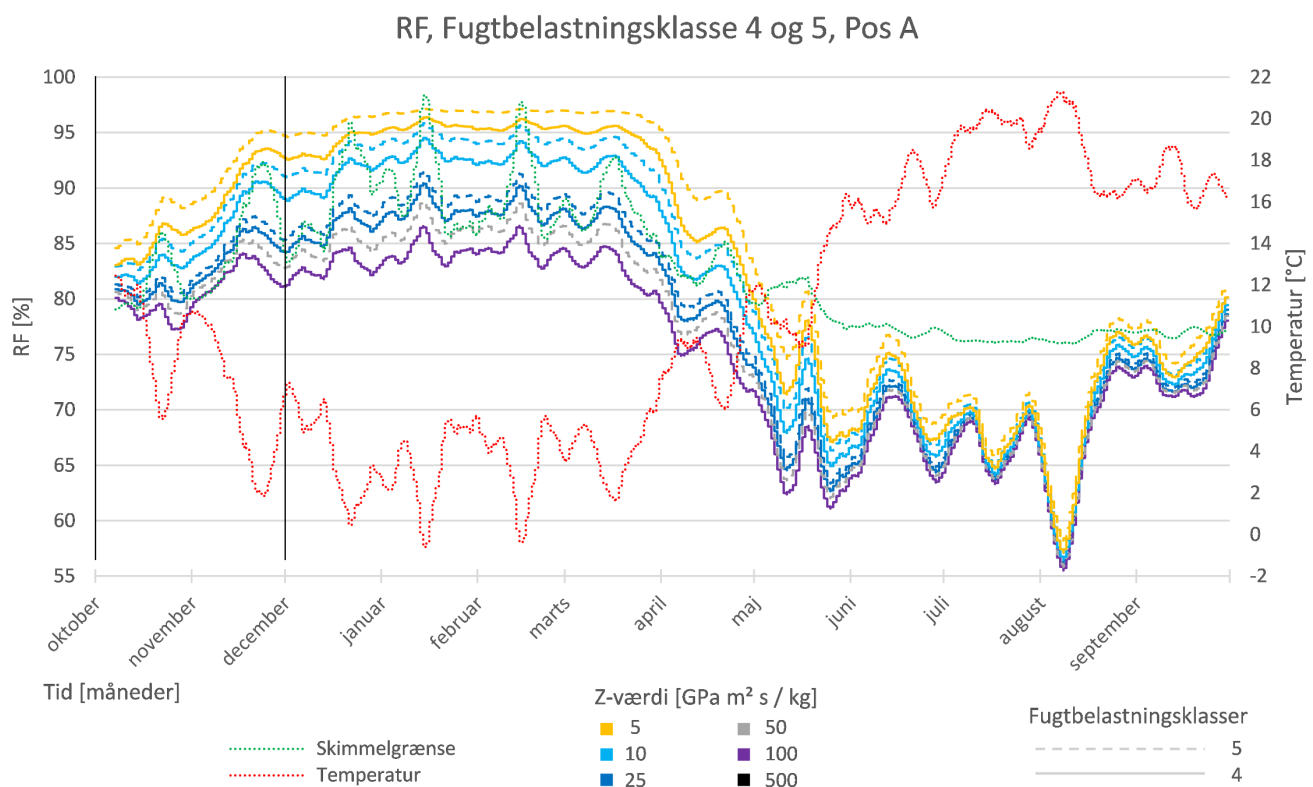
5.3 Fugtforhold i konstruktioner i fugtbelastningsklasse 4 og 5

Resultater fra de dynamiske beregninger for bl.a. omklædningsrum, vaskerier og svømmehaller, der befinder sig i fugtbelastningsklasse 4 og 5, præsenteres i det følgende. Der kigges nærmere på valgte Z-værdier fra 5 GPa s m² / kg og op. Simuleringer er udført for målepunkt A-D, og det ses, at de højeste relative fugtigheder findes lige bag vindpladen (Pos A). Værdier for Pos A er her vist, øvrige resultater findes i bilag E.

Som for fugtbelastningsklasse 2 og 3 findes de højeste relative fugtigheder og mest kritiske forhold i punktet lige bag vindpladen i fugtbelastningsklasse 4 og 5. Fugtforholdene bliver mindre kritiske, jo længere ind i konstruktionen der kigges.

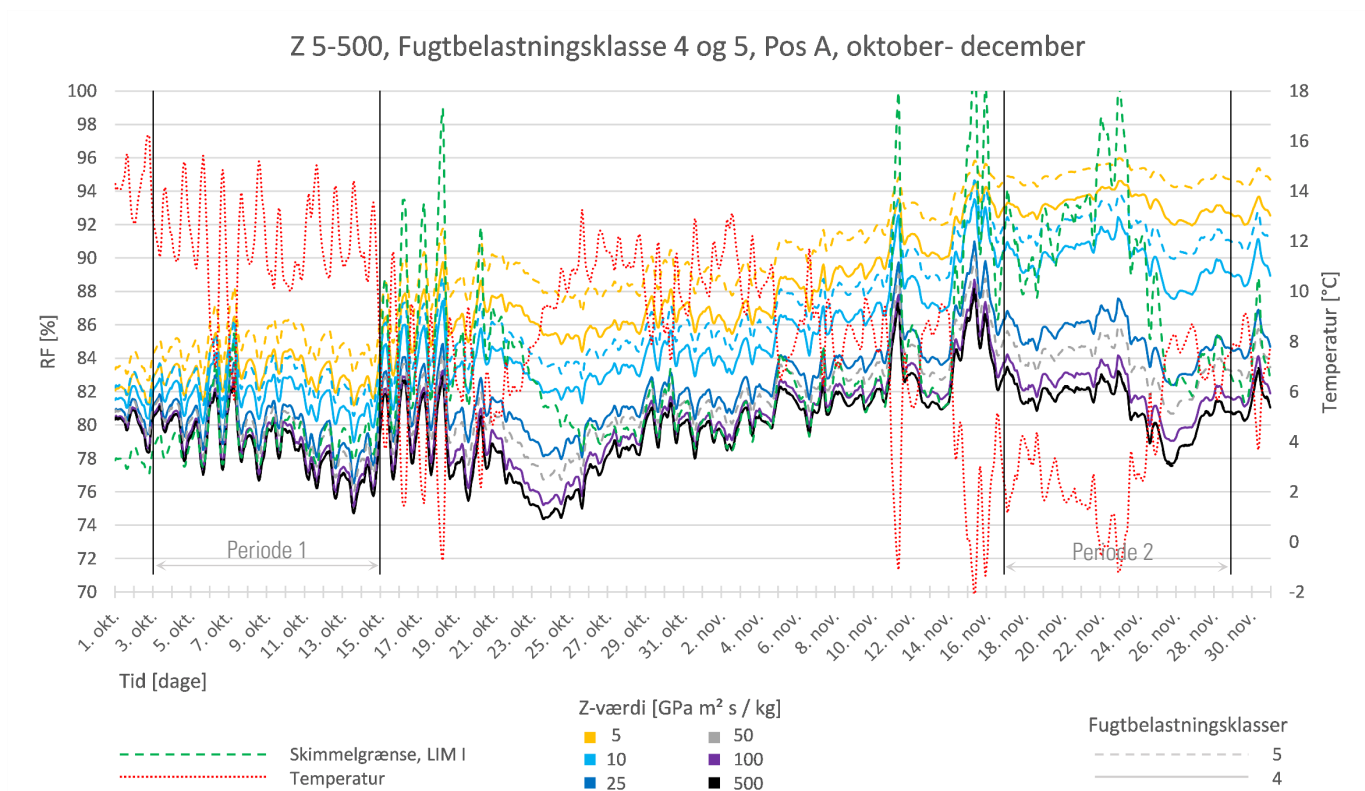
5.3.1 Fugtforhold bag vindpladen, fugtbelastningsklasse 4 og 5

I det følgende kigges der nærmere på fugtforholdene i målepunkt A, lige bag vindpladen, hvor det tyder på, at der kan findes kritiske forhold i store dele af efterårs-, vinter- og forårs månederne, særligt for de lavere Z-værdier. Perioden oktober-december, mellem de 2 lodrette streger i figur 33, repræsenterer stort set de fugt- og temperaturvariationer der ses over hele den kritiske periode.



Figur 33. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 4 og 5. Værdierne er vist som glidende ugegennemsnit. Skimmelgrænsen er beregnet som funktion af temperaturen og vist i % RF, som glidende ugegennemsnit, og er derfor kun orienterende. Data er reduceret: Kl. 4 - Z 500 repræsenterer også kl. 5 - Z 500, kl. 4 - Z 100 repræsenterer også kl. 5 - Z 100 og kl. 5 - Z 50 repræsenterer også kl. 4 - Z 50, da kurverne ligger meget tæt på hinanden. Kurverne viser en forskydning mellem fugtbelastningsklasserne ved samme Z-værdi for dampspærreplanet.

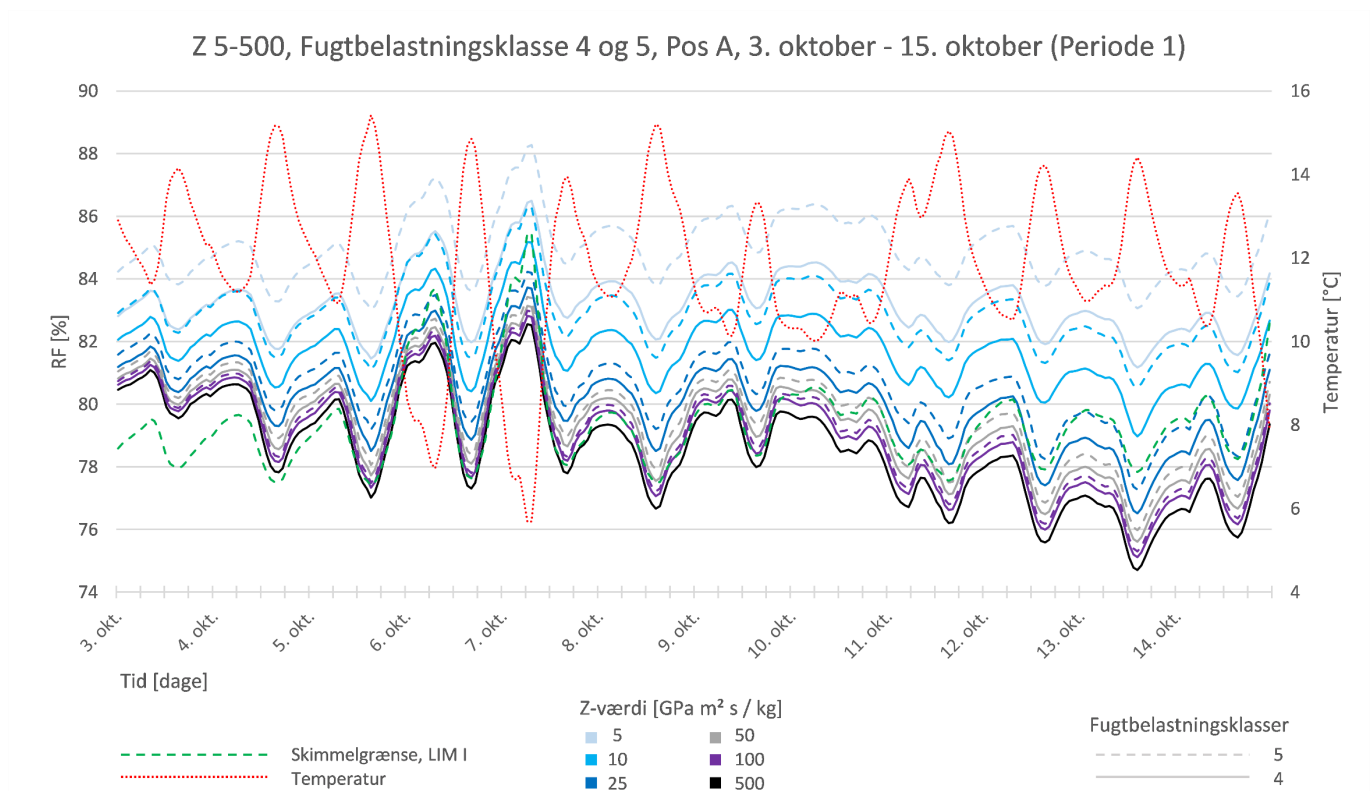
Det ses af figur 34, at det primært er de lavere Z-værdier i der i fugtbelastningsklasse 4 og 5 ligger over skimmelgrænsen. Der er zoomet ind på 2 perioder der repræsenterer temperatur og fugtforhold i de kritiske dele af året, mellem 3. og 15. oktober i figur 35 og mellem 17. og 29. november i figur 36.



Figur 34. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 4 og 5 for perioden oktober til december. Værdierne er vist som timeværdier. Data er reduceret: Kl. 4 - Z 500 repræsenterer også kl. 5 - Z 500, kl. 4 - Z 100 repræsenterer også kl. 5 - Z 100 og kl. 5 - Z 50 repræsenterer også kl. 4 - Z 50, da kurverne ligger meget tæt på hinanden. Periode 1 afspejler forhold i efterårs- og forårmånederne og periode 2 afspejler vinterforhold.

Det ses af figur 35 (Periode 1) at kombinationen af høj RF og temperatur medfører, at en stor del af konstruktionerne ligger over skimmelgrænsen. Konstruktionerne med de lave Z-værdier for dampspærreplanet (mellem 5 – 25 GPa s m² / kg) ligger over skimmelgrænsen i stort set hele perioden. Konstruktionen med en Z-værdi på 50 GPa s m² / kg for dampspærreplanet viser relative fugtigheder bag vindpladen, der ligger tæt på grænsen for skimmelvækst for både fugtbelastningsklasse 4 og 5. Konstruktionerne med de høje Z-værdier for dampspærreplanet, Z = 100 og 500 GPa s m² / kg viser relative fugtigheder bag vindpladen, der ligger på den sikre side af skimmelgrænsen i stort set hele perioden.

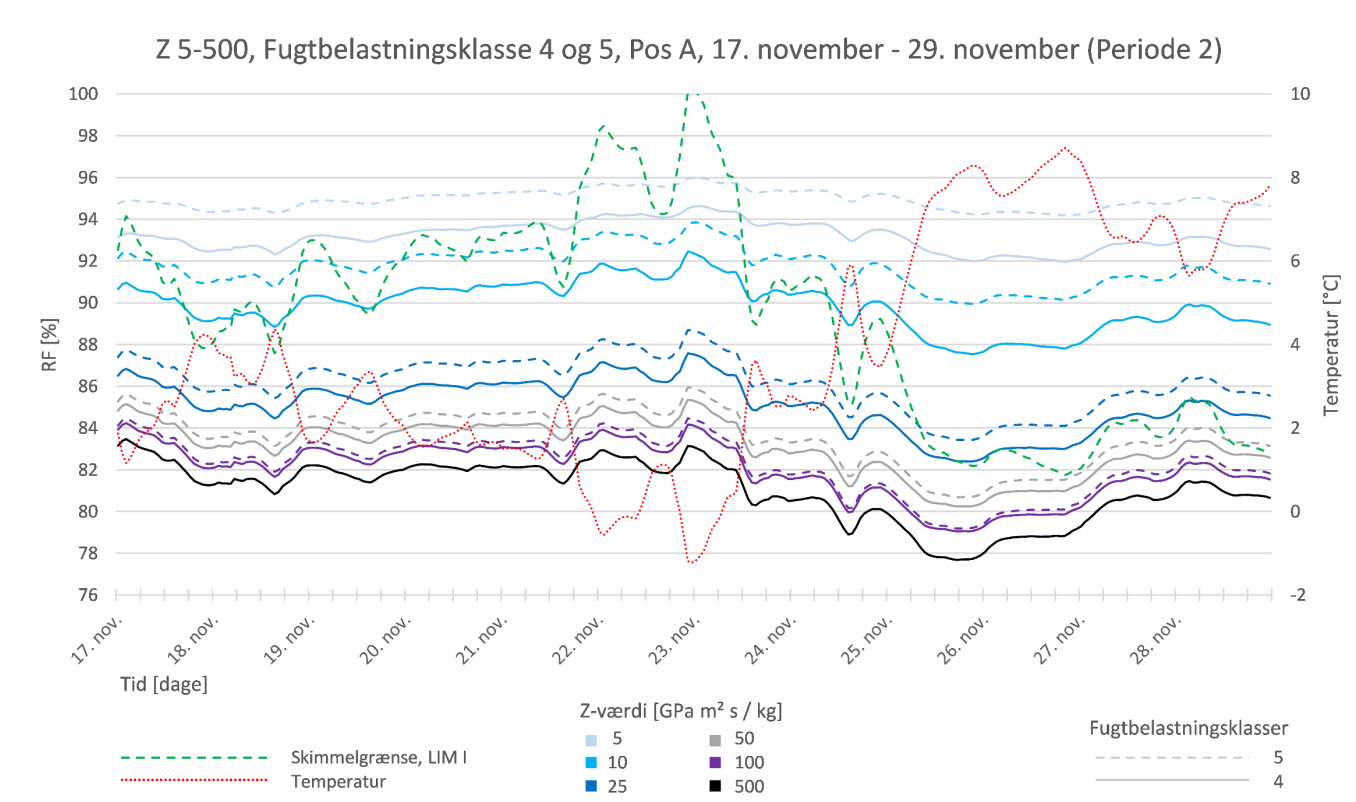
Det kan også ses, at der ingen forskel er på den relative fugtighed bag vindpladen for konstruktioner med en Z-værdi i dampspærreplanet på 500 GPa s m² / kg i for de 2 fugtbelastningsklasser.



Figur 35. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtblastningsklasse 4 og 5 i periode 1 (3. oktober - 15. oktober). Perioden afspejler forhold i efterårs- og forårmånederne. Data er reduceret: Kl. 4 - Z 500 repræsenterer også kl. 5 - Z 500, da kurverne ligger meget tæt på hinanden.

Det ses af figur 36 (Periode 2) at konstruktioner med en Z-værdi for dampspærreplanet på 5 GPa s m² / kg, i begge fugtblastningsklasser og på 10 GPa s m² / kg i fugtblastningsklasse 5 viser en RF bag vindpladen, der ligger over skimmelgrænsen i stort set hele perioden. Konstruktioner med en Z-værdi for dampspærreplanet på 25 GPa s m² / kg viser en RF bag vindpladen der, ved de koldere temperaturer, tæt på 0 °C, ligger under skimmelgrænsen, mens der ved lidt højere temperaturer ses risiko for skimmelvækst i begge fugtblastningsklasser. Konstruktioner med en Z-værdi for dampspærreplanet på 50 GPa s m² / kg, viser en RF bag vindpladen, der ligger tæt på skimmelgrænsen, dog på den sikre side det meste af tiden.

Det ses også, at forskellen i RF bag vindpladen for de 2 fugtblastningsklasser, bliver mindre, jo højere Z-værdien i dampspærreplanet er, ned til at der ingen forskel er på den relative fugtighed bag vindpladen for konstruktioner med en Z-værdi for dampspærreplanet på 500 GPa s m² / kg i de 2 fugtblastningsklasser.

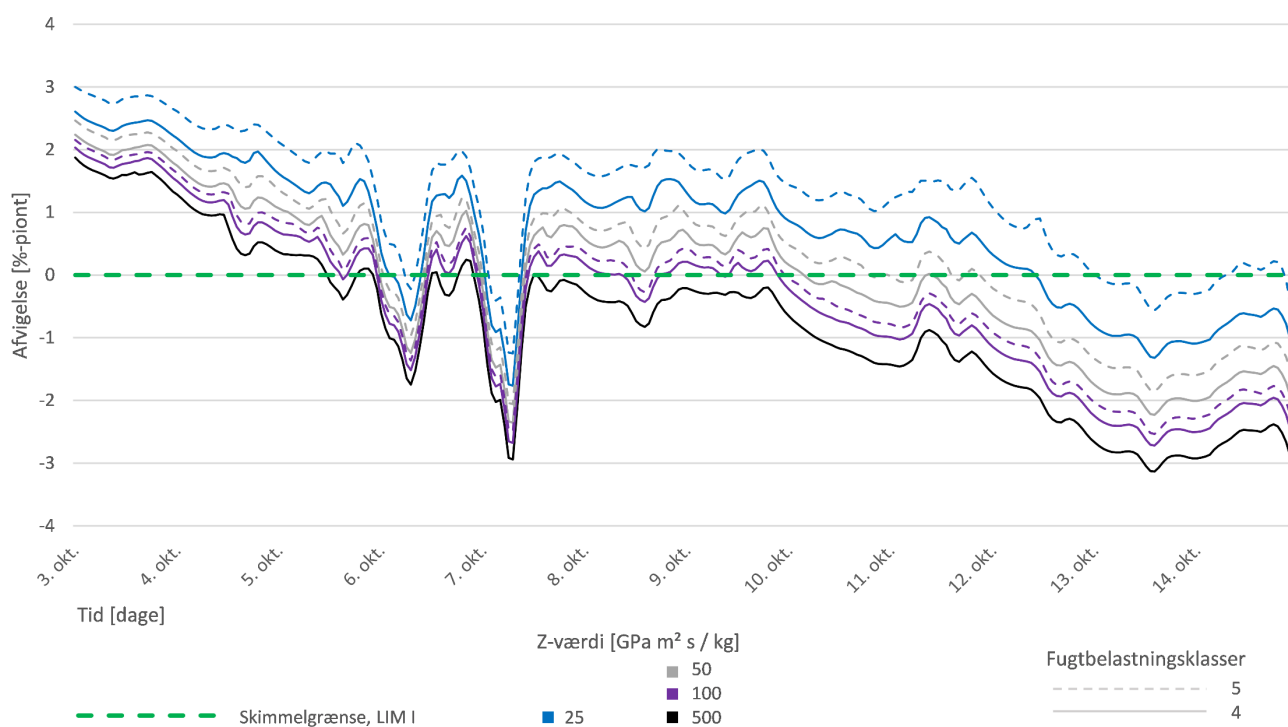


Figur 36. RF og temperatur bag vindpladen (Pos A) i fugtbelastningsklasse 4 og 5 i periode 2 (17. november - 29. november). Perioden afspejler vinterforhold. Data er reduceret: Kl. 4 - Z 500 repræsenterer også kl. 5 - Z 500, da kurverne ligger meget tæt på hinanden.

Forholdet mellem RF og skimmelgrænsen for de 2 perioder er tydeliggjort i figur 37 og 38, hvor afvigelsen fra skimmelgrænsen i procentpoint er afsat på y-aksen. Afvigelserne for konstruktioner med de lave Z-værdier for dampspærreplanet ($Z = 5$ og $10 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$) er ikke medtaget, da de ligger væsentligt over skimmelgrænsen.

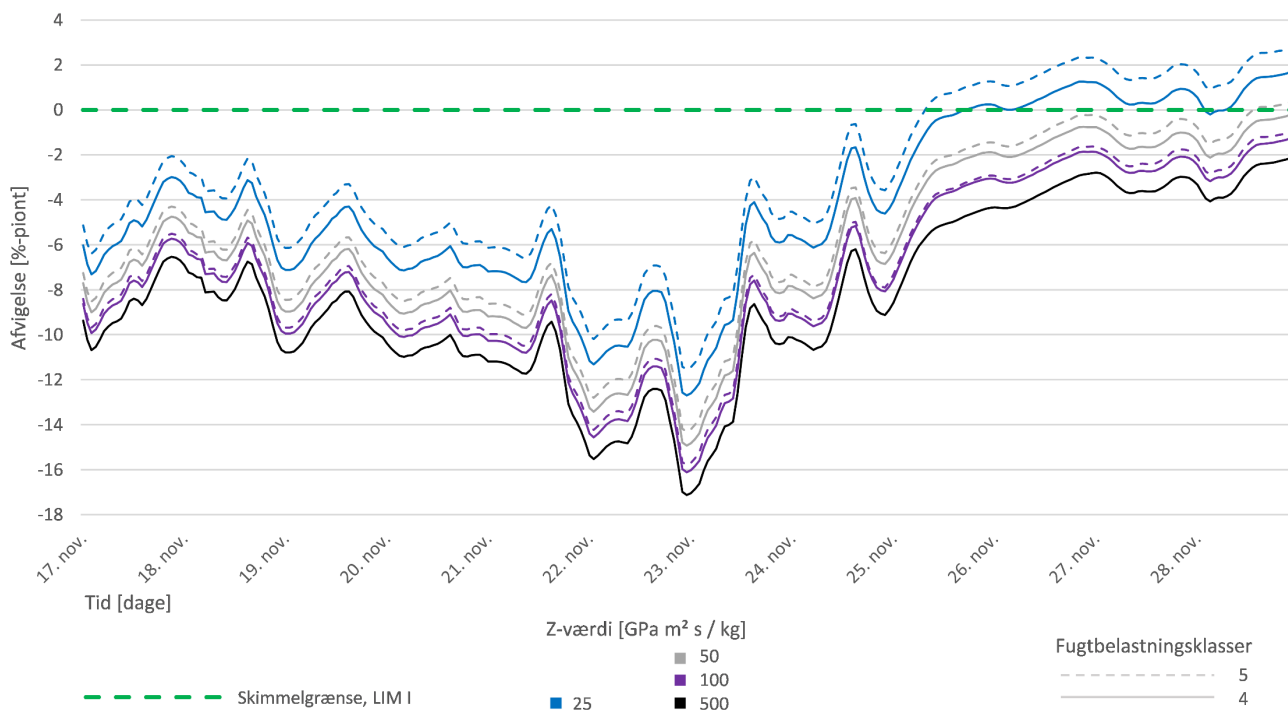
Af simuleringerne for omklædningsrum, vaskerier og svømmehaller, der befinder sig i fugtbelastningsklasse 4 og 5, fremgår det, at der i en let ydervægs-konstruktion med en Z-værdi for dampspærreplanet på $50 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$, i korte perioder af året vil være en lille risiko for, at der opstår gunstige vækstbetingelser for skimmel bag vindpladen. En sådan konstruktion vil derfor gå an, men det vil være mere sikkert med en Z-værdi for dampspærreplanet $> 100 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$.

Skimmelgrænse Z 25-500, Fugtblastningskl. 4 og 5, Pos A, 3. okt. - 15. okt. (Periode 1)



Figur 38. Afvigelse fra skimmelgrænsen i %-point for Periode 1. Jo større afvigelse over grænsen, jo større skimmelrisiko er der. Data er reduceret: Kl. 4 - Z 500 repræsenterer også kl. 5 - Z 500, da kurverne ligger meget tæt på hinanden.

Skimmelgrænse Z 25-500, Fugtblastningskl. 4 og 5, Pos A, 17. nov. - 29. nov. (Periode 2)



Figur 37. Afvigelse fra skimmelgrænsen i %-point for Periode 2. Jo større afvigelse over grænsen, jo større skimmelrisiko er der. Data er reduceret: Kl. 4 - Z 500 repræsenterer også kl. 5 - Z 500, da kurverne ligger meget tæt på hinanden.

5.4 Z-værdi / fugtbelastning

På baggrund af simuleringer af konstruktioner i fugtbelastningsklasse 1-3, som omfatter boliger, se bilag D, er skimmelrisiko bag vindpladen på en forsimplet og overskuelig måde angivet månedsvis i tabel 4.

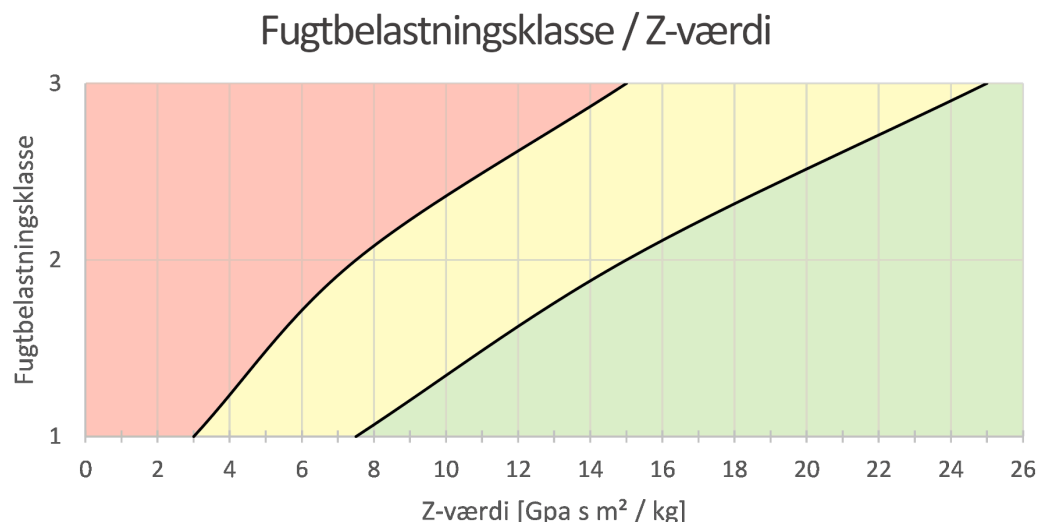
Tabel 4. Skimmelrisiko bag vindpladen i fugtbelastningsklasse 1-3 opdelt på måneder.

Skimmelrisiko						
Måned	Z-værdi [GPa s m ² / kg] og diffusionsmodstandsforhold mellem vindplade og dampspærre (x:xx)					
	0 (1:0)	1,5 (1:1,5)	3 (1:3)	5 (1:5)	10 (1:10)	50 (1:50)
Januar	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Februar	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Marts	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
April	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Maj	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Juni	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Juli	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
August	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
September	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
Oktober	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
November	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
December	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3

Signaturer

- Ingen skimmelrisiko. RF ligger under skimmelgrænsen i hele perioden, eller under skimmelgrænsen i størstedelen af perioden med kortvarige peaks over skimmelgrænsen.
- Nogen skimmelrisiko. RF ligger enten på, eller tæt på skimmelgrænsen i perioden, eller i nærheden af skimmelgrænsen og krydsende over perioden.
- Skimmelrisiko. RF ligger over eller væsentligt over skimmelgrænsen i så store dele af perioden, at der vil ske skimmelvækst.
- Ⓜ Angiver fugtbelastningsklasse (1-3)

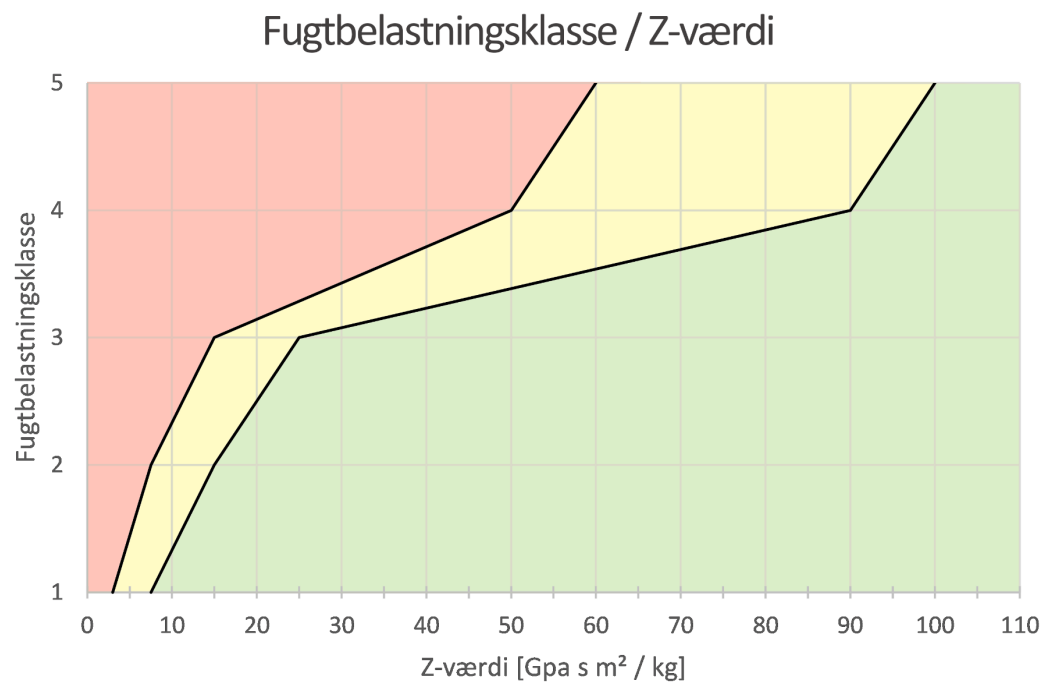
Figur 39 viser en sammenfatning af ovenstående risikovurdering, og udtrykker en meget forsimplet metode til hurtigt at vurdere, hvilken Z-værdi der bør indbygges i en let ydervægskonstruktion på den varme side af isoleringen, når fugtbelastningen kendes.



Figur 39. Figuren viser skimmelrisiko bag vindpladen for boliger, fugtbelastningsklasse 1-3. I grøn zone er der ingen skimmelrisiko, i gul zone er der lille til nogen skimmelrisiko, og i rød zone er der risiko for skimmelvækst bag vindpladen. Af figuren kan det aflæses, at en Z-værdi på 10 GPa s m² / kg vil være OK i fugtbelastningsklasse 1, forbundet med lille skimmelrisiko dele af året i fugtbelastningsklasse 2 og forbundet med væsentlig skimmelrisiko store dele af året i fugtbelastningsklasse 3. Befinder en konstruktion sig i gul zone, bør der foretages fugttekniske vurderinger for det konkrete tilfælde.

5.4.1 Z-værdi / fugtbelastning i andre bygninger end boliger

Princippet for vurdering af konstruktioner for boliger er videreført til fugtbelastningsklasse 4 og 5.



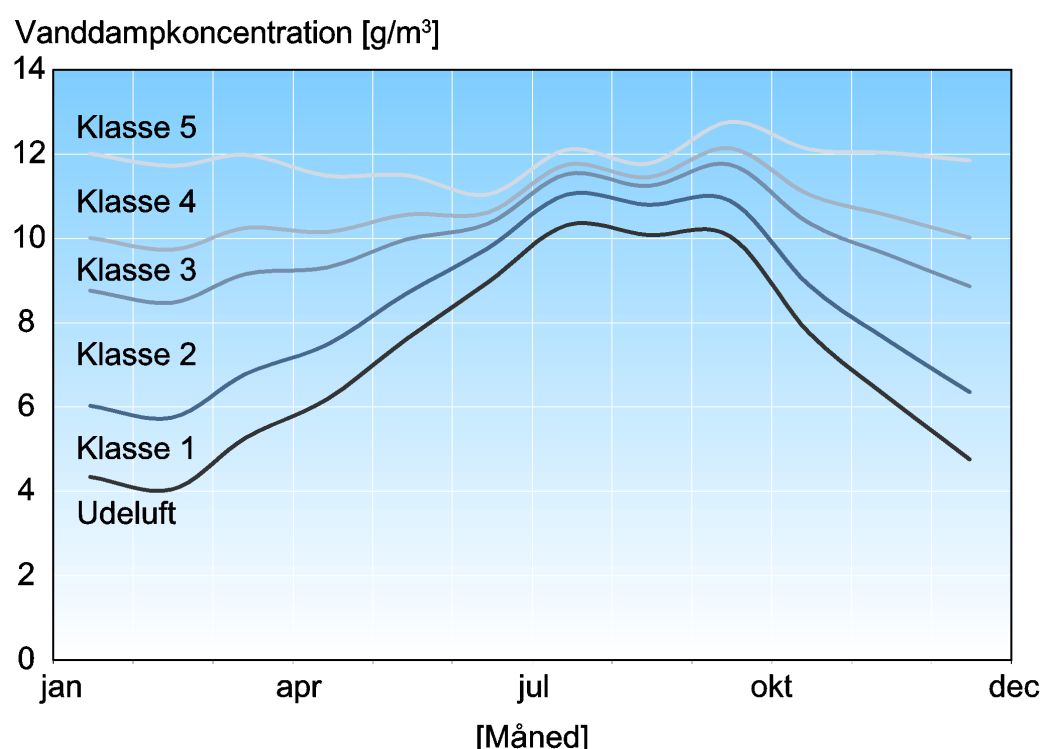
Figur 40. Figuren viser skimmelrisiko bag vindpladen for boliger, fugtbelastningsklasse 1-5. I grøn zone er der ingen skimmelrisiko, i gul zone er der lille til nogen skimmelrisiko, og i rød zone er der risiko for skimmelvækst bag vindpladen. I de høje fugtbelastningsklasser er resultaterne forbundet med større usikkerhed. Af figuren kan det aflæses, at en Z-værdi på 50 $\text{GPa s m}^2 / \text{kg}$ ikke vil være tilstrækkeligt i fugtbelastningsklasse 4 og 5.

6 Dampspærre i lette ydervægge

Følgende afsnit omhandler dampspærre i lette ydervægge, og beskriver forskellige typer af dampspærre, og fordele og ulemper ved brug af dampspærremembraner af PE-folie.

6.1 Er dampspærre nødvendigt?

Fugtbelastningsklasserne er en forenklet metode, der beskriver hvilket fugtniveau der findes i indeluften. Fugtbelastningsklasserne beregnes ud fra fugttilskuddet til indeluften ift. udeluftens middeltemperatur. Fugttilskuddet til indeluften afhænger af fugtproduktionen og luftskiftet (Brandt, 2013). I en velventileret bygning med normalt luftskifte og brug, vil der være et lille fugttilskud til indeluften, og bygningen vil være i en lav fugtbelastningsklasse. I en bygning med ringe ventilation og med høj fugtproduktion, vil der være et stort fugttilskud til indeluften, og bygningen vil være i en høj fugtbelastningsklasse. Fugtbelastningsklasserne afhænger af bygningens brug, og til en vis grad også af de tekniske installationer, fx mekaniske ventilationsanlæg.



Figur 41. I bygninger, hvor der er mennesker, produceres der fugt, der optages som vanddamp i luften. Figuren viser vanddampkoncentrationen i indeluften for fugtbelastningsklasse 1-5 og i udeluften over året. (Brandt, 2013, figur 31)

Lette ydervægge er som regel lavet af fugtfølsomme materialer, og fugtforholdene i konstruktionen skal holdes på et sikkert niveau.

Fugtforholdene i en ydervæg kan holdes på et sikkert niveau, enten ved at etablere et tilstrækkeligt lufttæt tæthedsplan med stor dampdiffusionsmodstand, eller ved at minimere den fugtbelastning som ydervæggen udsættes for.

En lav fugtbelastning kan fx opnås ved at reducere fugtproducerende aktiviteter i bygningen, eller ved at øge luftskiftet, eller en kombination af de to. Et øget luftskifte kan tilvejebringes fx ved etablere et automatisk styret naturligt ventilationssystem, eller ved at installere et mekanisk ventilationsanlæg.

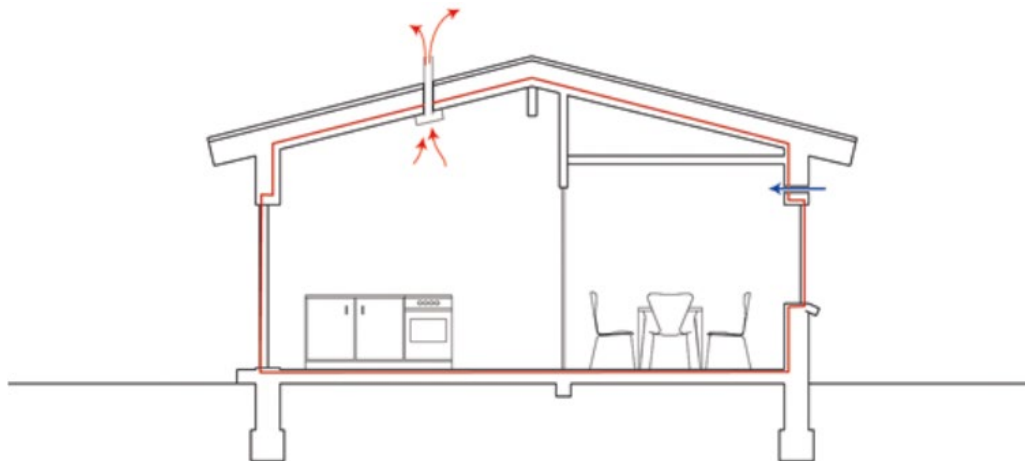
Som alternativ til at minimere fugtbelastningen kan fugtforholdene i ydervæggen holdes på et sikkert niveau ved at øge tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand. Lidt forsimplet kan det siges, at jo større dampdiffusionsmodstand tæthedsplanet har, jo mere robust er konstruktionen ift. bygningens anvendelse. Det er hele tiden en forudsætning, at tæthedsplanet er udført tilstrækkeligt lufttæt, da fugtkonvektion ellers hurtigt kan blive dominerende, og så hjælper en høj dampdiffusionsmodstand ikke.

Jo større fugttilskuddet til indeluften er, jo større damptryksforskel over ydervæggen vil der være, og jo større dampdiffusionsmodstand skal tæthedsplanet have for at beskytte ydervæggen imod opfugtning som følge af diffusion. Af figur 39 i afsnit 5.4 fremgår det, at en ydervægskonstruktion i fugtbelastningsklasse 1 med en Z-værdi for dampspærreplanet på ca. 8 GPa s m² / kg, ligger på den sikre side, da fugtniveauerne bag vindpladen ikke bliver kritiske i forhold til vækst af skimmelsvamp. Udsættes denne konstruktion for et indeklima med et større fugttilskud til indeluften, fx som følge af forringet ventilation, eller pga. af øget fugtproduktion fra ændret anvendelse af bygningen, så vil konstruktionen befinde sig i en højere fugtbelastningsklasse. I fugtbelastningsklasse 2 vil der med samme konstruktion være væsentligt større risiko for, at der opstår fugtniveauer bag vindpladen, der er kritiske i forhold til vækst af skimmelsvamp. Hvis konstruktionen skal være på den sikre side, må Z-værdien for dampspærreplanet øges til ca. det dobbelte, 15 GPa s m² / kg.

Ønskes en konstruktion udført, hvor tæthedsplanet udgøres af materialer med en lav Z-værdi, fx træbaserede pladematerialer opsat med tapede samlinger, så kan det lade sig gøre, såfremt fugtbelastningen er tilsvarende lav, for at sikre, at der ikke opstår kritiske fugtniveauer i konstruktionen. Når Z-værdien for tæthedsplanet kendes, kan figur 39 bruges til at aflæse, om den forventede fremtidige brug vil medføre kritiske fugtforhold i konstruktionen. Ses det, at der vil opstå kritiske fugtniveauer i konstruktionen, må fugtbelastningen da reduceres, eller der må vælges et materiale til tæthedsplanet med en større dampdiffusionsmodstand.

6.2 Luftspærre, dampspærre - tæthedsplan

En bygning skal udføres med et tilstrækkeligt luft- og damptæt plan - tæthedsplanet - der i lette ydervægge med fordel kan løses i samme materialelag, bestående af en plastmembran af PE-folie. I daglig tale kaldes denne plastmembran af PE-folie for dampspærre, hvilke kan give anledning til misforståelser, da funktionen af plastmembranen som tæthedsplan i lette ydervægge, lige så vigtigt er en 'luftspærre', som en dampspærre.



Figur 42. Figuren viser tæthedsplanet, der følger bygningens klimaskærm. Tæthedsplanet i en let ydervæg udgøres ofte af dampspærren. Lufttætheden skal sikres overalt, fx ved samlinger mellem bygningsdele og ved installationsgennembrydninger. (Rasmussen & Nicolajsen, 2007, figur 1).

På engelsk bruges den mere retvisende betegnelse AVCL (Air and Vapour Control Layer (luft- og dampkontrollag)) om det tilsvarende danske tæthedsplan, og VCL (Vapour Control Layer) om den tilsvarende danske dampspærre.

En dampspærre er et produkt eller materialelag, fx i en lagdelt, let ydervægskonstruktion, med en høj dampdiffusionsmodstand, der forhindrer vanddamp i at trænge ud i den isolerede del af konstruktionen (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018) (MEMBRAN-ERFA, u.d.).

Et dampspærresystem er et sammensat system af enkelte komponenter og produkter, der passer sammen. Sammensatte dampspærresystemer udgøres af en dampspærremembran (der er hovedkomponenten i systemet) dampspærretape og -klæber, tilbehør som gennemføringsmanchetter og præfabrikerede hjørner samt monteringsvejledning (duko.dk, 2014).

Dampspærresystemer kan inddeles efter deres vanddampdiffusionsmodstand i hovedtyperne: Dampspærre, dampbremse og fugtadaptiv dampspærre.

Dampspærrer har en Z-værdi på mindst 50 $\text{GPa s m}^2 / \text{kg}$, dampbremsere har en Z-værdi $< 50 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$ og de fugtadaptive dampspærrer har en Z-værdi, som varierer med den relative fugtighed (duko.dk, 2014).

6.3 Membrantyper

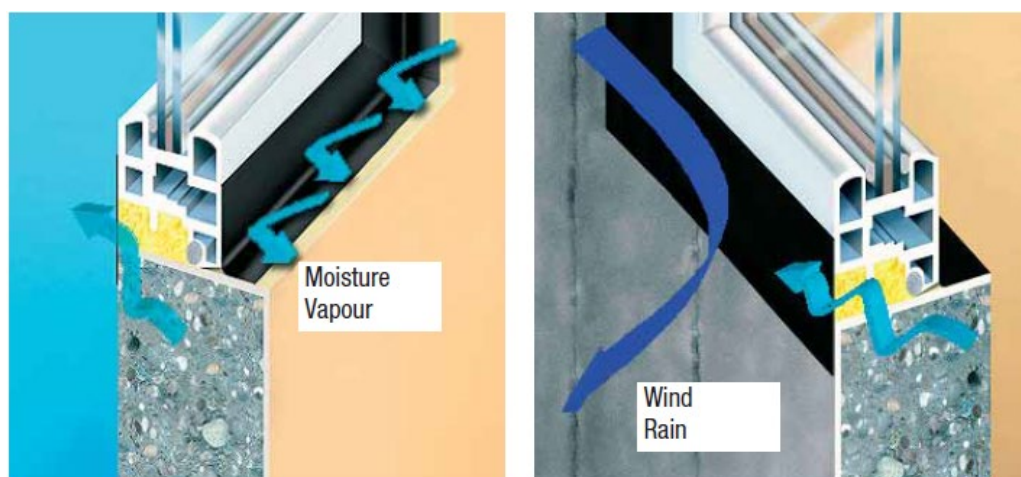
6.3.1 Dampspærremembraner ($Z > 50 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$)

Dampspærremembraner er normalt banevare, men der findes også membran-typer der sprøjtes på en overflade, eller påføres i flydende form. Banevare-membranerne kan fx være aluminiumsbaserede, bitumenbaserede, gummi- eller plastfoliemembraner.

De aluminiumsbaserede dampspærremembraner, er opbygget med et tyndt lag aluminiumsfolie der er limet til et bærelag fx af kraftigt papir og findes både armerede og uarmerede. De aluminiumsbaserede dampspærremembraner er meget diffusionstætte med Z -værdier $> 5.000 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$.

Bitumenbaserede dampspærremembraner, der i daglig tale kaldes tagpap, har Z -værdier $> 500-1.000 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$. Tagpap gøres tæt, ved at samlingerne svejses sammen eller klæbes.

Dampspærremembraner af EPDM-gummi (Ethylene Propylene Diene Mono-mer) fås i tykkelser på 0,5-1,5 mm, og fås med Z -værdier på op til $300-400 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$. EPDM-membranerne er meget slidstærke og robuste, og de anvendes ofte til tætning mellem bygningsdele. Nogle producenter laver EPDM-membransystemer til tætning mellem facadepartier, hvor den udvendige EPDM-membran yder vand- og vindtæthed og har en væsentligt lavere dampdiffusionsmodstand ($Z = \text{ca. } 15 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$) end den indvendige EPDM-membran, der har en høj dampdiffusionsmodstand ($Z = \text{ca. } 400 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$). Det giver et dampdiffusionsmodstandsforhold mellem vindspærre og dampspærre på ca. 1:27.



Figur 43. EPDM-membransystem hvor den indvendige membran har en høj Z -værdi på ca. $400 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$ (tv) og den udvendige membran har en lavere Z -værdi på ca. $15 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$ (th). Dampdiffusionsmodstandsforhold mellem vindspærre og dampspærre er ca. 1:27. (Sika, 2020).

I lette ydervægge anvendes der primært traditionelle plastdampspærremembraner fremstillet af PE. Plastmembranerne fås i forskellige tykkelser og både med og uden armering. Tynde PE-folier (fås ned til 0,12 mm) har tilstrækkelig høj Z -værdi, og kan være nemmere at montere end de kraftigere typer.

Plastmembraner af PE-folie bør dog være mindst 0,20 mm tykke, for at være tilstrækkeligt robuste til at kunne modstå mekaniske påvirkninger og håndtering på byggepladsen. PE-folier med en tykkelse på 0,20 mm vil typisk have Z-værdier på 400-600 GPa s m² / kg. (Schjønning, Hansen, & Brandt, 2015).

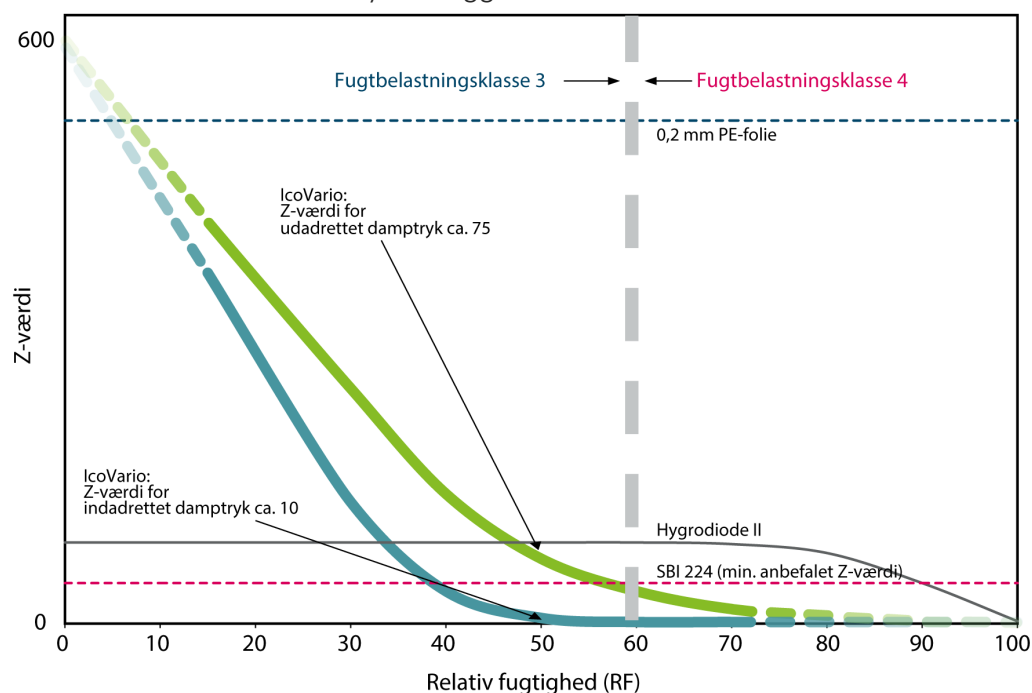
6.3.2 Dampbremse (Z < 50 GPa s m² / kg)

Dampbremsen er kendetegnet ved at have en Z-værdi < 50 GPa s m² / kg, og kan kun anvendes i ventilerede konstruktioner, hvor der er foretages en fugt-teknisk vurdering. Mange producenter markedsfører forskellige membrantyper under betegnelsen dampbremse, hvor nogle typer er papirbaserede, mens andre er plastbaserede, og produkternes dampdiffusionsmodstand ligger typisk mellem 10-50 GPa s m² / kg. Brandt (2013) skriver, at betegnelsen dampspærre bør foretrækkes, frem for dampbremse.

6.3.3 Fugtadaptiv dampspærre (Z-værdi afhænger af RF)

Fugtadaptive dampspærre er foliemembraner med en dampdiffusionsmodstand, som afhænger af den omgivende lufts relative fugtighed. Ved lav RF har membranen høj Z-værdi og ved høj RF har membranen lav Z-værdi. De fugtadaptive dampspærre er primært udviklet til brug i uventilerede tagkonstruktioner, hvor der er en række begrænsninger ved brug, fx må der ikke være permanent skygge på tagfladen, hvor de indbygges, og de anbefales kun anvendt i fugtbelastningsklasse 1 og 2 (Bunch-Nielsen & Christensen, Fugtadaptive dampspærre i uventilerede paralleltage, 2019).

Bunch-Nielsen og Christensen (2005) skriver om en specifik, fugtadaptiv dampspærre (Hygrodiode II) at den kan anvendes i ventilerede ydervægskonstruktioner som traditionel dampspærre. Løsning med fugtadaptive dampspærre i lette ydervægskonstruktioner, findes derudover kun sjældent beskrevet i det almene tekniske fælleseje. Flere producenter markedsfører deres produkter til anvendelse i lette ydervægge.



Figur 44. Dampdiffusionsmodstand for en producentspecifik, fugtadaptiv dampspærre. Når RF er lav, er Z-værdien høj, og når RF er høj, er Z-værdien lav. (Icopal, 2017, s. 6). Den stiplede, røde linje antages at vise en Z-værdi på 50 GPa s m² / kg, og den stiplede, blå linje antages at vise en Z-værdi på 500 GPa s m² / kg.

6.4 Plademateriale som dampspærre

Et materialeglag, hvis dimensioner og egenskaber giver tilstrækkelig høj Z-værdi, kan udgøre det dampspærende/dampbremsende lag i en konstruktion. Teoretisk set, vil mange forskellige plademateriale typer kunne udgøre dampspærren i lette ydervægge, fx stålplader og plader af plastmateriale, men mere realistisk vil det primært være de træbaserede pladematerialer der kan komme på tale som alternative løsninger.

Materialets permeabilitet og dimension (lagtykkelse) har betydning for dampdiffusionsmodstanden, og mange træbaserede pladematerialer, som krydsfiner- og OSB-plader har Z-værdier, der varierer med den relative fugtighed. Dampdiffusionsmodstanden oplyses for det meste som tør-kop-værdier og våd-kop-værdier, og måles iht. DS/EN ISO 12572:2016 - Byggematerialers og -produkters hygrotermiske ydeevne – bestemmelse af vanddamptransmissionssegenskaber (Adelhøj, Munch-Andersen, & Johansen, 2012).

Tabel 5 viser Z-værdier for udvalgte, træbaserede pladematerialer. Det bemærkes, at det kun er SWP- (Solid Wood Panel (massivtræsplade)) og krydsfinerplader, med tykkelser på over 5 cm, der kommer op på Z-værdier i størrelser, der modsvarer definitionen på en dampspærre jf. almen tekniske fælleseje ($Z > 50 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$).

Tabel 5. Værdier for dampdiffusionsmodstand for udvalgte træbaserede pladematerialer. Værdier er vist som våd-kop-værdier og tør-kop-værdier. Efter (Adelhøj, Munch-Andersen, & Johansen, 2012, tabel 14, tabel 23, tabel 30, tabel 41 og tabel 54).

Trøbaserede pladematerialers dampdiffusionsmodstand			
Pladetype	Våd-kop-værdi	Tør-kop-værdi	Enhed
<i>Krydsfiner¹, μ</i>	70	200	-
Z-værdi, 12 mm krydsfinerplade	4,5	13	GPa s m ² / kg
Z-værdi, 22 mm krydsfinerplade	8	24	GPa s m ² / kg
<i>OSB, μ</i>	30	50	-
Z-værdi, 12 mm OSB-plade	2 ²	3	GPa s m ² / kg
Z-værdi, 22 mm OSB-plade	3,5	6	GPa s m ² / kg
<i>Spånplade³, μ</i>	17	50	-
Z-værdi, 12 mm spånplade	1	3	GPa s m ² / kg
Z-værdi, 22 mm spånplade	2	6	GPa s m ² / kg
<i>Træfiberplader, μ (bløde/halvhårde)⁴</i>	5/20	10/30	-
Z-værdi, 12 mm træfiberplade, blød	0,3	0,6	GPa s m ² / kg
Z-værdi, 12 mm træfiberplade, halvhård	1,3	2	GPa s m ² / kg
<i>SWP (massivtræsplade)⁵, μ</i>	70	200	-
Z-værdi, 12 mm SWP-plade	4,5	13	GPa s m ² / kg
Z-værdi, 60 mm SWP-plade	22	65	GPa s m ² / kg

¹ Ved 500 kg/m³. Middeldensiteten for krydsfiner af nåletræ er normalt 450-600 kg/m³.

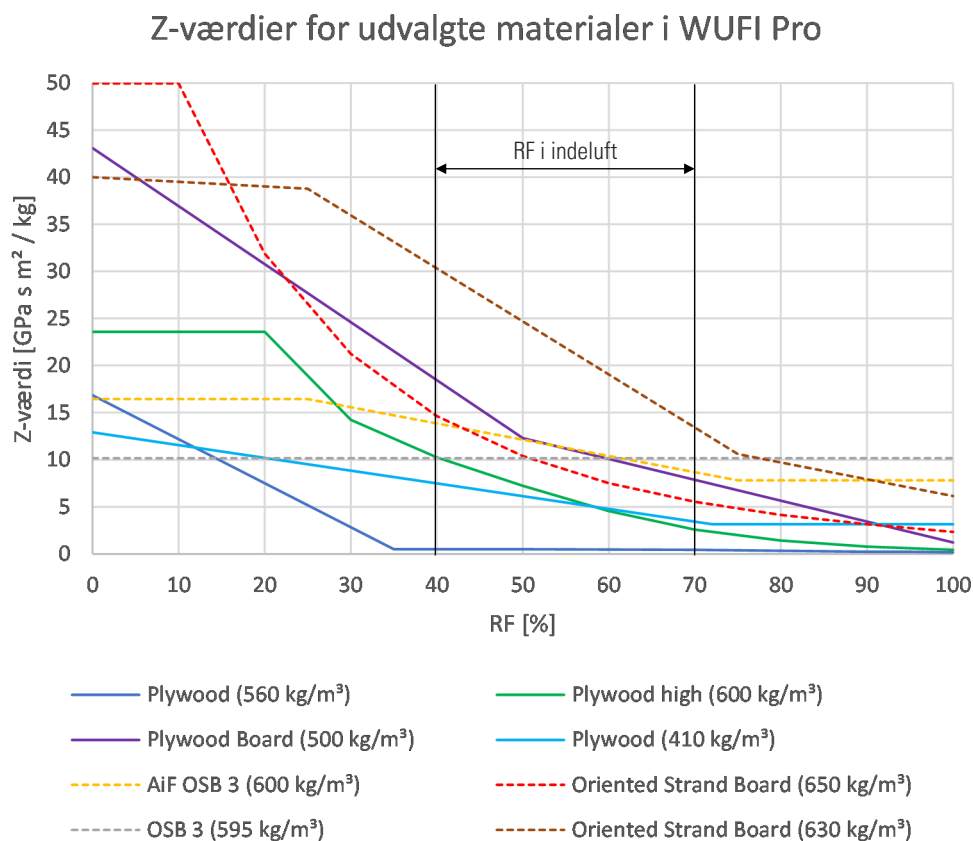
² Der kan være forskel på dampdiffusionsmodstanden. Våd-kop-Z-værdier for 12 mm OSB-plader på 7-10 GPa s m² / kg kan forekomme.

³ Ved 700 kg/m³. Der er stor forskel på dampdiffusionsmodstanden, mellem de forskellige produkter.

⁴ Bløde plader ved 400 kg/m³ og halvhårde, tunge plader 800 kg/m³.

⁵ Ved 500 kg/m³.

I WUFI Pro findes der mange forskellige typer træbaserede pladematerialer, med forskellige materialeegenskaber. I figur 45 ses beregnede Z-værdier for forskellige OSB- og krydsfinerpladematerialer fra WUFI Pro materialebibliotek. Z-værdierne er beregnet ud fra en pladetykkelse på 12 mm. Det ses, at Z-værdierne er meget forskellige, selv inden for samme materialegruppe, dog ses der samme tendens for de fleste OSB- og krydsfinerpladematerialer: at Z-værdien er højere ved lav RF og faldende med stigende RF.



Figur 45. Dampdiffusionsmodstanden for 4 forskellige krydsfinerplader og 4 forskellige OSB-plader (punkterede linjer) fra WUFI Pro materialebibliotek. Z-værdierne er beregnet for en pladetykkelse på 12 mm. Det ses, at der er stor forskel på værdierne, selv inden for samme materialegruppe. De to lodrette streger markerer det typiske spænd i RF i indeluften for boliger, efter (Brandt, 2013, figur 28).

6.5 Dampspærremembraner af PE-folie

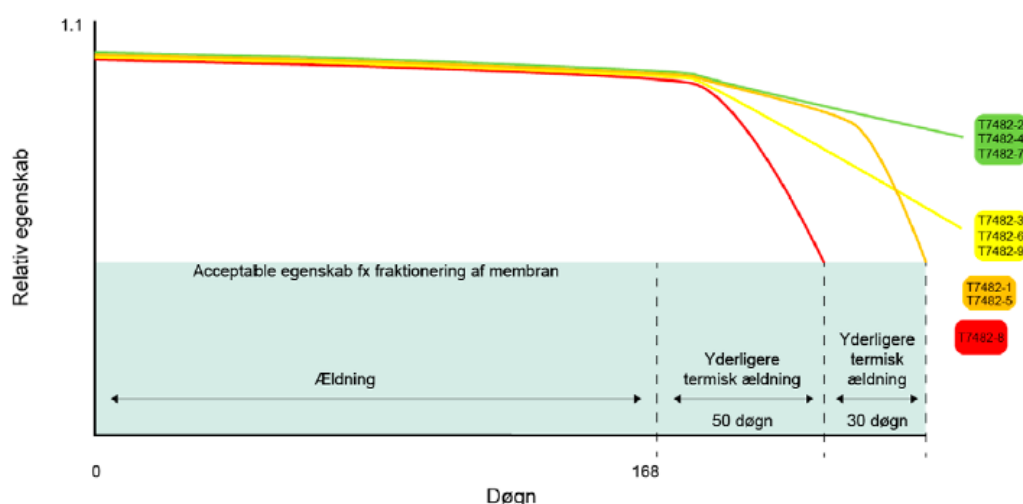
Dampspærremembraner af PE-folie er meget tætte over for luftgennemtrængning og har en stor dampdiffusionsmodstand. Indbygges en dampspærremembran af PE-folie som tæthedsplan, sikres en konstruktion med stor robusthed ift. bygningens brug, og evt. senere ændret anvendelse med større fugtproduktion. En 0,20 mm PE-folie, har en høj Z-værdi, på over 500 GPa s m² / kg, hvilket er meget på den sikre side for de fugtbelastningsklasser, hvor boliger normalt befinder sig (klasse 1-3).

6.5.1 Udfordringerne ved brug af dampspærrefolier af PE

Bygninger skal opføres, så de overholder gældende bygningsreglement i hele deres levetid. Bygningskomponenter skal vedligeholdes og eventuelt udskiftes, hvis de har opbrugt deres ydeevne. Når en membran af PE-folie indbygges som tæthedsplan i en ydervægskonstruktion, har den afgørende betydning for ydervæggens ydeevne som bygningskomponent. Membranen placeres ofte et stykke inde i konstruktionen og udskiftning kan være kompliceret. Derfor er det vigtigt, at levetiden for dampspærremembranen er mindst lige så høj, som levetiden for de komponenter der ligger foran den.

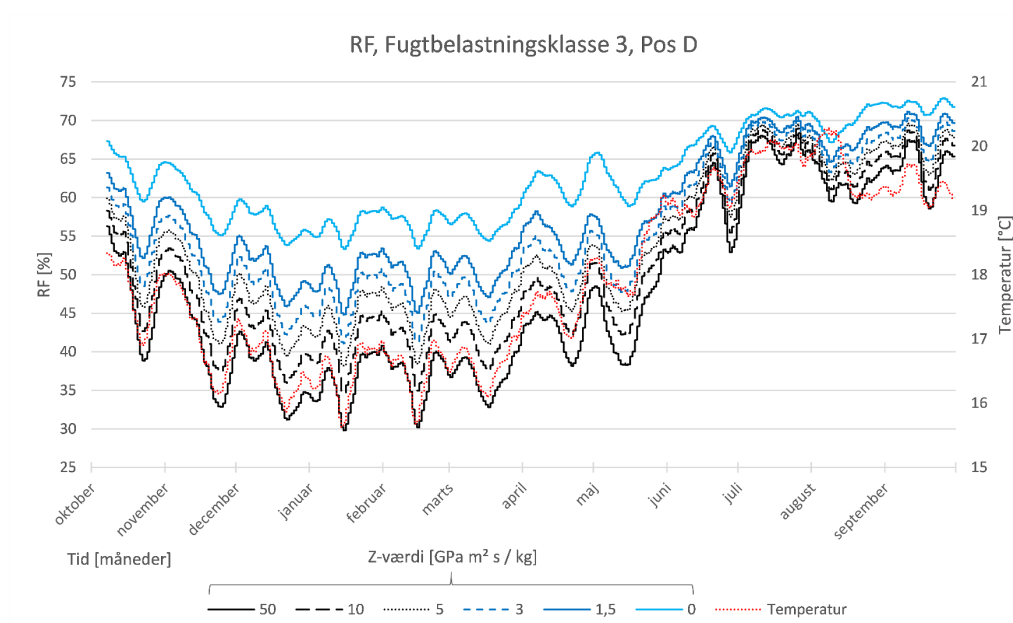
I nyligt publicerede undersøgelser af PE-membraners materialeegenskaber blev der foretaget accelereret ældning af flere forskellige membrantyper, som kan købes på det danske marked (Rasmussen, et al., 2020). Formålet med den accelererede ældning var at undersøge, om dampspærremembranernes ydeevne blev forringet over tid. Undersøgelsen viste, at nogle af materialeegenskaberne var væsentligt forringede efter den accelererede ældning, specielt faldt klæbestyrken for dampspærresystemer med tapede samlinger, men ikke for samlinger med butylbånd. Undersøgelsen viste også, at nogle af membraner blev sprøde efter den accelererede ældning, og at levetiderne derfor var forskellig mellem membranerne imellem.

Undersøgelsen inddeler de undersøgte membrantyper i 3 levetidskategorier; korteste levetid, mellemste levetid og længste levetid. Ældningshastigheden er beregnet ud fra referencetemperaturen, som er den gennemsnitstemperatur der antages at være på det sted i konstruktionen, hvor membranerne er placeret. Levetiderne er her beregnet ud fra en referencetemperatur på 10 °C. Membrantypen med kortest levetid havde en levetid på ca. 30-40 år, de membrantyper med den mellemste levetid havde en levetid på 40-45 år og de membrantyper med den længste levetid havde en levetid på mere end 45 år.



Figur 46. Egenskabsniveau afhængig af tid for membraner af PE. Egenskabsniveauer er vurderet ud fra den kemiske analysemetode ATR-FTIR spektroskopi, som er en af de mest anvendte teknikker til identifikation af kemiske forbindelser i materialer og brugt til at evaluere PE-membranernes kemiske stabilitet med tiden. Figuren viser at egenskabsniveauet falder til den acceptable grænse for nogle af membrantyperne, efter den accelererede ældning. (Rasmussen, et al., 2020, figur 59)

Grundet membranens placering i konstruktionen er en mere realistisk referencetemperatur 16-21 °C. Det kan ses af temperaturkurven for referenceyder-væggen i figur 47, som viser RF og temperatur i målepunktet lige bag dampspærren (Pos. D). Ældningshastigheden fordobles, når referencetemperaturen øges med 10 °C, hvilket betyder, at de nævnte levetider (der var oplyst for en referencetemperatur på 10 °C) kan halveres. Det skal nævnes, at den accelererede ældning kun giver et estimat for levetiden.



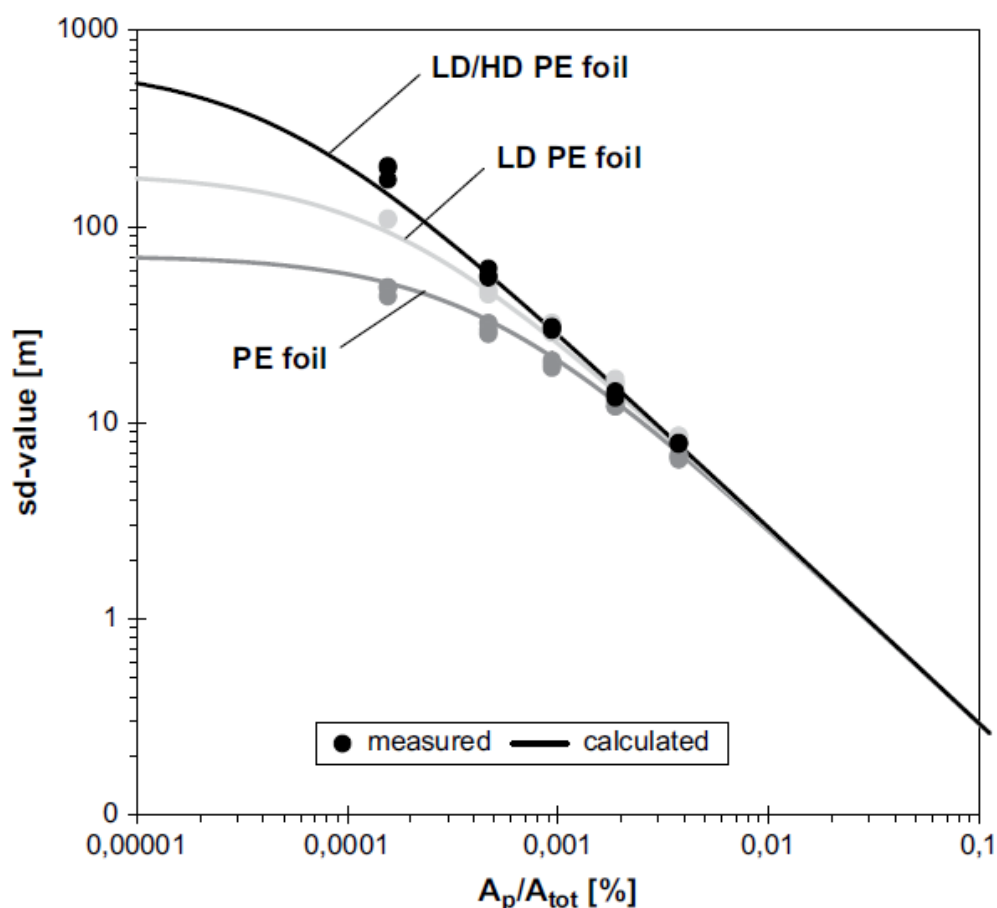
Figur 47. Figuren viser RF og temperatur i målepunktet lige bag dampspærren (Pos. D) Kurverne er vist som glidende ugegennemsnit. Temperaturen ligger mellem ca. 15,5-20,5 °C.

Der er andre udfordringer end ældningsbestandigheden ved brug af PE-folier som tæthedsplan. De tynde folier beskadiges nemt ved håndtering på byggepladsen, og på trods af manchetsystemer og tætningstilbehør er tætning ved installationsgennemføringer ikke altid udført tilstrækkeligt. For at undgå for mange installationsgennembrydninger placeres PE-folier normalt et stykke inde i konstruktionen, hvilket giver mulighed for, at der kan trækkes installationer uden for mange gennembrydninger af tæthedsplanet.

Ud fra egne observationer i tilknytning til fagtilsyn med byggesager, kan jeg konstatere en potentiel fejlkilde relateret til de enkelte faggrupper, ved placering af dampspærremembranen lidt inde i konstruktionen. Det er i de fleste tilfælde tømreren der omhyggeligt monterer dampspærremembranen, hvorefter han efterlader den ubeskyttet til de øvrige installationsfag, som ikke nødvendigvis har øget fokus på dampspærremembranen, eller kender til risikoen forbundet med beskadigelse. Grundet det høje tempo i byggebranchen skal installationsfagene hurtigst muligt have trukket deres kabler og rør, og de kan i processen nemt komme til at beskadige PE-folien. Efter installationsfagene skal den indvendige beklædning ofte monteres hurtigst muligt, og udbedres skaden ikke i tide, er den svær at lokalisere efterfølgende.

En anden udfordring ved den tilbagelagte placering er, at perforeres membranen alligevel, fx når der efterfølgende bores et hul i beklædningen for montage af forfra-dåse, eller ved opsætning af inventar, så vil det ikke umiddelbart være til at se efterfølgende, og det vil resultere i et område med stor diffusion. Opdages det i imidlertid, at membranen blev perforeret, kan det synes besværligt eller dyrt at udbedre skaden, hvorfor det måske fravælges, og ydervæggen efterlades med et område med stor diffusion.

Undersøgelser har vist, at selv en lille perforering af en dampspærremembran resulterer i en betydelig stigning i fugttransporten (Slanina & Silarová, 2008). I figur 48 ses sammenhængen mellem forskellige PE-foliers dampdiffusionsmodstand i forhold til andelen af det perforerede areal. I undersøgelsen blev der foretaget målinger af forskellige membrantypers dampdiffusionsmodstand ved forskellige perforeringsarealer, og der blev opstillet en formel til at beregne dampdiffusionen gennem de perforerede membraner, som svarede godt overens med de målte værdier. Følges formelen kan det eksempelvis udregnes, at hvis der laves et \varnothing 8 mm hul i en 4 m² dampspærremembran med en Z-værdi på 500 GPa s m² / kg, så bliver dampdiffusionen så stor, at det svarer til, at dampspærremembranens Z-værdi forringes til ca. 1/5 af den oprindelige værdi (ca. 96 GPa s m² / kg).



Figur 48. Forholdet mellem dampdiffusionsmodstand vist i s_d -værdi og andelen af det perforerede areal for forskellige membrantyper af PE-folie. I Danmark anvendes der primært dampspærremembraner af lavdensitetspolyethylen (LDPE). (Slanina & Silarová, 2008, s. 1624, figur 8)

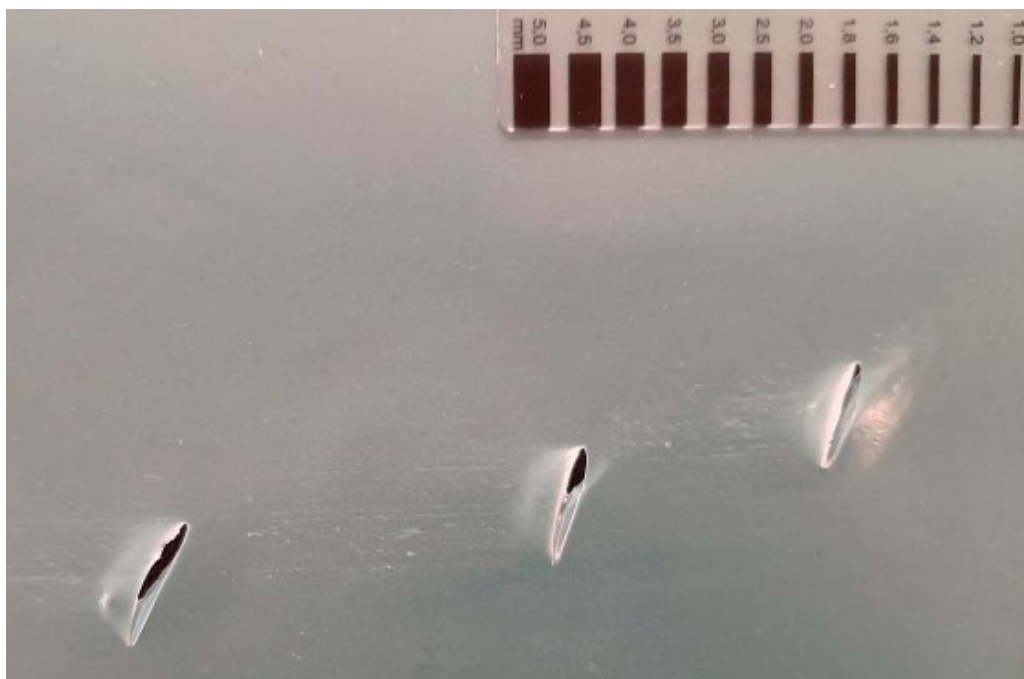
6.5.2 Fordelene ved brug af dampspærrefolier af PE

PE-folier er billige og udmærker sig ved deres høje Z-værdi og lille dimension (lagtykkelse). Monteres membranen med omhu, udgør den effektivt ydervæggens del af tæthedsplanet. Membranen er med til at opfylde bygningsreglementets krav til lufttæthed, og krav om at konstruktioner skal sikres mod skadelig akkumulering af fugt som følge af fugttransport fra indeluften.

PE-folier kan være fremstillet af ren PE, af regenereret PE eller en kombination af ren PE og regenereret PE. Uvildige undersøgelser af PE-foliers materialegenskaber blev igangsat for at undersøge om ydeevnen for membraner fremstillet af regenereret PE var anderledes end for membraner fremstillet af ren PE.

Undersøgelsen viste, at det for enkelte producenter er en udfordring at fremstille membraner af regenereret PE, som skal anvendes til dampspærre, uden væsentlige fejl. I nogle af membranerne fremstillet af regenereret PE blev der fundet brud og huller på 3-20 mm. Undersøgelsen viste også, at andre producenter formår at sortere og oprense tidligere anvendt PE, og at det er muligt at tilsætte additiver, så ydeevnen for de membraner der fremstilles af regenereret PE svarer til ydeevnen for membraner fremstillet af ren PE. Undersøgelsen kunne ikke påvise forskel i ydeevnen for membranerne, ud fra om de var fremstillet af ren PE, regenereret PE eller en kombination af ren PE og regenereret PE (Rasmussen, et al., 2020).

Med den øgede interesse for at fremme bæredygtighed i byggeriet, må der forventes en stigende efterspørgsel på membraner fremstillet af regenereret PE eller en kombination af ren PE og regenereret PE. Såfremt dampspærremembraner af regenereret PE er fremstillet, så de lever op til den forventede ydeevne, og såfremt ydeevnen ikke reduceres væsentligt over tid, så vil det være en god løsning at anvende plastmembraner af regenereret PE som dampspærremembran til tæthedsplanet.



Figur 49. Dampspærremembran af regenereret PE. (Rasmussen, et al., 2020, s. 111)

7 Diskussion

Denne rapport's formål var at undersøge, om der kan udføres fugtteknisk sikre, lette ydervægskonstruktioner uden en dampspærremembran af PE-folie. Der er foretaget hygrotermiske simuleringer, og fugtforhold bag vindpladen, som er det sted, der viste den højeste RF, er analyseret, og risikoen for vækst af skimmelsvamp er vurderet.

Der blev undersøgt lette ydervægskonstruktioner med forskellige Z-værdier for dampspærreplanet, inklusive vurderinger med en Z-værdi i dampspærreplanet på $0 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$, svarende til at der ikke er en dampspærre. Hensigten med parametervariationen var at undersøge, ved hvilken fugtbelastning en konstruktion med en given Z-værdi i dampspærreplanet ville være fugtteknisk sikker.

Simuleringerne var i undersøgelsen udført, hvor det kun var dampspærrematerialets Z-værdi der blev justeret. Når konstruktionens fugtbelastning eller bygningens fremtidige brug kendes, kan der forslås alternative konstruktioner, hvor det "damptætte" lag fx udgøres af pladematerialer eller andre materialer med tilsvarende dampdiffusionsmodstand.

7.1 Hygrotermiske simuleringer

Selvom de hygrotermiske simuleringer er noget af det tætteste man kan komme på virkelige forhold, må man huske på, at beregningerne er begrænset af mange faktorer, som ikke alle medtaget. Dele af beregningerne er baseret på tilnærmede formler, der igen baserer sig på kvaliteten af klimadata og inputdata, der af hensyn til programtekniske begrænsninger må justeres og simplificeres. Resultattolkningen i denne rapport må derfor defineres som 'et godt bud' der afspejler et tilnærmet billede af virkeligheden, og ikke den eksakte sandhed.

Der er lavet simuleringer med forskellige Z-værdier og fugtbelastningsklasser, som tager udgangspunkt i en referencekonstruktion, der er opbygget efter almen teknisk fælleseje, som må siges at være tillagt en vis sikkerhedsmargin. Denne sikkerhedsmargin er i simuleringerne udfordret både ift. dampspærreplanets dampdiffusionsmodstand og konstruktionens brug, for at finde ud af, hvor meget man kan presse en konstruktion og stadig kalde den fugtsikker.

Andre undersøgelser af både målte og beregnede konstruktioner har vist, at der var god overensstemmelse mellem beregnede og målte værdier, men også at beregningerne var på den sikre side (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, 2017). Resultaterne kan med forsigtighed bruges til at vurdere, hvordan en given ydervæg bør opbygges, hvis man kender den fremtidige brug.

7.2 Lufttæthed

Forudsætningen for vurderingerne var, at det indvendige plan er tilstrækkeligt lufttæt.

Et tilstrækkeligt lufttæt plan sikrer mod unødigt energiforbrug til opvarmning som følge af infiltration og sikrer, at ydervæggen ikke opfugtes grundet ex-filtration, hvor varm, fugtig indeluft transporteres med en luftstrøm gennem utætheder i det lufttætte plan ud i ydervæggen.

Bygningsreglementet stiller krav om, at der i nye bygninger ikke må være større utætheder i klimaskærmen, end hvad der svarer til, at en luftstrøm på højest 1,0 l/s pr. m² opvarmet etageareal ved 50 Pa trykforskel mellem inde og ude, kan trænge gennem utæthederne (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019). Det svarer i praksis til et samlet tilladeligt areal af utætheder på ca. 17x17 cm¹ for et parcelhus på 160 m². Arealet skal fordeles på hele klimaskærmen inkl. vinduernes utætheder, samlinger mellem bygningsdele og tæthedsplanets udførselstolerancer, (Due & Brandt, 2013).

Forskellig grad af lufttæthed kan opnås med forskellige materialer. Der kan fx opnås et tilstrækkeligt lufttæt plan ved opsætning af 2 gipsplader med forskudte samlinger med en spartlet og malet overflade (Due & Brandt, 2020).

En let ydervægskonstruktion, hvor tæthedsplanet alene udgøres af 2 gipsplader med forskudte samlinger og en spartlet og malet overflade, har en samlet dampdiffusionsmodstand i det indvendige plan på ca. 2-3,5 GPa s m² / kg, hvilket er lavt og kan betegnes som diffusionsåbent. Konstruktionen vil jf. tabel 4, i afsnit 5.4, være forbundet med skimmelrisiko bag vindpladen i 2/3 af året i fugtbelastningsklasse 2, fx i et parcelhus med normalt luftskifte.

Der kan anvendes pladematerialer med en højere dampdiffusionsmodstand end gipsplader, til at udgøre tæthedsplanet, fx visse typer OSB- og krydsfinerplader, såfremt samlingerne kan tætnes tilstrækkeligt. En af udfordringerne ved alene at anvende pladematerialer i tæthedsplanet er samlinger mellem pladestød, samlinger mellem plader og andre bygningsdele og samlinger ved genembrydninger af tæthedsplanet. Er samlinger ikke gjort tilstrækkeligt lufttætte, kan det medføre unødigt energiforbrug til opvarmning og risiko for opfugtning af ydervæggen.

7.2.1 Luftutæthed og fugtkonvektion

Ved fugtkonvektion transporteres fugt med en luftstrøm, der er drevet af en lufttrykforskel. Lufttrykforskelle kan være forårsaget af temperaturforskelle, af vindtryk eller af ventilationssystemer. Der kan fx opstå trykforskelle over en

¹ (Brandt, 2013) Formel (24): L og B af utætheder = $KVROD(160 / 1000 / 0,8 / 50^{0,5}) = 0,168 \text{ m} = 17 \text{ cm}$

ydervægskonstruktion, og der vil ved konvektion blive transporteret fugt med luften gennem utætheder i konstruktionen.

Den luftmængde, der kan strømme gennem et porøst materiale kan beregnes, men konvektion gennem byggematerialer er normalt uden betydning, og kun gennem de allermest porøse byggematerialer, fx mineraluld med lav densitet, kan der ske konvektion af betydning. Er klimaskærmen udført lufttæt, er fugttransport ved diffusion dominerende, som det forudsættes i simuleringerne, men det kan være svært at udføre klimaskærmen tilstrækkeligt lufttæt, og derfor er det i praksis fugttransporten ved konvektion, gennem utætheder i klimaskærmen, der er det største problem (Brandt, 2013).

Luftstrømningen gennem utætheder, huller, revner og sprækker kan beregnes med tilnærmede formler. Brandt (2013) opstiller eksempler på, at en 1 mm bred og 1 m lang sprække i tæthedsplanet for en typisk loftkonstruktion med dampspærremembran giver anledning til at der transporteres en fugtmængde, der er næsten 100 gange større gennem revnen ved konvektion, end gennem hele loftfladen ved diffusion.

I en let ydervæg bores der et hul på $\varnothing 8$ mm i den indvendige pladebeklædning, hvor tæthedsplanet fx udgøres af pladematerialer med tapede samlinger, eller hvor dampspærremembranen ligger så tæt på den indvendige beklædning, at den også perforeres. Der vil nu være et område med stor diffusion, hvilket i sig selv kan være kritisk, som det fremgår af figur 48. Antages det, at vindspærren også er utæt, fx pga. manglende tætning om installationsgennembrydninger eller sjusket montage, vil der kunne ske infiltration og exfiltration. Hvis væggen er opbygget som referencekonstruktionen i afsnit 4.1 med en tykkelse på 0,28 m og antages en trykdifferens på 5 Pa mellem ude og inde, hvilket svarer til normale vindforhold, kan der med tilnærmede formler beregnes en luftstrøm på ca. $0,95 \text{ m}^3/\text{t}$ gennem hullet. Antages det, at indeluften er 20°C og har 50 % RF, er indeluftens vandampindhold ca. $8,6 \text{ g/m}^3$, og der vil ske en fugttransport gennem utætheden på ca. $8,17 \text{ g/t} = \text{ca. } 196 \text{ g/døgn}$.

7.2.2 Luftutæthed og fugtkonvektion i WUFI Pro

Det er vanskeligt at regne præcist på fugtkonvektionen i en bygningsdel. IBP-modulet i WUFI Pro er udviklet til at estimere mængden af fugt fra indeklimaet, der trænger ud i en bygningsdel ved konvektion. Fugtmængden afhænger af bygningens samlede lufttæthed, rumhøjden, bygningsdelens opbygning og klimaforhold inde og ude.

Bygningers lufttæthed bestemmes i praksis som den samlede luftstrøm der kan passere gennem hele tæthedsplanet ved en trykforskel på 50 Pa mellem inde og ude, og ikke som luftstrømmen der passerer gennem den enkelte bygningsdel. I IBP-modulet i WUFI Pro er den gennemsnitlige luftstrøm der kan passere gennem en bygningsdel empirisk bestemt til at være ca. 15 gange mindre end den samlede luftstrøm der kan passere gennem utilsigtede utætheder for hele bygningen, og det bruger WUFI Pro til at estimere den fugtmængde der trænger ud i bygningsdelen der simuleres.

Hvis en bygning opføres, så bygningsreglementets krav om lufttæthed, q_{F50} , på 1,0 l/s m² overholdes, betyder det, at der gennemsnitligt vil passere 0,07 l/s m² gennem bygningsdelen.

Mængden af vanddamp, der afsættes ved fugtkonvektion som følge af exfiltration, bestemmes i IBP-modulet ud fra forskellen mellem indeluftens vanddamptryk og mætningsdamptrykket ift. til temperaturen på det sted i konstruktionen, hvor det forventes, at der vil udfældes kondensvand. Her er det lige bag vindspærren. I modulet indsættes en fugtkilde der tilnærmet repræsenterer utætheden (Fraunhofer, 2019) og (Fraunhofer IBP, 2017).

Der er i denne rapport udført simuleringer med WUFI Pros IBP-modul for exfiltration svarende til både BR18 krav til lufttæthed på 1 l/s m² og BR10 på 1,5 l/s m², hvoraf ingen af de to utætheder gav væsentligt højere relative fugtigheder bag vindpladen. Konstruktionen havde en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg i fugtbelastningsklasse 2, som ifølge tabel 4 i ca. halvdelen af året ligger lige på kanten ift. risiko for skimmel. Ved simuleringer, hvor exfiltrationen var sat til at være 5 gange større end bygningsreglementets krav, kunne der ses en marginalt højere RF bag vindspærren i vinterhalvåret (i gennemsnit ca. 1,5 %-point højere).

Det må dog bemærkes, at denne femtendedel af den samlede utæthed for hele tæthedsplanet, der fordeles pr. bygningsdel, ikke udtrykker konsekvenserne af et hul, eller en utæthed, i det område af konstruktionen, hvor utætheden er, men derimod er det en beregningsmodel der er udviklet til at medregne et gennemsnitligt fugttilskud i det konstruktionslag, hvor der erfaringsmæssigt vil findes fugt som følge af exfiltration.

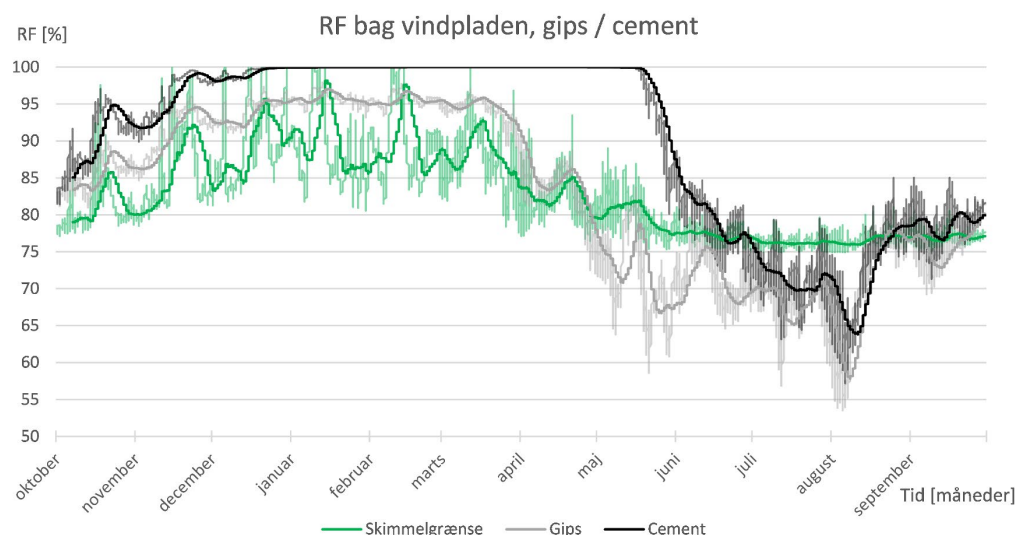
7.3 Forholdet mellem vindspærre og dampspærre

Dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre skal være 1:10, så den fugt der måtte trænge ind i konstruktionen, har mindst 10 gange lettere ved at komme ud igen på den udvendige side, end den havde ved at trænge ind. For bygninger i fugtbelastningsklasse 1 og 2 er det tilstrækkeligt, at dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre er 1:5 (Brandt, 2013).

I eksemplet, hvor en konstruktions tæthedsplan alene udgøres af 2 gipsplader med forskudte samlinger og spartlet og malet overflade ($Z = \text{ca. } 3 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$) var der risiko for skimmelvækst bag vindpladen over halvdelen af året. Eksemplet var baseret på en vindspærreplade af gips med en Z-værdi på ca. 1 GPa s m² / kg, dvs. at forholdet mellem vindspærre og dampspærre her var 1:3.

Det er meget udbredt i Danmark at bruge cementbaserede vindspærreplader, bl.a. fordi de er uorganiske og på grund af deres bestandighed over for vejrliget. Selvom pladerne er diffusionsåbne, har de dog en højere Z-værdi end

gipsplader har, som regel omkring 1,7-3 GPa s m² / kg (bl.a. afhængigt af tykkelse, densitet og RF). I eksemplet, vist i figur 50, ses samme konstruktion med hhv. vindgipsplade og cementbaseret vindspærre. Z-værdien for dampspærreplanet er 3 GPa s m² / kg. Den cementbaserede vindspærre har en Z-værdi på 3,7 ved 80 % RF, 2,8 ved 90 % RF og 2,1 ved 100 % RF, hvilket svarer til et forhold mellem vindspærre og dampspærre på ca. 1:1 – 1:1,5. Perioden med høj relativ fugtighed bag vindpladen forlænges væsentligt.



Figur 50. RF bag vindpladen, hvor vindpladen er hhv. en vindgips ($Z = 1,0 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$) og en cementbaseret plade ($Z = 2,1 - 3,7$) i fugtbelastningsklasse 2. Værdierne er vist som timeværdier med glidende ugegenomsnit som fuldt optrukket linje. Z-værdien for dampspærreplanet er ca. $3 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$, hvilket svarer til at dampdiffusionsmodstandsforholdet med vindgipspladen er ca. 1:3 og med den cementbaserede vindspærre ca. 1:1 - 1:1,5. Figuren viser, at ingen af de to konstruktioner er fugtsikre i fugtbelastningsklasse 2, men det ses at forholdet mellem vindspærre og dampspærre har stor betydning ved lave Z-værdier.

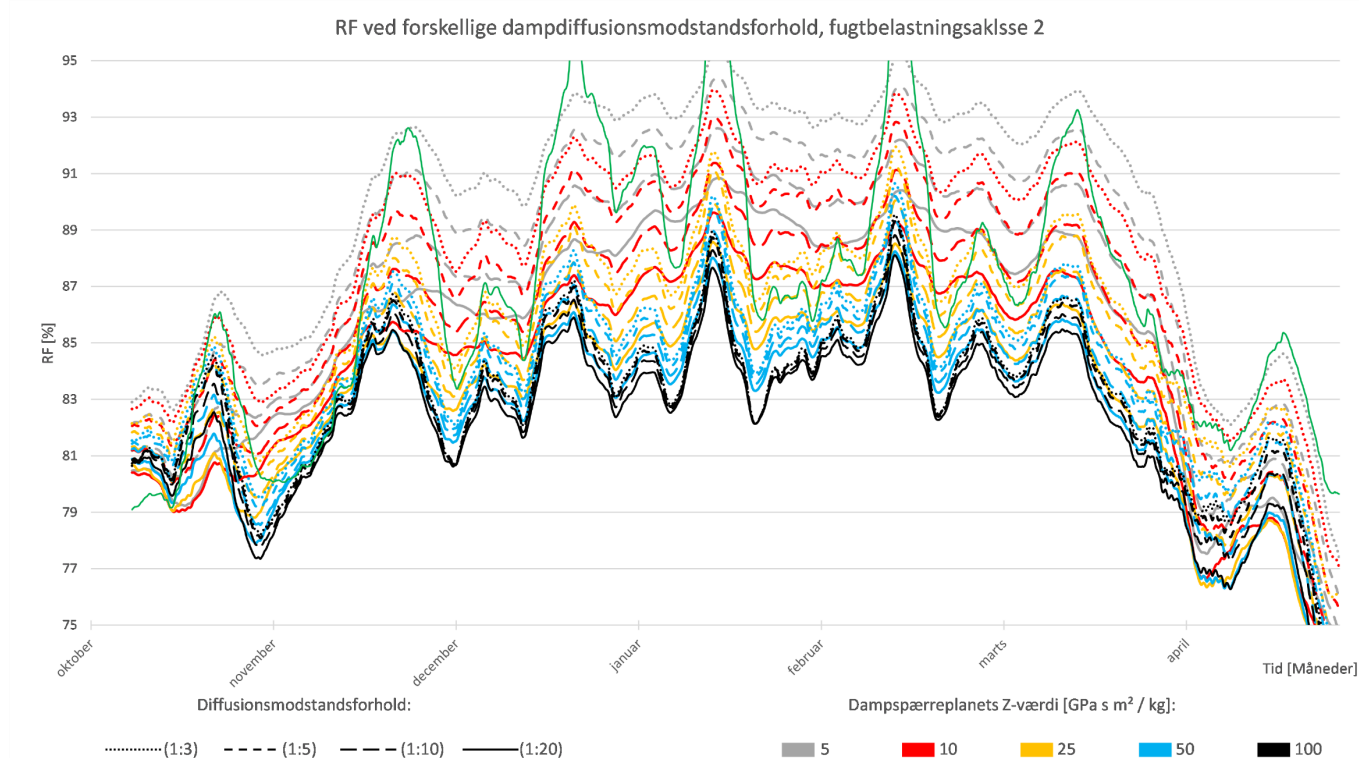
Det skal nævnes, at eksemplet i figur 50, hvor vindspærreplanen er en cementspånplade, er ekstremt, idet der i dansk byggeri sjældent bygges uden dampspærremembran, men figuren illustrerer, at forholdet mellem vindspærre og dampspærre kan have betydning ved lave Z-værdier.

I tabel 4, i afsnit 5.4, er dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre angivet for referencekonstruktionen. Ud fra tabellen kan det ses, at det først er når dampspærreplanet har en Z-værdi på $10 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$ i fugtbelastningsklasse 2, at fugtforholdene i konstruktionen nærmer sig et sikkert niveau. Her er dampdiffusionsmodstandsforhold mellem vindspærre og dampspærre helt oppe på 1:10. Jf. almen teknisk fælleseje er det tilstrækkeligt, at dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre er 1:5 i fugtbelastningsklasse 1-2, såfremt der foretages en fugt-teknisk vurdering (Brandt, 2013). Det tyder på, at dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre har større betydning ved lavere Z-værdier for dampspærren, end det har ved høje Z-værdier for dampspærren.

I tabel 6 ses en oversigt over Z-værdier for hhv. vindspærre og dampspærreplanet for referencekonstruktionen ved tilhørende dampdiffusionsmodstandsforhold. Værdierne er inddata til simuleringer, hvor resultaterne er vist i figur 51, der viser RF bag vindpladen, i fugtbelastningsklasse 2.

Tabel 6. Oversigt over Z-værdier anvendt som inddata ved undersøgelse af forskellige, valgte dampdiffusionsmodstandsforhold ved forskellige, valgte Z-værdier.

Z-værdier for vindspærre og dampspærre ved forskellige dampdiffusionsmodstandsforhold				
Dampspærrens Z-værdi [GPa s m ² / kg]	Vindspærrepladens Z-værdi, ved 12,5 mm pladetykkelse [GPa s m ² / kg]			
	(1:3)	(1:5)	(1:10)	(1:20)
5	1,7	1	0,5	0,3
10	3,3	2	1	0,5
25	8,3	5	2,5	1,3
50	16,7	10	5	2,5
100	33,3	20	10	5



Figur 51. RF bag vindpladen ved forskellige Z-værdier for dampspærreplanet og forskellige dampdiffusionsmodstandsforhold mellem vindspærre og dampspærre, vist som glidende ugegennemsnit. Vindspærrens Z-værdi fremgår af tabel 6. Det ses, at forskellene i RF bag vindpladen i forhold til dampdiffusionsmodstandsforholdet er størst, ved lavere Z-værdi for dampspærreplanet. Ved en Z-værdi på 100 GPa s m² / kg for dampspærreplanet, ses der stort set ingen forskel i fugtniveauet bag vindpladen, uanset dampdiffusionsmodstandsforholdet. Den grønne kurve viser LIM I som funktion af temperaturen, og er kun orienterende.

Det bemærkes, at resultaterne vist i Figur 51 kun gælder for fugtbelastningsklasse 2, og at de er lavet for at undersøge betydningen af dampspærreplanets Z-værdi i forhold til dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre.

Tages der udgangspunkt i tabel 4, i afsnit 5.4, for fugtbelastningsklasse 2, hvor en ydervægskonstruktion med en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg (og et dampdiffusionsmodstandsforhold på 1:10) er fugtsikker i størstedelen af året, kan det ses af figur 51, at samme konstruktion vil være fugtsikker med den halve Z-værdi for dampspærreplanet (på 5 GPa s m² / kg) hvis vindspærrens Z-værdi reduceres med 75 % (til 0,25 GPa s m² / kg) hvilket giver et dampdiffusionsmodstandsforhold som er dobbelt så stort (1:20).

Undersøgelsen giver en indikation om, at dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre har stor betydning, når dampspærreplanets Z-værdi er lav, hvilket i fugtbelastningsklasse 2 er mindre end 50 GPa s m² / kg, og at betydningen bliver mindre, når dampspærreplanets Z-værdi bliver højere.

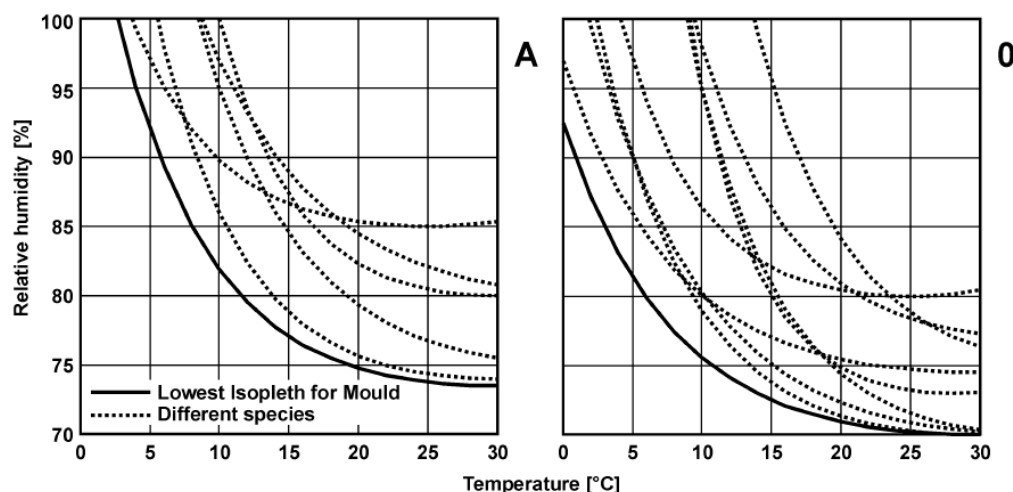
Dette forhold er vigtigt at holde sig for øje, hvis der ønskes udført ydervægskonstruktioner, hvor tæthedsplanet udgøres af en dampbremse med lav Z-værdi, fx træbaserede pladematerialer med tapede samlinger. Her vil det være ekstra vigtigt, at de generelle anbefalinger om et dampdiffusionsmodstandsforhold mellem vindspærre og dampspærre på 1:10 overholdes, også selvom der kun dimensioneres efter fugtbelastningsklasse 2 (hvor et dampdiffusionsmodstandsforhold på 1:5 tillades). Konstruktionen kan gøres bedre, hvis dampdiffusionsmodstandsforholdet øges, ved at vælge en vindspærre med lavere Z-værdi.

Det tyder på, at de måneder der er kritiske i tabel 4, i afsnit 5.4, måske vil kunne blive mindre kritiske, hvis der vælges en vindspærreplade med lavere Z-værdi end 1 GPa s m² / kg, som er den, der er defineret i referencekonstruktionen. Omvendt kan ikke-kritiske måneder måske blive kritiske, hvis der vælges en vindspærre med en højere Z-værdi end i referencekonstruktionen. Det vil være relevant at foretage nærmere undersøgelse af dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre ved andre fugtbelastningsklasser og Z-værdier.

7.4 Vurderinger af risiko for skimmel

Skimmelrisikoen er i denne rapport vurderet ud fra Sedlbauers (2001) LIM-model, som er den model, der synes mest udbredt i aktuelle SBI-notater og -anvisninger. Generelt gror skimmelsvampe bedst ved høj vandaktivitet, men der findes mange forskellige skimmelsvampearter, der hver især har forskellige optimale vækstbetingelser, hvor nogle gror bedst ved lidt lavere vandaktivitet, og andre ved lidt højere (Thrane, 2019).

LIM-modellen LIM (Lowest Isopleth for Mould) viser den laveste grænse for hvornår der kan vokse skimmel på en overflade, på tværs af forskellige svampearter. Figur 52 viser spiringen af svampesporer for forskellige svampearter og den resulterende LIM-kurve.

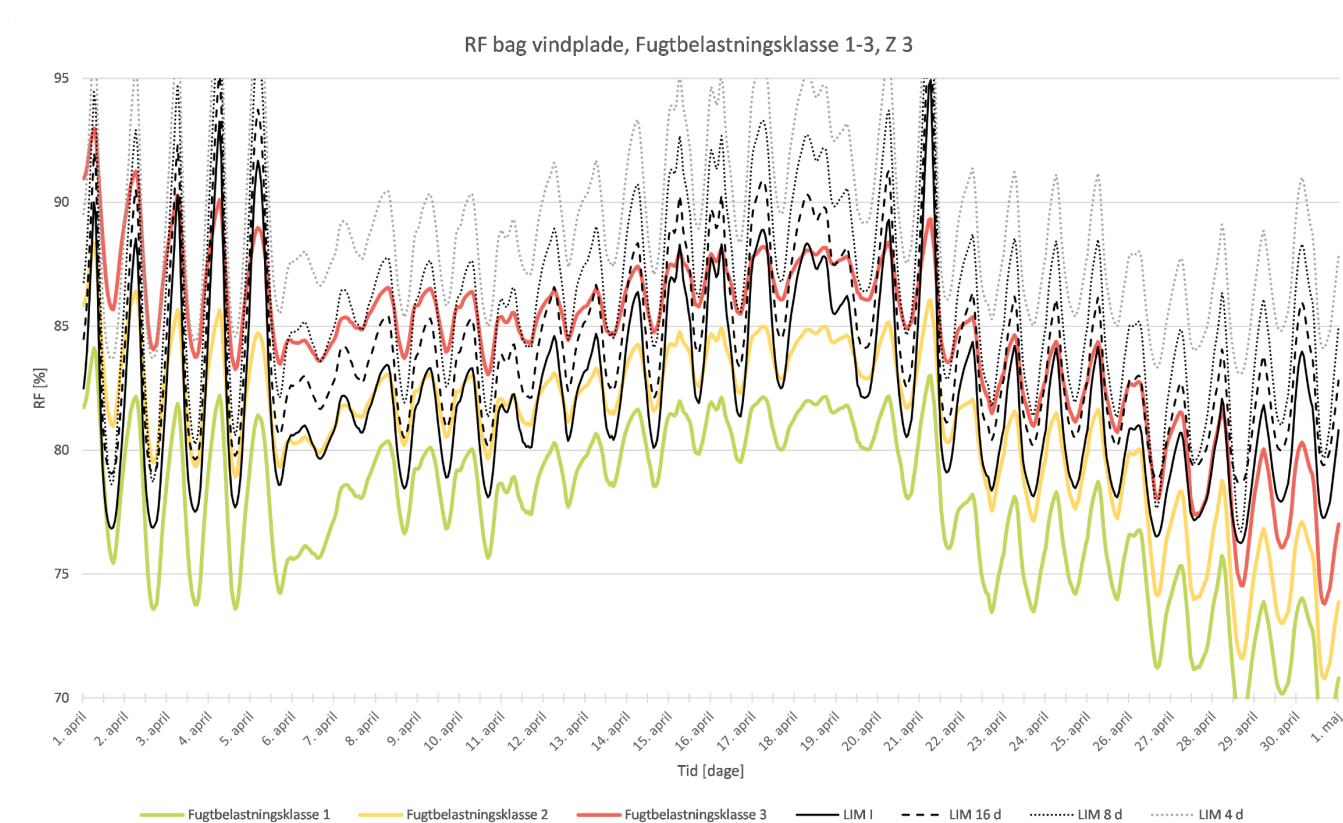


Figur 52. Spiring af svampesporer for forskellige svampearter og den resulterende laveste grænse for skimmelvækst. Efter (Sedlbauer, 2001, figur 30)

LIM-I-modellen for skimmelvækst på overflader (figur 9, th i afsnit 3.4.2) viser ud over den laveste grænse for skimmelvækst, også grænser for hvor lang tid der vil gå, før der sker skimmelvækst, når fugt- og temperaturforholdene bliver mere kritiske. Grænserne er benævnt 16 d – 1 d, hvor tallet angiver tiden i dage før spiring svampevækst starter. Kurverne kan bruges til en mere præcis risikovurdering, idet en kortvarig periode med høj relativ fugtighed ikke nødvendigvis vil give risiko for skimmelvækst.

Betragtes fugtforholdene bag vindpladen i en ydervægskonstruktion, hvor Z-værdien for dampspærreplanet er 3 GPa s m² / kg, kan det af tabel 4, i afsnit 5.4 aflæses, at der i april måned ingen risiko er for skimmel i fugtbelastningsklasse 1, nogen skimmelrisiko i fugtbelastningsklasse 2 og skimmelrisiko i fugtbelastningsklasse 3. Risikovurdering er lavet ud fra LIM I, og resulterer i en rød-gul-grøn-situation for konstruktionen i de 3 forskellige fugtbelastningsklasser (1-3).

Figur 53 viser fugtforholdene bag vindpladen i april måned for ovennævnte konstruktion med en Z-værdi for dampspærreplanet på 3 GPa s m² / kg, i fugtbelastningsklasserne 1-3. I figuren er skimmelgrænserne; LIM I, LIM 16 dage, LIM 8 dage og LIM 4 dage, indtegnet. Den relative fugtighed bag vindpladen for de 3 forskellige fugtbelastningsklasser (1-3) er for sammenlignelighedens skyld vist med rød-gul-grøn, som modsvarer samme periode (april måned) angivet i tabel 4, i afsnit 5.4.



Figur 53. Figuren viser RF bag vindpladen for en let ydervægskonstruktion i april måned, hvor dampspærreplanets Z-værdi er $3 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$. Skimmelgrænserne LIM I – LIM 4 d er vist som funktion af temperaturen, og aflæses i RF.

Af figur 53 ses det, at den relative fugtighed bag vindpladen for konstruktionen i fugtbelastningsklasse 1 ligger under LIM I gennem hele perioden, og der er derfor ingen risiko for skimmelvækst, hvilket symboliseres ved den grønne farve i tabel 4, i afsnit 5.4.

Den relative fugtighed bag vindpladen for konstruktionen i fugtbelastningsklasse 2 følger LIM I gennem store dele af perioden, hvor den relative fugtighed på nogle tidspunkter ligger lige over grænsen og på andre tidspunkter lige under grænsen. Det vil kun kræve en lille stigning i RF, for at fugtforholdene bliver kritiske, hvilket symboliseres ved den gule farve i tabel 4 i afsnit 5.4. Det kan også ses, at fugtniveauet bag vindpladen i fugtbelastningsklasse 2 på intet tidspunkt har en sammenhængende periode på over 16 dage, hvor RF kommer over grænsen LIM 16 d, hvorfor der kan argumenteres for, at der kun er minimal risiko for skimmel, og at konstruktionen måske kunne vurderes som grøn i stedet for gul.

Den relative fugtighed bag vindpladen i fugtbelastningsklasse 3 ligger over LIM I, og der findes næsten, men ikke helt, 16 sammenhængende dage, hvor RF bag vindpladen er på linje med eller over LIM 16 d. På de tidspunkter, hvor RF ligger over LIM 16 d, ligger RF dog ikke over, eller på linje med LIM 8 d, gennem en periode på 8 dage eller mere. Der kan derfor argumenteres for, at

konstruktionen i fugtbelastningsklasse 3 er knapt så kritisk, og at den måske kunne blive gul i stedet for rød.

Der findes forskellige holdninger til, hvor lidt skimmel der accepteres, før det er alvorligt. I nogle tilfælde er en lille smule skimmel ikke et problem, og i indeklimasammenhænge arbejdes der med arealgrænser for, hvor meget skimmel der må være på indvendige overflader (Dansk Standard, 2011).

Der er udviklet andre, detaljerede modeller til vurdering af risiko for skimmel inde i konstruktionen. I WUFI Pros tillægsmodul, VTT, kan risikoen for skimmelvækst på overflader og i konstruktioner vurderes på baggrund af de hygrotermiske simuleringer. I VTT-modulet er der taget højde for de forskellige materialers overflader og egenskaber, og modellen medregner den forsinkende effekt på skimmelvæksten som følge af materialernes fugtkapacitet. I VTT-modulet inddeles skimmelvæksten ud fra et skimmelindeks 0-6, hvor 0 er ingen vækst og 6 er en helt dækket overflade (Ojanen, et al., 2010).

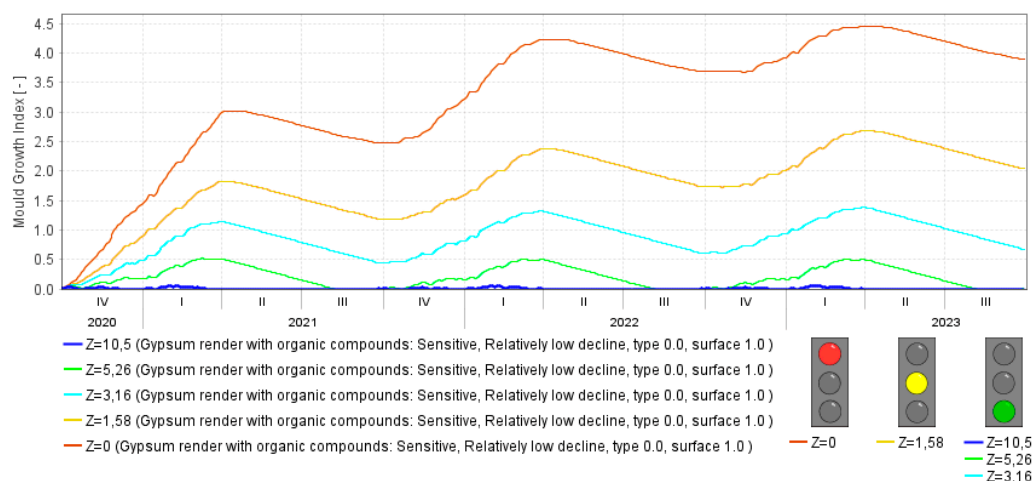
Tabel 7. VTT skimmelindeks. Oversat fra engelsk efter (Ojanen, et al., 2010, tabel 1)

Indeks	Vækstbeskrivelse
0	Ingen vækst
1	Små mængder skimmel på overfladen (mikroskop), indledende stadier af lokal vækst
2	Flere lokale skimmelvækstkolonier på overfladen (mikroskop)
3	Synlig skimmel på overfladen, < 10% dækket eller < 50% dækket af skimmel (mikroskop)
4	Synlig skimmel på overfladen, 10% - 50% dækket eller > 50% dækket af skimmelsvamp (mikroskop)
5	Stor vækst på overfladen, > 50% dækket (visuel)
6	Kraftig og tæt vækst, overfladen er tæt på 100% dækket af skimmelsvamp

I WUFI Pro VTT kan de kritiske grænser for skimmelvækst vurderes ud fra det beregnede skimmelindeks, afhængigt af hvor i konstruktionen der undersøges. Som udgangspunkt er et skimmelindeks på 1 og derover kritisk for indvendige overflader, og for udvendige overflader er det kritisk, hvis indekset er over 3.

De kritiske grænser for skimmelvækst inde i en konstruktionen, specielt i lette træskeletkonstruktioner, afhænger af på hvilken side af tæthedsplanet og hvor langt ude i konstruktionen der undersøges. Når der kigges på forholdene på indersiden af tæthedsplanet, er det kritiske skimmelindeks tættere på grænsen for indendørsforhold, og når det er forholdene lige bag vindspærren der undersøges, er det kritiske skimmelindeks tæt på grænsen for udendørsforhold.

I WUFI Pro VTT viser et trafiklys en generel vurdering af risikoen for skimmelvækst. For beregninger inde i en konstruktion betyder den grønne lampe, at skimmelindekset er mellem 0 – 2, den gule lampe, at skimmelindekset er mellem 2 og 3 og den røde lampe, at skimmelindekset er over 3.



Figur 54. Viser WUFI Pro VTT skimmelindeks over tid for målepunktet lige bag vindspærren, i position A, for referencekonstruktionen i fugtbelastningsklasse 2 ved forskellige Z-værdier for dampspærreplanet.

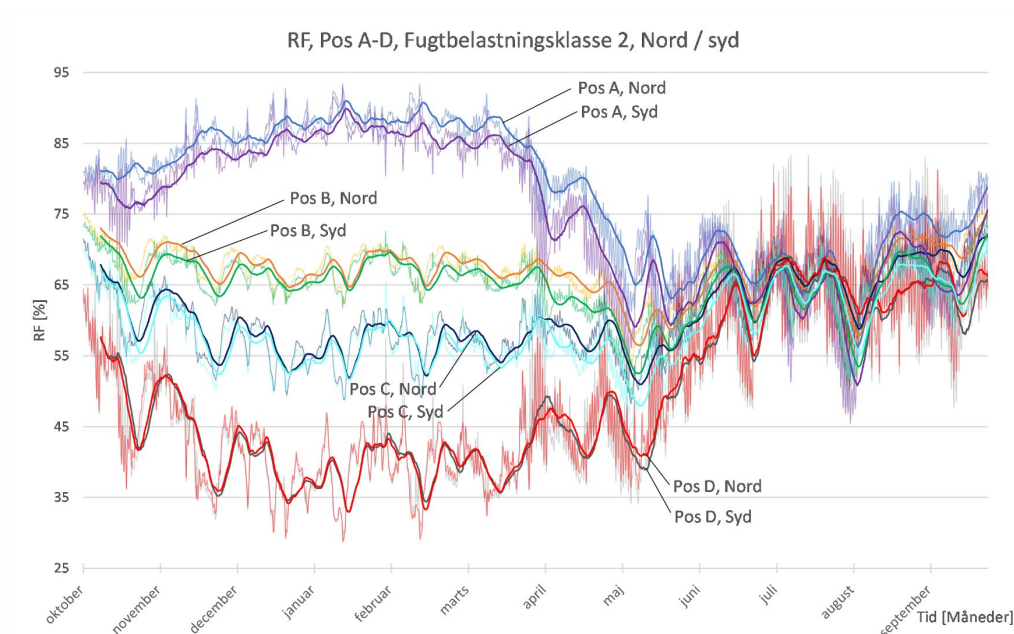
Det ses af figur 54, at der er en vis udvikling af skimmelvækst bag vindpladen for alle konstruktionerne, og at væksten stiger med faldende Z-værdi for dampspærreplanet. Det stemmer godt overens med denne rapporters undersøgelser. Når skimmelindekset vurderes efter WUFI Pro VTTs indeksgrænser for hvornår vækstniveauerne er kritiske, fremgår det af trafiklyset, at konstruktionerne i VTT-beregningen er mindre kritiske, end de vurderes i denne rapporters figur 39 i afsnit 5.4.

I denne rapport er der foretaget en skimmelvurdering ud fra LIM-I, den laveste grænse for hvornår der kan vokse skimmel på en organisk overflade, hvilket må siges at være den konservative tilgang og på den sikre side.

7.5 Orientering, ventilering og fugtadaptiv dampspærre

Fugtforholdene i lette, ventilerede ydervægge simuleres almindeligvis med en nordvendt orientering (Fraunhofer IBP, 2018). I figur 55 ses fugtniveauerne for de 4 målepunkter (Pos A-D) i referencekonstruktionen for en hhv. nordvendt og sydvendt orientering. Det ses, at den relative fugtighed i målepunktet generelt ligger højere for den nordvendte orientering, end for den sydvendte. Det bemærkes, at dette forhold gælder for en ventileret konstruktion, hvor slagregnen ikke har nævneværdig betydning for fugtforholdene inde i konstruktionen.

Kontrolsimuleringer af slagregnens betydning viste en marginal og ubetydelig forskel i RF for de 4 positioner (A-D) for referencekonstruktionen i denne rapport. Slagregnen kan have væsentlig betydning for andre konstruktioner.



Figur 55. RF for de 4 målepunkter (A-D) for hhv. nordvendt og sydvendt orientering. Simuleringen er foretaget i fugtbelastningsklasse 2, hvor dampspærreplanets Z-værdi er $10 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$. Timeværdier og glidende ugegnensnit er vist i figuren. Der ses generelt højere RF for den nordvendte orientering.

I denne rapport undersøges fugtforholdene i lette ydervægge inde i konstruktionen med en nordvendt orientering, da det erfaringsmæssigt er her der findes de højeste RF i konstruktionen, hvilket er den konservative tilgang, og med resultater på den sikre side.

7.5.1 Regnskærm med ventileret og ikke-ventileret hulrum

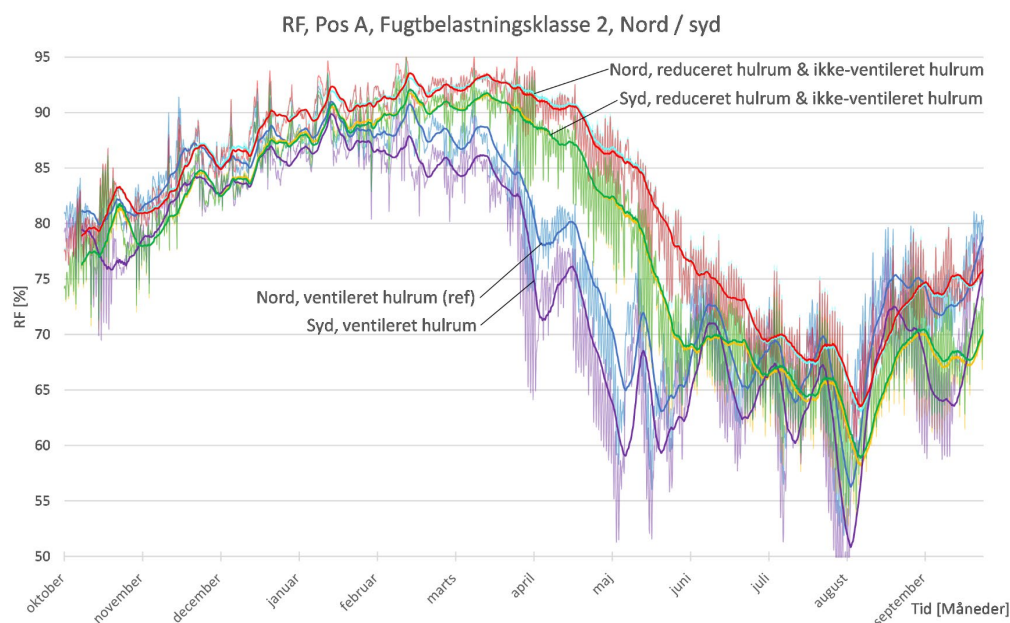
Bag regnskærmen skal der normalt udføres et hulrum for at sikre, at den slagregn der trænger ind bag regnskærmen, ikke når frem til den bagvedliggende konstruktion, og for at bortventilere indefra kommende fugt, der passerer vindspærren. Hulrummet bag regnskærmen kan være ventileret, ikke-ventileret eller reduceret.

Ventileret hulrum bag regnskærmen bør altid udføres, når regnskærmen er en plade, eller på anden måde tæt, fx beklædningsbrædder med fer og not. Der bør også laves ventileret hulrum, hvis der ikke er etableret et tæthedsplan eller udførelsen af tæthedsplanet ikke er kendt.

Ikke-ventileret hulrum bag regnskærmen kan udføres, hvis spalten mellem regnskærmen og vindspærren er minimum 20 mm, konstruktionen er udført med tilstrækkelig tæt dampspærre og såfremt der etableres en diffusionsåben vindspærre med en Z-værdi lavere end $10 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$.

Reduceret hulrum kan kun i særlige tilfælde udføres, og det er en forudsætning, at fugt og kondensdannelse ikke kan skade træet. Reduceret hulrum kan udføres, hvis der som regnskærm anvendes trykimprægneret en på to-beklædning eller almindelig klinkbeklædning og hvis vindspærren er en asfaltimprægneret træfiberplade. (En 12 mm asfaltimprægneret træfiberplade har en Z-værdi på $0,8 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$) (Johansen, 2008).

Figur 56 viser fugtforholdene bag vindpladen i en let ydervægskonstruktion, hvor dampspærreplanet's Z-værdi er 10 GPa s m² / kg, i fugtbelastningsklasse 2, for nord- og sydvendte orienteringer, for konstruktioner med hhv. ventileret hulrum, ikke-ventileret hulrum og reduceret hulrum.

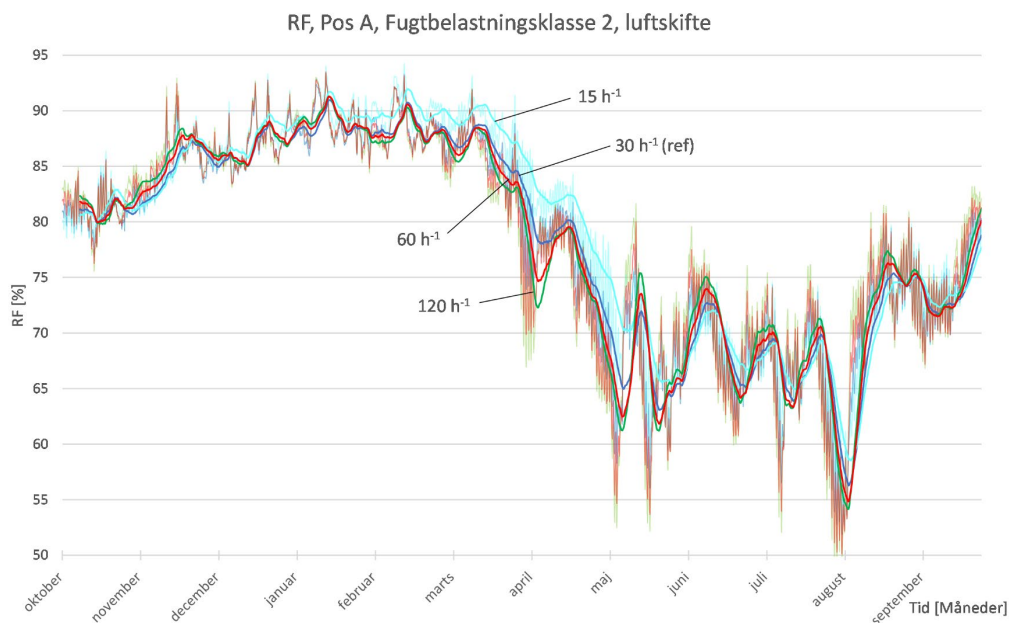


Figur 56. RF bag vindpladen i fugtbelastningsklasse 2, hvor Z-værdien for dampspærreplanet er 10 GPa s m² / kg. Figuren viser nordvendte og sydvendte orienteringer for ydervægskonstruktioner med hhv. ventileret hulrum (30 h⁻¹) ikke-ventileret hulrum og reduceret hulrum. RF bag vindpladen for konstruktionerne med ikke-ventileret hulrum og reduceret hulrum er generelt højere, end for konstruktionen med ventileret hulrum. For alle 3 situationer findes der højere fugtniveauer for den nordvendte orientering.

Af figur 39, i afsnit 5.4, kan det ses, at en konstruktion med en Z-værdi for dampspærreplanet på 10 GPa s m² / kg i fugtbelastningsklasse 2 ligger i gul zone, tæt på risikogrænsen for skimmelvækst bag vindpladen. Figur 56 kan ses som en følsomhedsanalyse for denne konstruktion. Orienteres konstruktionen mod syd, vil der være lavere RF bag vindpladen, og der vil være mindre risiko for skimmelvækst. Blokeres der for luftgennemstrømningen i det ventilerede hulrum eller monteres beklædningen direkte på vindspærren, vil RF bag vindpladen stige, og konstruktionen vil blive mere kritisk.

Det bemærkes at det ventilerede hulrum i referencekonstruktionen er simuleret med et luftskifte på 30 h⁻¹. WUFI Pro-guidelines definerer, at luftskiftet i spalten skal indsættes som et konstant luftskifte, der erfaringsmæssigt ligger indenfor et stort spænd på 10-200 h⁻¹ (Fraunhofer IBP, 2018). I andre undersøgelser af ventilerede loftkonstruktioner blev RF i loftrummet simuleret med et konstant luftskifte på 30 h⁻¹ og sammenlignet med målte værdier. Der var god overensstemmelse mellem resultaterne (Møller, Morelli, & Hansen, 2019).

I figur 57 ses RF bag vindpladen i en let ydervægskonstruktion i fugtbelastningsklasse 2, hvor dampspærreplanet's Z-værdi er 10 GPa s m² / kg for konstruktioner med 4 forskellige luftskifter for det ventilerede hulrum bag regnskærmen.



Figur 57. RF bag vindpladen for en let ydervægskonstruktion i fugtbelastningsklasse 2, hvor dampspærreplanets Z-værdi er 10 GPa s m² / kg ved 4 forskellige luftskifte for det ventilerede hulrum.

Det ses af figur 57, at luftskiftet i hulrummet har betydning for fugtforholdene bag vindpladen. Der ses højere RF bag vindpladen når luftskiftet reduceres, og lavere RF, når luftskiftet øges.

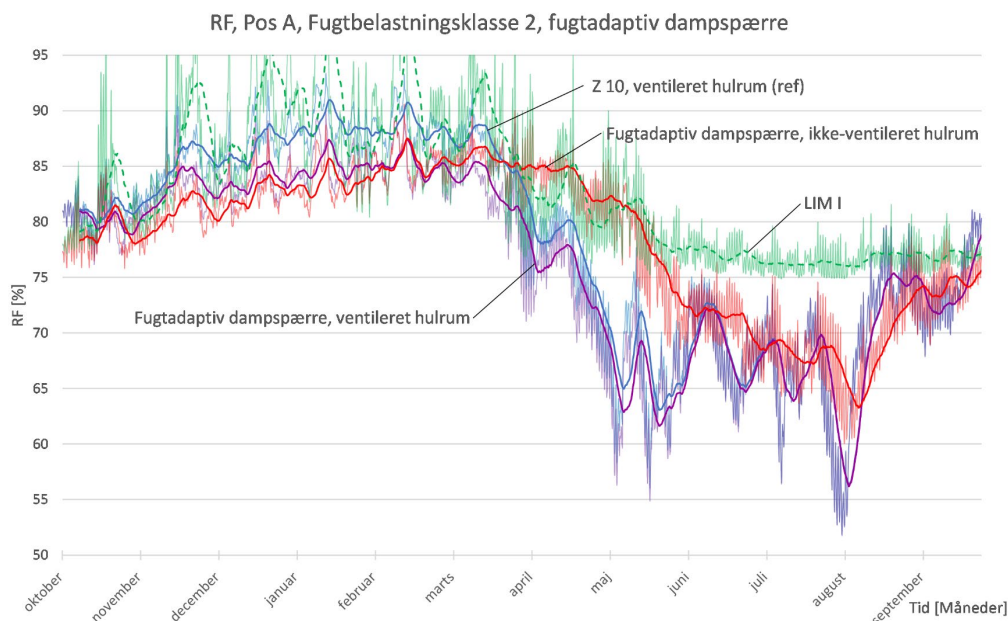
Da luftskiftet i hulrummet ikke altid kendes og da det i praksis altid vil variere afhængigt af vindhastighed, trykforhold og åbninger til det fri, må et konstant luftskifte på 30 h⁻¹ anses for at være 'et godt bud'.

I denne rapport, har fokus ikke været rettet mod facadebeklædning og hulrummet bag. Figur 56 og 57 viser imidlertid, at ventilationen har nogen betydning for fugtforholdene i konstruktionen, og det vil være relevant at undersøge disse forhold nærmere.

7.5.2 Fugtadaptiv dampspærre

Selvom de fugtadaptive dampspærre primært er udviklet til tagkonstruktioner, findes der mange produkter på markedet, der er udviklet til indbygning i lette ydervægskonstruktioner. Dampdiffusionsmodstanden for en fugtadaptiv dampspærre afhænger af den omgivende lufts relative fugtighed. Ved lav RF har membranen en tæt molekylestruktur som giver en stor dampdiffusionsmodstand og ved høj RF har membranen en åben molekylestruktur, som giver en lille dampdiffusionsmodstand.

I figur 58 ses en let ydervægskonstruktion i fugtbelastningsklasse 2 med nordvendt orientering, hvor dampspærreplanet udgøres af hhv. en dampspærremembran med en Z-værdi på 10 GPa s m² / kg, og en producentspecifik fugtadaptiv dampspærre med en Z-værdi ved 35 % RF på ca. 128 GPa s m² / kg og ved 90-100 % RF ca. 1,28 GPa s m² / kg.



Figur 58. RF bag vindpladen, Pos A, for en let ydervægskonstruktion i fugtbelastningsklasse 2 med hvor dampspærreplanet udgøres af hhv. en membran med en Z-værdi på 10 GPa s m² / kg og en producentspecifik, fugtadaptiv dampspærre, vist for både en ventileret og en ikke-ventileret konstruktion. Alle 3 konstruktioner er simuleret mod nord. Skimmelgrænsen LIM I, er vist som glidende ugegennemsnit, og er derfor kun orienterende.

Af figur 58 kan det ses, at den relative fugtighed bag vindpladen generelt er lavere, når der anvendes en fugtadaptiv dampspærre. Anvendes der en fugtadaptiv dampspærre i en konstruktion med ikke-ventileret hulrum bag regnskærmen, er RF lavere i vintermånederne, men højere i forårsmånederne.

Der er i denne rapport ikke foretaget systematiske simuleringer af fugtforhold i konstruktioner udført med fugtadaptive dampspærre, da formålet var at undersøge, om lette ydervægge kunne udføres fugtteknisk sikre uden en membran af plastfolie. Figur 58 viser imidlertid, at fugtadaptive dampspærre har betydning for fugtforholdene i konstruktionen, og det vil være interessant at undersøge lette ydervægskonstruktioner med fugtadaptive dampspærre nærmere.

7.6 Fugtforhold i ydervæggen

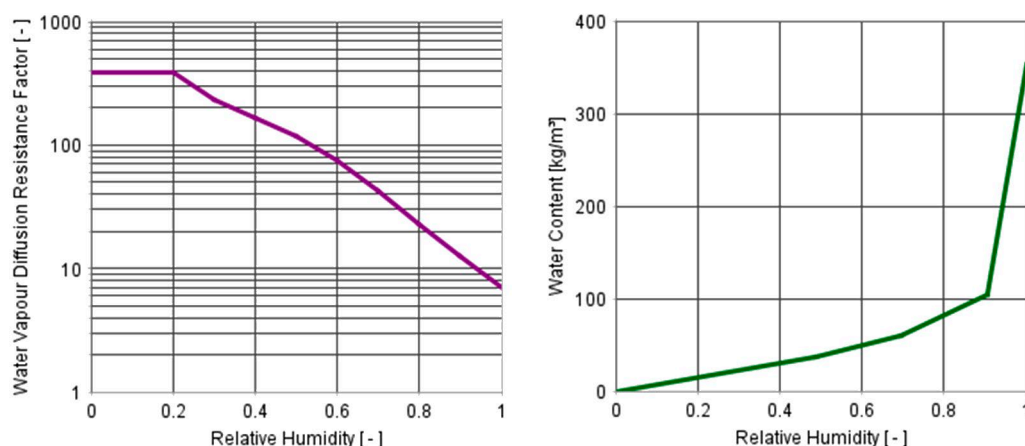
Fugtforholdene i boliger blev indledningsvist vurderet med stationære beregninger, og der tegnede sig hurtigt et billede af, at det var fugtforholdene bag vindpladen, i Pos A, som viste de højeste relative fugtigheder. Samme tendens sås i de dynamiske beregninger, som også viste, at den relative fugtighed bag vindpladen som forventet steg jo lavere Z-værdien for dampspærreplanet var, og jo højere fugtbelastning konstruktionen blev udsat for.

Ud fra forudsætningen om, at ydervæggen udføres tilstrækkeligt lufttæt, fremgår det af figur 39 og 40, i afsnit 5.4, med hvilken fugtbelastning en given Z-værdi kan indbygges. Generelt ses det, at der for boliger godt kan udføres fugtteknisk sikre, lette ydervægskonstruktioner med en Z-værdi der er mindre end 50 GPa s m² / kg, som det ellers er forskrevet i alment teknisk fælleseje.

Ifølge figur 39, vil en Z-værdi på ca. 25 GPa s m² / kg i fugtbelastningsklasse 3 og ca. 15 GPa s m² / kg i fugtbelastningsklasse 2 være tilstrækkeligt til, at der ikke opstår risiko for skimmeldannelse bag vindpladen, hvilket er et udtryk for den sikkerhedsmargin der er indlagt i gældende anvisninger.

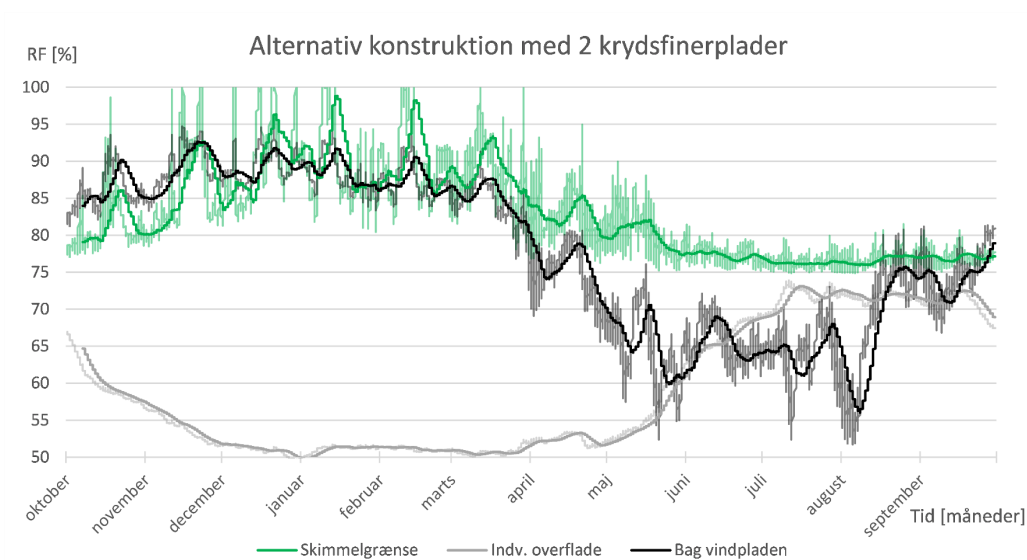
Hvis ovenstående Z-værdier overholdes, og såfremt der kan findes andre egnede materialer, der kan udføres med lufttætte samlinger, er det således muligt at lade plastmembranen udgå i lette ydervægskonstruktioner.

Eksemplet herunder viser fugtniveauerne bag vindpladen i en konstruktion, hvor dampspærremembranen og de 2 indvendige gipsplader er skiftet ud med 2 stk. 15 mm tykke krydsfinerplader, der udgør tæthedsplanet. Krydsfinerpladernes densitet er her 600 kg/m³. Det må bemærkes, at krydsfinermaterialernes fugtegenskaber varierer meget, fx har de fleste krydsfinerplader varierende Z-værdi afhængig af den relative fugtighed, hvilket i praksis kan betyde, at en ydervæg der performer godt når den relative fugtighed i indeluften er lav, vil få problemer, når den relative fugtighed stiger, fx ved øget fugttilskud til indeluften. De specifikke materialeegenskaber varierer fra producent til producent, og konstruktioner må i alle tilfælde vurderes ud fra producentspecifikke materialeparametre. I eksemplet er der anvendt et krydsfinermateriale fra WUFI Pros materialebibliotek. Dampdiffusionsmodstand og sorptionskurve for det anvendte materiale fremgår af figur 59.



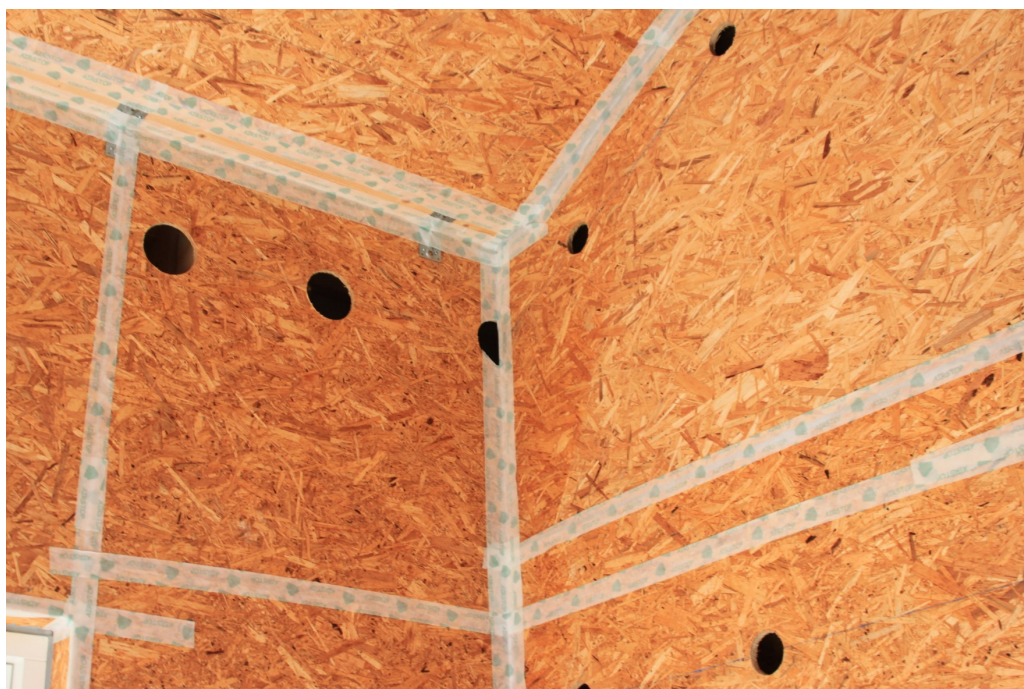
Figur 59. Dampdiffusionsmodstand og sorptionskurve for et krydsfinermateriale. Hvis de 2 krydsfinerplader samlet har en tykkelse på 30 mm, vil de have en Z-værdi ved 60 % RF på ca. 18 GPa s m² / kg, ved 80 % RF på ca. 6,5 og ved 100 % RF tæt på 1 GPa s m² / kg.

I figur 60 ses den relative fugtighed hhv. bag vindpladen og på den indvendige overflade. Skimmelgrænsen er vist som funktion af temperaturen bag vindpladen. Det ses at den relative fugtighed i indeluften ligger mellem 50-72 %, hvilket betyder at dampdiffusionsmodstanden for krydsfinerpladerne varierer fra ca. 25-6 GPa s m² / kg. I perioden fra midt august til midt oktober, hvor den relative fugtighed i indeluften er høj, er Z-værdien tilsvarende lav, og det ses, at der i vinterhalvåret er perioder, hvor den relative fugtighed bag vindpladen ligger tæt på og nogle tidspunkter lidt over skimmelgrænsen.



Figur 60. RF bag vindpladen og på indvendig overflade for en konstruktion, hvor tæthedsplanet udgøres af to 15 mm krydsfinerplader i fugtbelastningsklasse 2. Skimmelgrænsen er vist som funktion af temperaturen i punktet lige bag vindpladen. Værdierne er vist som timeværdier med glidende ugegnemsnit som fuldt optrukket linje. RF bag vindpladen ligger tæt på og nogle tidspunkter lidt over skimmelgrænsen.

Andre materialer vil teoretisk set også kunne anvendes, fx er der bygget boliger, hvor tæthedsplanet udgøres af specielle OSB-plader med tapede samlinger (Andersen, 2017). På billedet i figur 61 ses det, at samlinger mellem plade-stød i fladen og hjørnesamlinger tapes for at tilstrækkelig lufttæthed opnås. Der kan sættes spørgsmålstejn ved tapens ældningsbestandighed, som her er en forudsætning for et intakt tæthedsplan i hele byggeriets levetid, set i lyset af den nyligt udgivne rapport om PE-membraner.



Figur 61. Træskeletvæg i Permatopia-byggeriet, hvor tæthedsplanet udgøres af specielle OSB-plader med tapede samlinger. Hullerne skal bruges til indblæsning af granulat, og tapes til efterfølgende. Foto fra (Building-supply.dk, u.d.).

7.6.1 Fugtforhold i ydervæggen i andre bygninger end boliger

For fuldstændighedens skyld blev simuleringerne også udført for fugtbelastningsklasse 4 og 5, hvor det tydeligt fremgik, at tæthedsplanet som minimum skal have en Z -værdi på ca. $100 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$, for at der ikke opstår kritiske fugtniveauer med risiko for skimmelvækst på bagsiden af vindpladen. Det er stort set kun plastmembraner, der kan komme op på så høje Z -værdier, når der tages udgangspunkt i, at de lette ydervægge konstrueres efter kendt byggeteknik. Det bemærkes, at fugtrisikovurderingerne for fugtbelastningsklasse 4 og 5, vist i figur 40, i afsnit 5.4.1, ikke er udført tilsvarende nuanceret som risikovurderingerne i tabel 4 og figur 39, i afsnit 5.4, for boliger, i fugtbelastningsklasse 1-3.

7.7 Hvad viser andre undersøgelser?

I et forsøgshus med forskellige typer lette ydervægskonstruktioner opbygget uden dampspærremembran blev fugtforholdene i konstruktionen målt og analyseret. Konstruktionerne var generelt opbygget så dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre var nær 1:1 og for nogle af konstruktionerne 10:1 (hvilket er det modsatte af forholdet beskrevet i almen teknisk fælleseje). Målingerne viste risiko for skimmeldannelse bag vindspærren, selv ved meget lave fugtbelastninger, svarende til fugtbelastning 1-2. Undersøgelsen konkluderede, at der kunne være en høj risiko for fugtrelaterede skader ved vindspærren, specielt i områder uden den udvendigt monterede isolering (Egen Vinding og Datter, 2019, s. 74 - 108 (bilag 4)).

Andre undersøgelser af lette træskeletvægge viste, at konstruktioner med en isoleringstykkelse på 200-400 mm kun resulterer i en marginalt højere relativ fugtighed på indersiden af vindpladen ift. konstruktioner med en isoleringstykkelse på 150 mm, hvilket kun er kritisk om vinteren, hvor temperaturen samtidig er så lav, at der ikke sker skimmelvækst på indersiden af vindpladen. Undersøgelsen viste, at det ikke er den øgede isoleringstykkelse, men derimod forhold som konstruktionens lufttæthed og dampdiffusionsmodstand, der har betydning for, om der er risiko for skimmel (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, 2017).

Engelske undersøgelser af lette træskeletvægge med OSB-plader som vindspærre ($Z = 17 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$), viste forskellige risikoniveauer for skimmelvækst bag vindpladen. Der blev udført hygrotermiske simuleringer med forskellige parametervariationer, bl.a. simuleringer med lave Z -værdier for AVCL-laget (Air and Vapour Control Layer) og simuleringer med huller i laget. Undersøgelserne viste at risikoen for skimmel mindskedes, når S_d -værdien for AVCL-laget blev øget (fra lavere værdier) til 5,5 m (svarende til en Z -værdi på ca. $28 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$). Skimmelrisikoen bag vindpladen blev væsentligt reduceret, når AVCL-laget med høj S_d -værdi blev omhyggeligt lufttætnet. Undersøgelsen viste også, at en effektiv måde at minimere risikoen for skimmel bag vindpladen

kunne opnås ved at tilføje et isoleringslag uden på vindpladen (Marincioni, Lorenzetti, & Altamirano-Medina, 2019).

8 Konklusion

Der er i denne rapport udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægge i forskellige fugtbelastningsklasser, med forskellige Z-værdier for dampspærreplanet, for at undersøge om det er muligt at udføre fugtteknisk sikre, lette ydervægskonstruktioner uden en dampspærremembran af PE-folie.

Konklusionen er, at det teoretisk set godt kan lade sig gøre at udføre lette ydervægge uden en dampspærremembran af PE-folie, såfremt konstruktionen lufttættes, og såfremt Z-værdien for materialerne, der indgår i tæthedsplanet, er tilstrækkelig høj til at sikre imod unødigt opfugtning bag vindspærren som følge af vanddampdiffusion fra indeluften.

Rapporten identificerer flere udfordringer ved at lade dampspærremembranen erstatte af pladematerialer, fx at sikre tætningen mellem pladesamlinger og ved installationsgennemføringer, træbaserede pladematerialers varierende og lave dampdiffusionsmodstand og betydningen af dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre, når dampdiffusionsmodstanden for dampspærreplanet er lavere end de gældende anbefalinger på $50 \text{ GPa s m}^2 / \text{kg}$.

9 Perspektivering

Denne rapport har vist, at det teoretisk er muligt at udføre fugtsikre lette ydervægskonstruktioner uden dampspærremembran, såfremt konstruktionerne udføres lufttæt, og Z-værdierne for materialerne der indgår i tæthedsplanet, er i henhold til figur 39, i afsnit 5.4. Dette åbner således for at designe alternative konstruktioner, eller udvikle produkter, der passer til den fugtbelastningsklasse de indbygges i. Alternative konstruktioner skal vurderes fugtteknisk, og der kan med fordel foretages hygrotermiske simuleringer for at vurdere fugtforholdene i de alternative konstruktioner.

Det vil være relevant at kigge nærmere på andre fugttekniske forhold der kan spille ind. Fx kan det være relevant at kigge nærmere på det ventilerede hulrum mellem beklædning og vindspærre og undersøge, om forhold som temperatur- og ventilationsrate har noget at sige i forhold til den relative fugtighed.

Andre relevante undersøgelser kan omfatte dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og dampspærre og konstruktioner med fugtadaptive dampspærre i forbindelse med ikke-ventilerede lette ydervægskonstruktioner, hvor det forventes, at beklædningsmaterialets beskaffenhed og konstruktionsens orientering har afgørende betydning for fugtforholdene i konstruktionen.

Denne rapport kan også ses som et forstudie til en fuldskalatest, hvor lette ydervægskonstruktioner uden dampspærremembran undersøges under virkelige klimapåvirkninger.

Resultaterne i denne rapport tyder på, at det vil være relevant at undersøge hvornår skimmel reelt bliver et problem. Og den lægger sig op ad studier, hvor formålet kunne være at udvikle en fugtrisikomodel som kan bruges til dokumentation for at konstruktionerne overholder bygningsreglementets krav om fugt i konstruktioner.

10 Kilde- og litteraturliste

- Adelhøj, J., Munch-Andersen, J., & Johansen, B. L. (2012). *Træplader* (Årg. TRÆ 60). Kgs. Lyngby: Træinformation. Hentet fra www.traeinfo.dk
- Andersen, C. (december 2017). Entreprenør bygger ny økologisk landsby. *Træ*, 6-9. Hentet fra <https://www.traesektionen.dk/media/30912/trae-17-dec-2017-net.pdf>
- Brandt, E. (2013). *Fugt i bygninger* (2. udg., Årg. SBI-anvisning 224). Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Building-supply.dk*. (u.d.). Hentet 2020 fra Permatopia, økologiske og åndbare boliger: <https://www.building-supply.dk/supplement/view.html?id=9150>
- Bunch-Nielsen, T., & Christensen, G. (2005). *Uventilerede paralleltag med dampbremse af Hygrodiode*. Ballerup: BYG-ERFA.
- Bunch-Nielsen, T., & Christensen, G. (2019). *Fugtadaptive dampspærre i uventilerede paralleltag*. København K: BYG-ERFA.
- Cappelen, J. (2020). *Danmarks klima 2010-2019, tabeller*. København: Danmarks Meteorologiske Institut.
- Cappelen, J., & Hesselbjerg, J. C. (2005). *Danmarks Klimacenter rapport 05-03*. København: Danmarks Meteorologiske Institut.
- Christensen, G., & Andersen, N. E. (1972). *Ydervæggen som klimaskærm* (Årg. SBI-anvisning 77). København: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Christensen, G., & Bunch-Nielsen, T. (2005). *Vindgips i lette ydervægge - risiko for fugtskader* (Årg. (21) 05 09 28). Ballerup: BYG-ERFA.
- Dansk Standard. (2011). *Frivillig klassificering af indeklimaets kvalitet i bolier, skoler, daginstitutioner og kontorer*. DS 3033:2011. København: Dansk Standard.
- Due, L., & Brandt, E. (2013). *Bygningers lufttæthed – tæthedskrav, bygningsudformning og måling* (Årg. 131229). København: BYG-ERFA.
- Due, L., & Brandt, E. (2020). *Bygningers lufttæthed* (Årg. (99) 20 04 27). København: BYG-ERFA.
- duko.dk. (2014). *Dampspærre- og Undertagsklassifikationsordning*. Hentet fra DUKO: <https://duko.dk/>
- Egen Vinding og Datter. (2019). *Det Åndbare Hus - Afsluttende rapport*. Miljøstyrelsen.

- Fraunhofer. (2019). WUFI Pro ver. 6.4. Hentet fra <https://wufi.de/en/2019/12/05/release-wufi-pro-6-4/>
- Fraunhofer IBP. (2017). *Guideline for Using the Air Infiltration Source in WUFI*. Fraunhofer IBP. Hentet fra https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.11_Guideline_Infiltration.pdf
- Fraunhofer IBP. (2018). *Handling of typical constructions*. Fraunhofer IBP.
- Gottfredsen, F. R., & Nielsen, A. (1997). *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber* (1. udgave, 7. oplag 2015 udg.). Lyngby: Polyteknisk Forlag.
- Gullbrekken, L., Geving, S., Time, B., Andersen, I., & Holme, J. (2015). *Moisture conditions in well-insulated wood-frame walls. Simulations, laboratory measurements and field measurements*. Wood Material Science & Engineering. doi:10.1080/17480272.2015.1064473
- HM Government. (2010). *Approved document, F1 Means of ventilation*. HM Government. The Building Regulations - Ventilation.
- Icopal. (Juli 2017). *Dampspærrer*. Hentet fra BMI icopal: <http://docs.icopal.dk/Dampspaerre/4070IcoVario/?page=1>
- Johansen, B. L. (2008). *Træfacader* (Årg. TRÆ 55). Lyngby: Træinformation.
- Johansen, B. L. (2014). *Træarter* (1. udg., Årg. TRÆ 69). Lyngby: Træinformation.
- Loretsen, M. N. (5. januar 2020). Hentet fra Altinget.dk: <https://www.altinget.dk/artikel/boligminister-det-er-klart-vi-skal-byggemere-i-trae>
- Madsen, E. M., Nielsen, A. T., Madsen, P., & Hilbert, P. (2019). *Klimaskoven*. Esben Møller Madsen.
- Marincioni, V., Lorenzetti, F., & Altamirano-Medina, H. (2019). *Parametric study on the hygrothermal performance of timber frame walls with external airtightness membranes in a temperate maritime climate*. UCL Institute for Environmental Design and Engineering og UK Centre for Moisture in Buildings. EDP Sciences.
- MEMBRAN-ERFA. (u.d.). *Dampspærre*. Hentet maj 2020 fra MEMBRAN-ERFA, Bygningers tæthed: <https://membran-erfa.dk/luft>
- Morelli, M., Nielsen, A., & Vanhoutteghem, L. (2017). *Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner*. SBI 2017:20. København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Munch-Andersen, J. (2018). *Træskelethuse* (1. udg., Årg. TRÆ 56). Lyngby: Træinformation. Hentet fra www.traeinfo.dk

- Møller, E. B. (2010). *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Aalborg Universitet.
- Møller, E. B., Brandt, E., & Pedersen, E. S. (2016). *Småhuse - Klimaskærmen* (1. udg., Årg. SBI-anvisning 267). København: SBI Forlag.
- Møller, E. B., Morelli, M., & Hansen, T. (September 2019). Air change rate in ventilated attics – reality and input for simulations. I R. Černý, J. Kočí, & V. Kočí (red.), *MATEC Web of Conferences: 4th Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2019) [02073] Prague, Czech Republic: EDP Sciences. MATEC Web of Conferences, Bind. 282* <https://doi.org/10.1051/mateconf/>, s. 1-6.
- Nielsen, T. G., Reeh, L., Enders, K., Lenz, R., & Sørensen, T. K. (juli 2015). *Havet er fuld af mikroplastik*. Hentet fra Forskerzonen - Videnskab.dk: <https://videnskab.dk/miljo-naturvidenskab/havet-er-fuld-af-mikroplastik>
- Niras. (Oktober 2013). *Analyse af praktiske erfaringer med energireovering af bygninger i firebyggningssegmenter*. Bygningsstyrelsen.
- Ojanen, T., Lähdesmäki, K., Viitanen, H., Vinha, J., Peuhkuri, R., & Salminen, K. (2010). *Mold Growth Modeling Using Sensitivity Classes of Materials of Building Structures*. ASHRAE.
- Rasmussen, T. V., & Nicolajsen, A. (2007). *Klimaskærmens lufttæthed* (1. udg., Årg. SBI-anvisning 214). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Rasmussen, T. V., Hansen, T. K., Nielsen, J. K., Steenstrup, F. R., Ottosen, L. M., Petersen, L. G., . . . Shashoua, Y. (2020). *Materialeegenskaber - Test af polyethylenmembraners egenskaber før og efter accelereret ældning*. Aalborg Universitet København, BUILD. København: BUILD (tidl. SBI).
- Rasmussen, T. V., Møller, E. B., Steenstrup, F. R., Nielsen, J. K., Ottosen, L. M., Petersen, L. G., . . . Shashoua, Y. (2018). *PE-membraners levetid i byggeriet: et litteraturstudie*. København, Danmark: SBI forlag.
- Rode, C. (2012). *Bygningfysik*. ICOPAL, Icopal Håndbog 9.
- Schjøning, C., Hansen, M. H., & Brandt, E. (2015). *Dampspærrematerialer og fugttransport – væg- og loftkonstruktioner*. København: Byg-ERFA.
- Sedlbauer, K. (April 2002). Prediction of Mould Growth by. *THERMAL ENV. & BLDG. SC*(vol. 25). doi:10.1106/109719602024093
- Seldebauer, K. (2001). *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Sika. (2020). *Vapor Proofing Membranes*. Hentet maj 2020 fra Sika industry: <https://industry.sika.com/en/home/building-components/facade/vapor-proofing-membranes.html>

- Skånmark. (2020). Hentet 2020 fra Skånmark.dk - Fjernelse af skimmelsvamp:
<http://www.skånmark.dk/page/fjernelse%20af%20skimmelsvamp.html>
- Slanina, P., & Silarová, S. (2008). Moisture transport through perforated vapour retarders. *Building and Environment*(44), s. 1617–1626.
- Sonne, F. G. (11. oktober 2019). Hentet fra Videnskab.dk:
<https://videnskab.dk/naturvidenskab/byggeindustrien-er-en-gigantisk-byrde-for-klimaet-hvordan-goer-vi-den-groennere>
- Thomassen, T. (2000). *Træetørring* (Årg. TRÆ 45). Kgs. Lyngby: Træbranchens Oplysningsråd.
- Thrane, U. (2019). Skimmelsvampe i bygninger. *Kompendium til skimmelsvampe 2019*. København: SBI.
- Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2018). *Materialevalg*. Hentet maj 2020 fra Eksempelsamling om Energi:
<https://eksempelsamling.bygningsreglementet.dk/materialevalg>
- Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2019). *Bygningsreglementet*. Hentet fra bygningsreglementet.dk
- Valbjørn, O. (2003). *Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger* (Årg. By og Byg Anvisning 204). Hørsholm: By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut.
- Videnskab.dk. (2018). *Forskerzonen*. Hentet fra Videnskab.dk:
<https://videnskab.dk/naturvidenskab/mikroplast-i-havet-10-ting-du-boer-undgaa-for-at-afhjaelpe-forureningen>
- Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., & Zirkelbach, D. (2015). *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.165

11 Bilagsfortegnelse

- A U-værdi, referenceydervæg
- B Stationære beregninger
- C Dynamiske beregninger, boliger Pos A-D
- D Fugtforhold bag vindpladen for bygninger i fugtbelastningsklasse 1-3
- E Fugtforhold i konstruktioner i fugtbelastningsklasse 4 og 5, Pos A-D

BILAG A

Referenceydervæg					
Materiale	d, m	λ , W/mK	R, m ² K/m		
R_{se}					
Ventileret hulrum (=R _{si}) ¹			0,13		
Vindgips	0,013	0,25	0,05		
Træskelet/isolering	0,195	0,039	4,96		
Forskalling/isolering	0,045	0,039	1,14		
Gips	0,026	0,25	0,10		
R _{si}			0,13		
		ΣR :	6,52	U-værdi:	0,15 W/m²K
Inhomogent lag: Træskelet/isolering Afstand: 0,6 m, c-c					
	b, m	λ , W/mK	Andel, %	λ_{middel}	
Træ	0,045	0,13	7,5%	0,010	W/mK
Mineraluld	0,555	0,032	92,5%	0,030	W/mK
				SUM:	0,039 W/mK
Inhomogent lag: Forskalling/isolering Afstand: 0,6 m, c-c					
	b, m	λ , W/mK	Andel, %	λ_{middel}	
Træ	0,045	0,13	7,5%	0,010	W/mK
Mineraluld	0,555	0,032	92,5%	0,030	W/mK
				SUM:	0,039 W/mK

¹ Udvendig ventileret beklædning + udvendig overgangsisolans erstattes af indvendig overgangsisolans DS418, 6.4.3.

BILAG B

Referencecydeværg

September Fugtblastningsklasse

3

Materiale	Tykkelse, d [m]	Varmeled- ningsevne, λ [W/mK]	Isolans, R (d/λ) [m²K/W]	Temperatur- fald, Δθ [°C]	Temperatur θ [°C]	Mætnings- damtryk p _a [Pa]	damper- meabilitet, δ [kg/m²sPa]	Diffusions- modstand, Z (d/δ) [Pa*m²s/kg]	Kontrol: Z-værdi [GPa*m²s/kg]	Damptryks- fald, Δp [Pa]	Damptryk p [Pa]	Relativ fugtighed, RF [%]	Korrektion for mætning		
Damptryks- fald, Δp [Pa]	Damptryk p [Pa]		Relativ fugtighed, RF [%]		Damptryks- fald, Δp [Pa]		Damptryk p [Pa]		Relativ fugtighed, RF [%]		Damptryks- fald, Δp [Pa]		Damptryk p [Pa]		Relativ fugtighed, RF [%]
Udeklima						13,7	1.567				1.332	85			0
Rse															0
Udvendig beklædning						13,7	1.567				1.332	85			0
Ventileret hulrum (=Rsi)			0,13	0,1						0,00E+00			0,00E+00		0
						13,8	1.581				1.332	84			0
Vindplade	0,013	0,25	0,05	0,1				2,60E-11	5,00E+08	0,5	4,56E+01		0,00E+00		0
						13,9	1.586				1.378	87			0
Isolering yderste lag	0,05	0,032	1,56	1,6				2,00E-10	2,50E+08	0,25	2,28E+01		0,00E+00		0
						15,5	1.759				1.400	80			0
Isolering midterste lag	0,05	0,032	1,56	1,6				2,00E-10	2,50E+08	0,25	2,28E+01		0,00E+00		0
						17,1	1.949				1.423	73			0
Isolering inderste lag	0,10	0,032	3,13	3,2				2,00E-10	5,00E+08	0,50	4,56E+01		0,00E+00		0
						20,3	2.383				1.469	62			0
Dampspærre, PE-folie	0,0002							1,50E+09	1,5	1,37E+02			0,00E+00		0
						20,3	2.383				1.606	67			0
Forskalling/isolering	0,045	0,032	1,41	1,4				2,00E-10	2,25E+08	0,23	2,05E+01		0,00E+00		0
						21,8	2.604				1.626	62			0
Gips	0,013	0,25	0,05	0,1				2,60E-11	5,00E+08	0,5	4,56E+01		0,00E+00		0
						21,8	2.612				1.672	64			0
Gips	0,013	0,25	0,05	0,1				2,60E-11	5,00E+08	0,5	4,56E+01		0,00E+00		0
						21,9	2.621				1.718	66			0
Rsi				0,13	0,13										0
Indeklima						22	2.642				1.718	65			0
Σd	0,284	ΣR	8,07	θ _{inde} - θ _{ude}	8,3	ΣZ	4,23E+09			p _{inde} - p _{ude}	386				0
U-værdi:			0,12 (W/m²K)								ΣZ _u	0,00E+00	Δp _u		0
Kontrol (ΣΔθ):			8,3						Kontrol (ΣΔp):	386	ΣZ _p	0,00E+00	Δp _p		0

RF, Fugtblastningsklasse 3 - bag vindpladen, Pos A

Relativ fugtighed													
Z-værdi	Oktober	November	December	Januar	Februar	Marts	April	Maj	Juni	Juli	August	September	
0	93	100	100	100	100	100	100	91	83	71	78	75	88
1,5	90	97	98	100	100	99	87	81	70	76	73	87	
3	89	95	95	100	100	96	85	80	69	76	73	86	
5	88	93	93	99	97	94	84	79	68	75	72	86	
10	87	92	90	96	93	92	83	78	67	74	71	85	
50	86	90	86	92	89	89	81	77	67	74	71	84	
150	86	89	86	91	88	89	80	77	66	73	70	84	
Temperatur [°C]	9,4	5,3	2,0	-0,1	-0,6	3,0	6,9	10,8	15,8	16,5	16,8	13,9	
Skimmelgrænse	81,1	86,0	92,2	97,3	98,6	90,1	83,8	79,9	77,3	77,0	76,9	78,1	

RF, Fugtblastningsklasse 3 - 50 mm fra vindplade, Pos B

Relativ fugtighed													
Z-værdi	Oktober	November	December	Januar	Februar	Marts	April	Maj	Juni	Juli	August	September	
0	84	87	86	86	85	86	80	76	68	74	72	82	
1,5	80	83	82	81	81	83	76	73	66	72	69	80	
3	79	80	78	80	79	79	73	72	65	71	68	79	
5	78	78	75	78	75	77	72	71	64	70	68	78	
10	76	76	71	74	71	74	70	70	63	69	67	77	
50	75	74	68	69	66	71	68	69	62	68	65	76	
150	75	73	67	68	65	70	68	68	62	68	65	76	
Temperatur [°C]	11,5	8,2	5,6	3,9	3,5	6,4	9,5	12,6	17,1	17,8	18,1	15,5	
Skimmelgrænse	79,4	82,3	85,6	88,4	89,2	84,4	81,0	78,8	76,8	76,6	76,5	77,4	

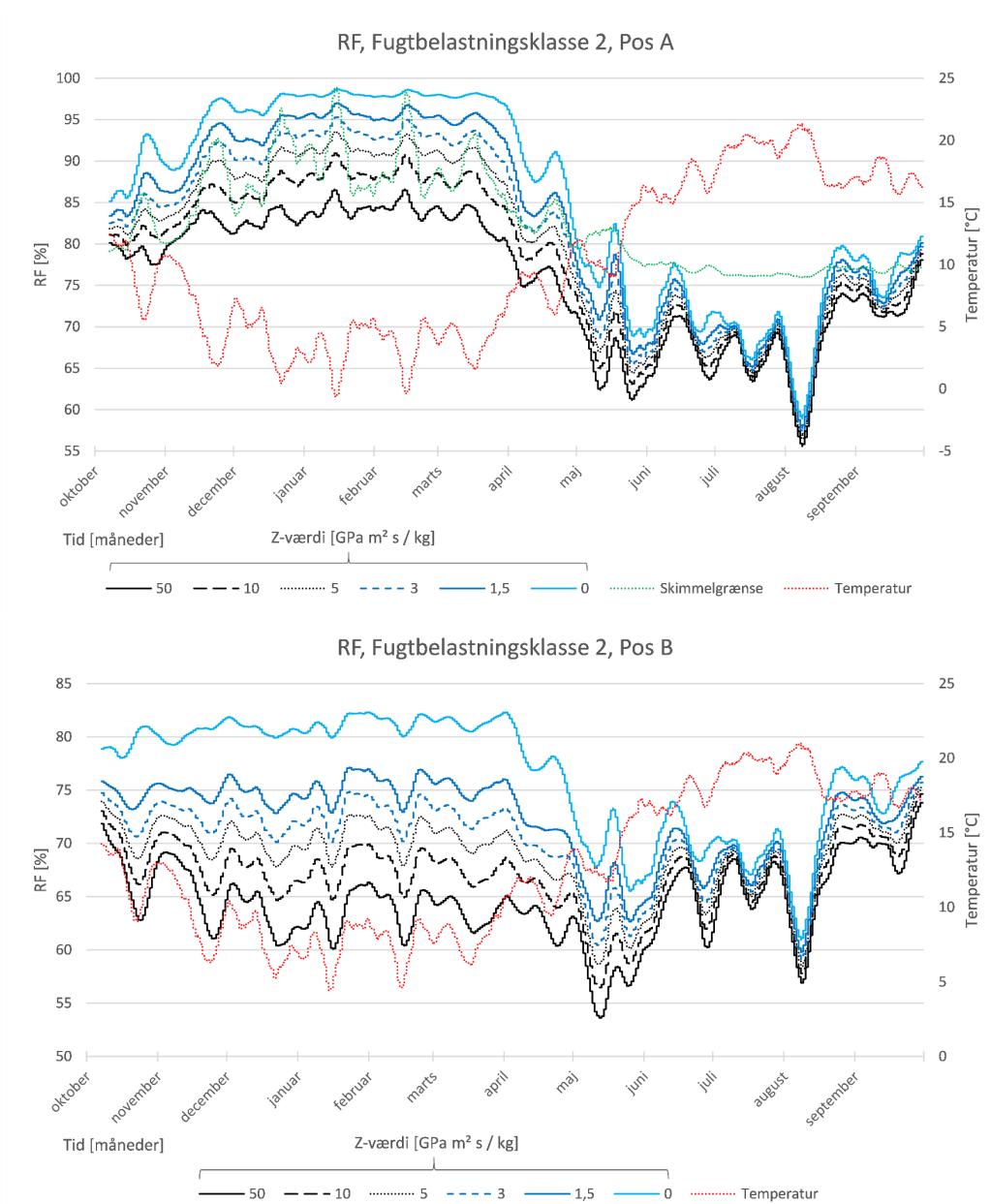
RF, Fugtblastningsklasse 3 - midt i isoleringslaget, Pos C

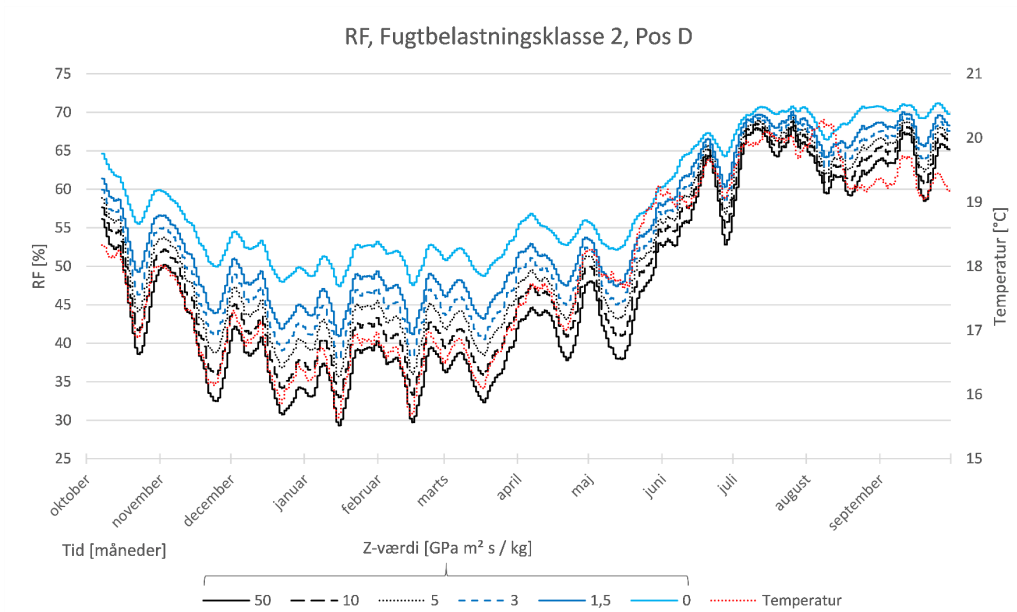
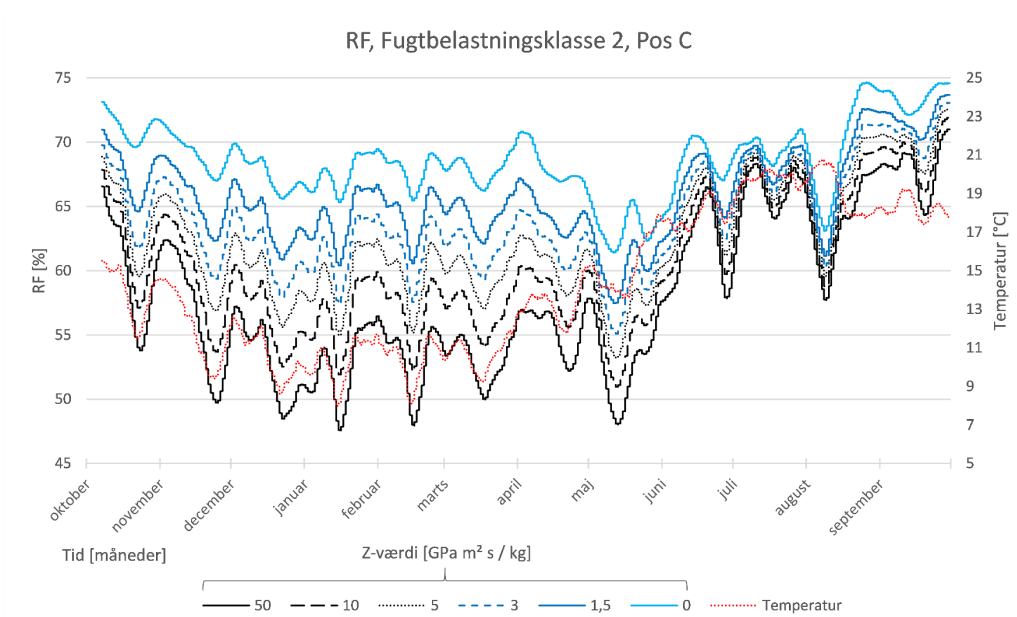
Relativ fugtighed													
Z-værdi	Oktober	November	December	Januar	Februar	Marts	April	Maj	Juni	Juli	August	September	
0	76	76	74	73	73	74	71	70	66	70	69	76	
1,5	72	71	68	66	66	69	66	66	62	67	66	73	
3	70	68	64	64	63	66	64	65	61	66	64	72	
5	69	66	61	61	59	63	62	64	60	65	63	71	
10	67	64	57	57	55	60	60	63	59	64	62	70	
50	65	61	53	53	50	57	57	61	57	63	61	69	
150	65	60	53	52	49	56	57	61	57	63	61	68	
Temperatur [°C]	13,6	11,1	9,1	7,8	7,5	9,7	12,1	14,5	18,3	19,1	19,3	17,1	
Skimmelgrænse	78,2	79,7	81,4	82,7	83,1	80,8	79,1	77,8	76,4	76,2	76,1	76,8	

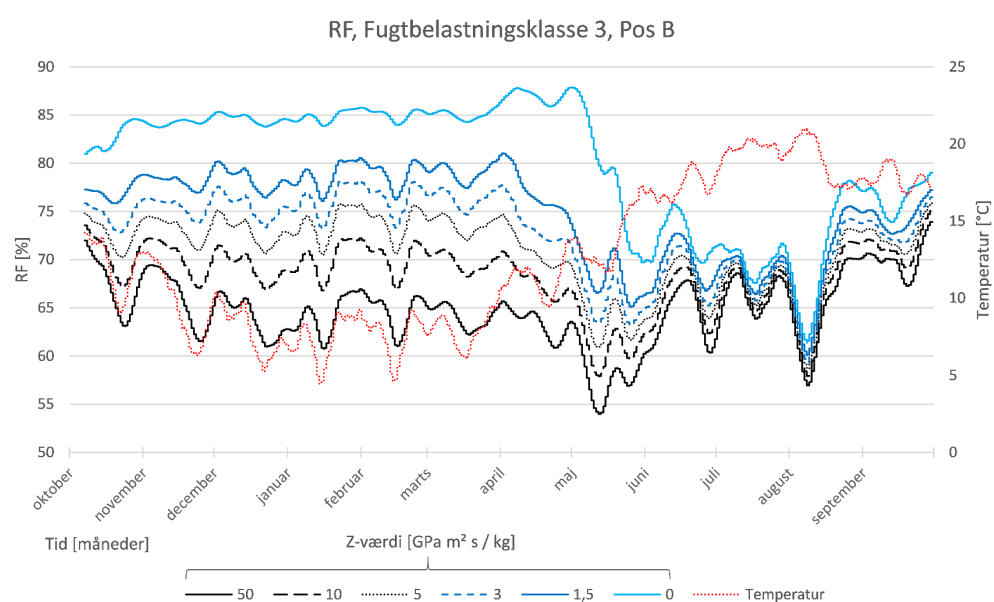
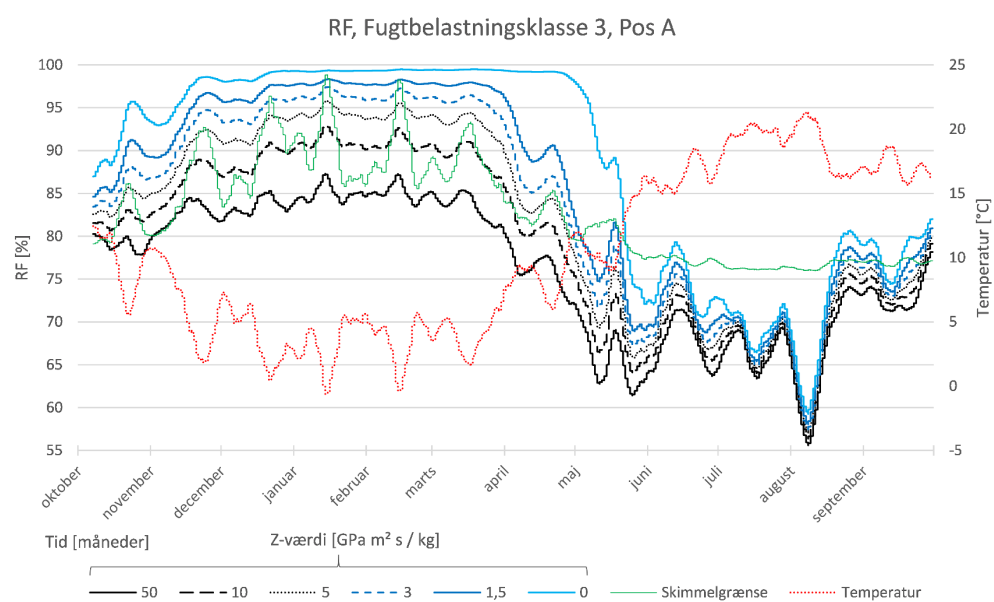
RF, Fugtblastningsklasse 3 - ml. dampsp. og isolering, Pos D

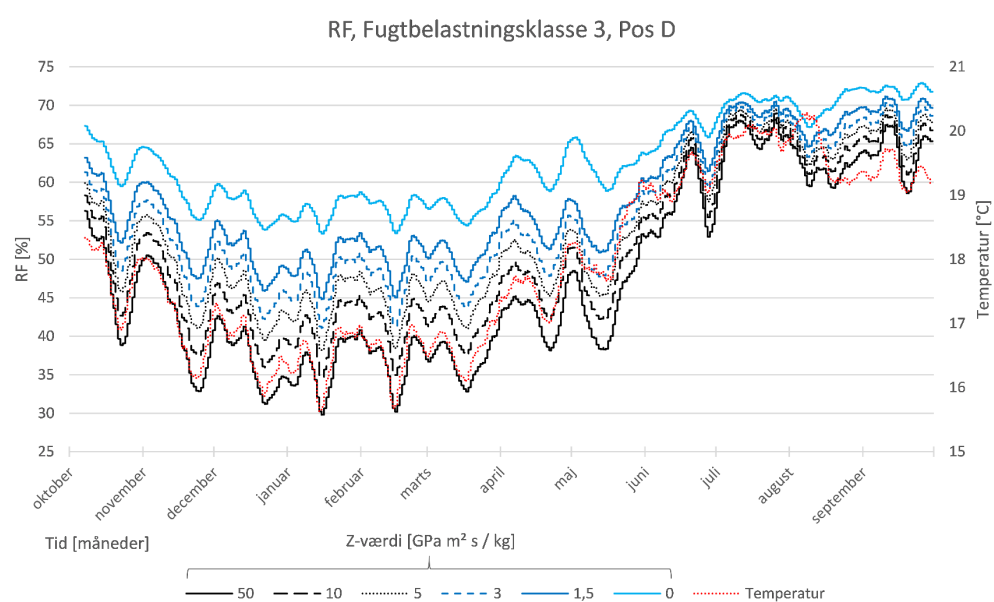
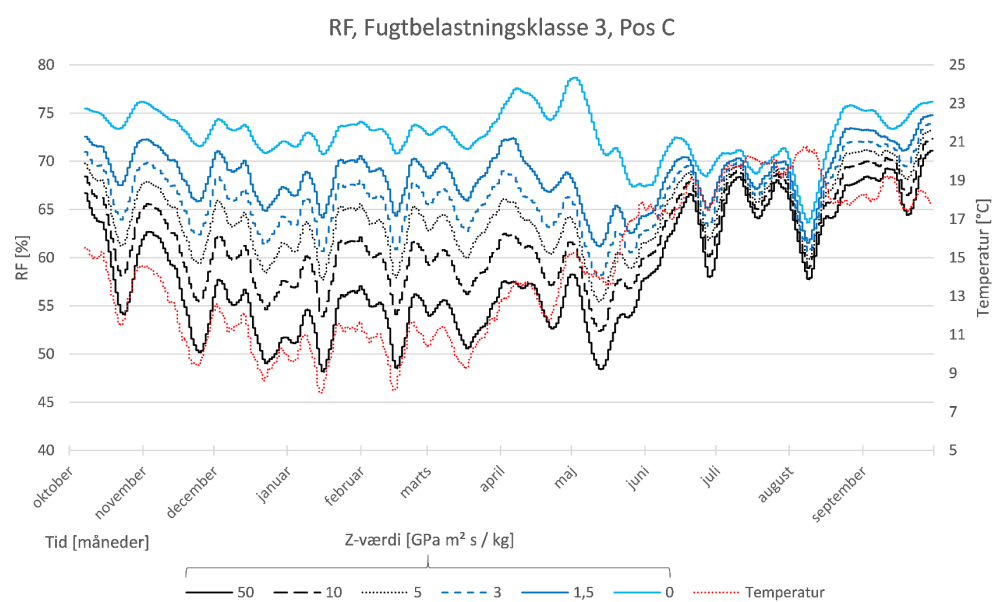
Relativ fugtighed													
Z-værdi	Oktober	November	December	Januar	Februar	Marts	April	Maj	Juni	Juli	August	September	
0	62	59	55	52	52	55	56	59	60	63	63	65	
1,5	58	53	48	45	44	49	51	55	56	60	59	62	
3	56	50	44	42	41	45	48	53	54	58	57	60	
5	54	47	41	39	38	43	46	52	53	57	56	59	
10	52	45	38	36	34	40	44	50	51	55	54	58	
50	50	42	34	32	30	37	41	49	49	54	52	56	
150	50	41	33	31	29	36	41	48	49	53	52	56	
Temperatur [°C]	17,8	17,0	16,3	15,8	15,7	16,5	17,3	18,1	20,7	21,7	21,7	20,3	
Skimmelgrænse	76,6	76,8	77,1	77,3	77,3	77,0	76,7	76,5	75,8	75,6	75,6	75,9	

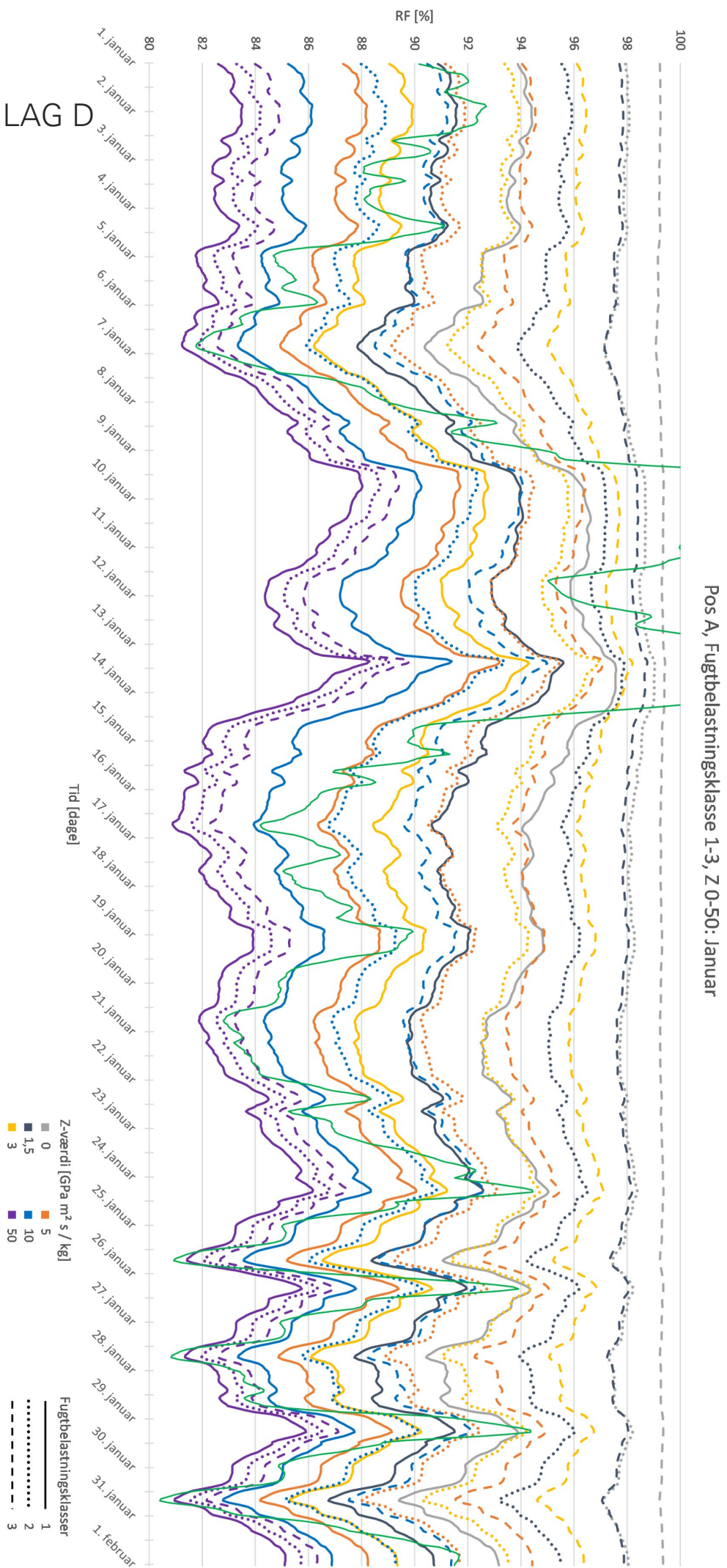
BILAG C





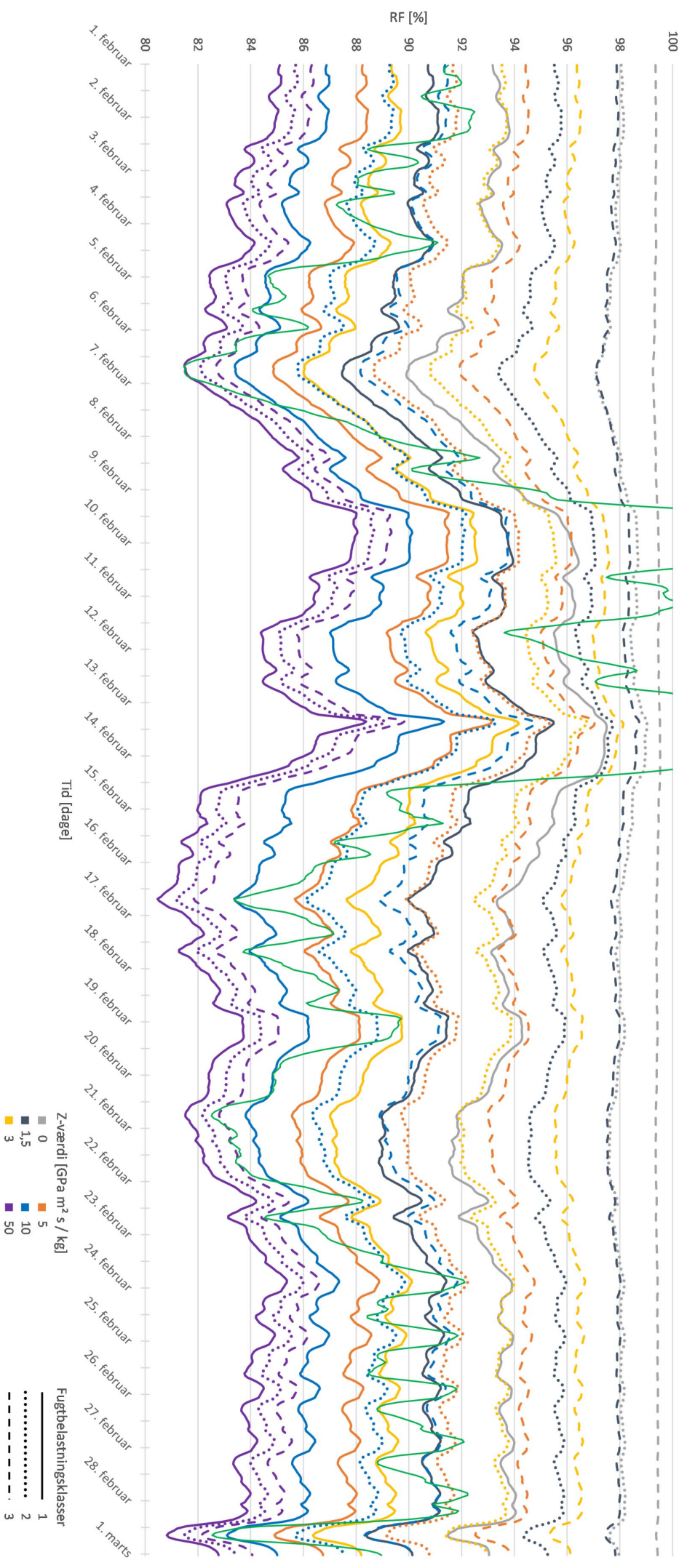




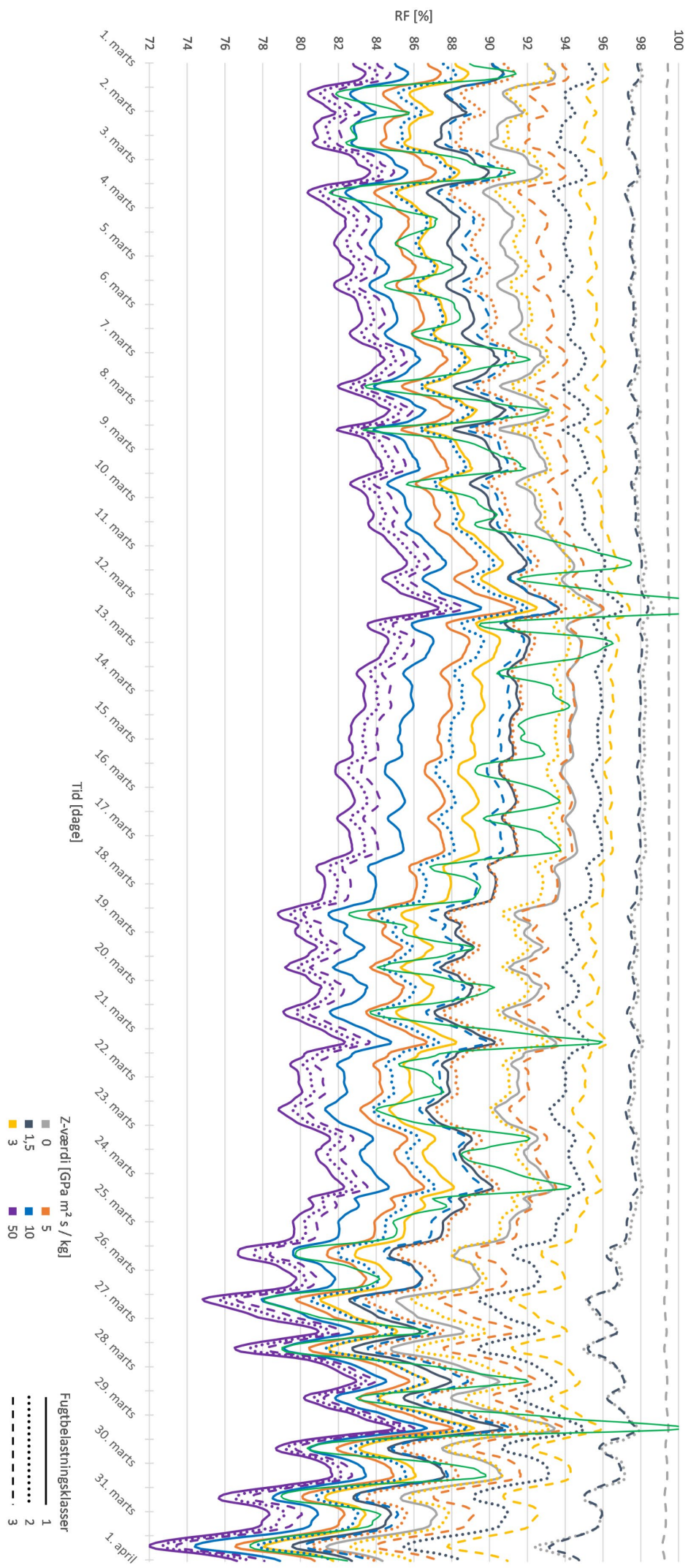


BILAG D

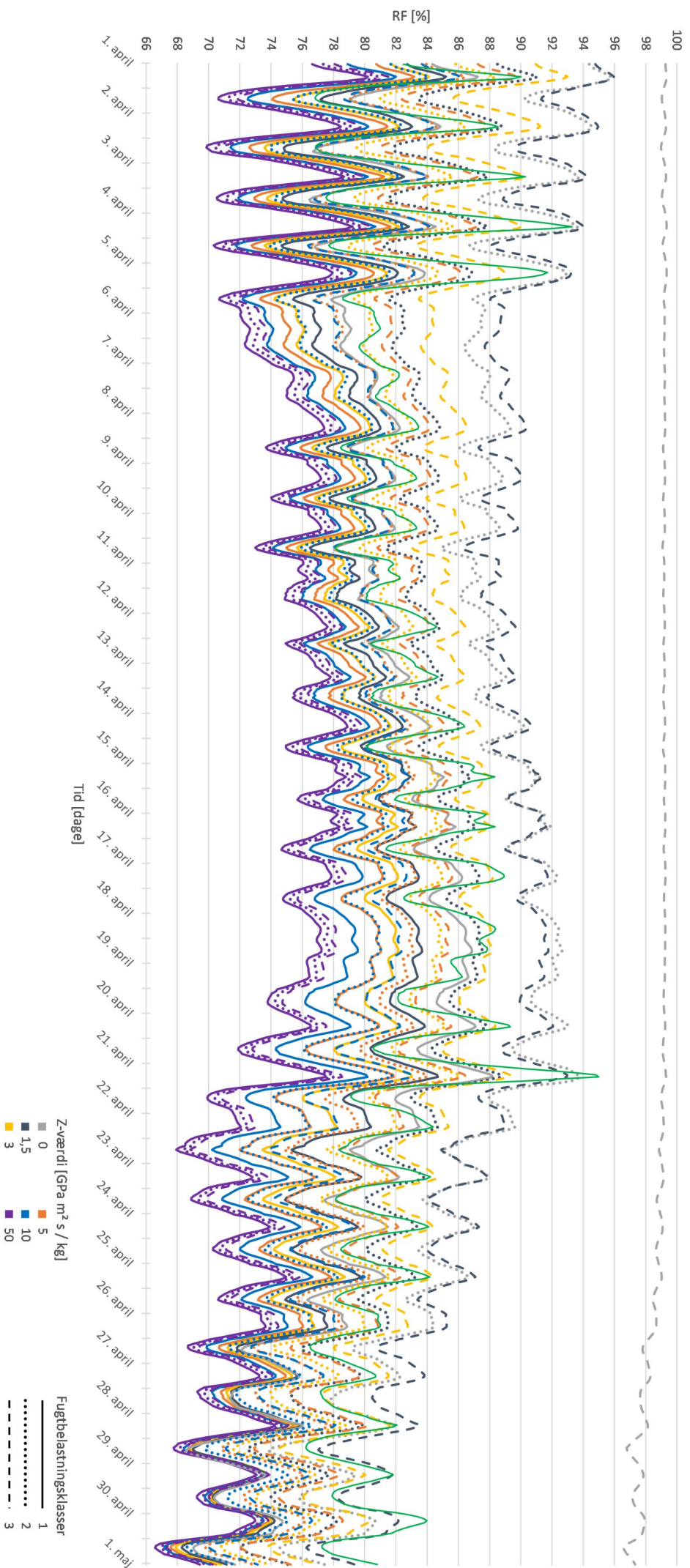
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: Februar



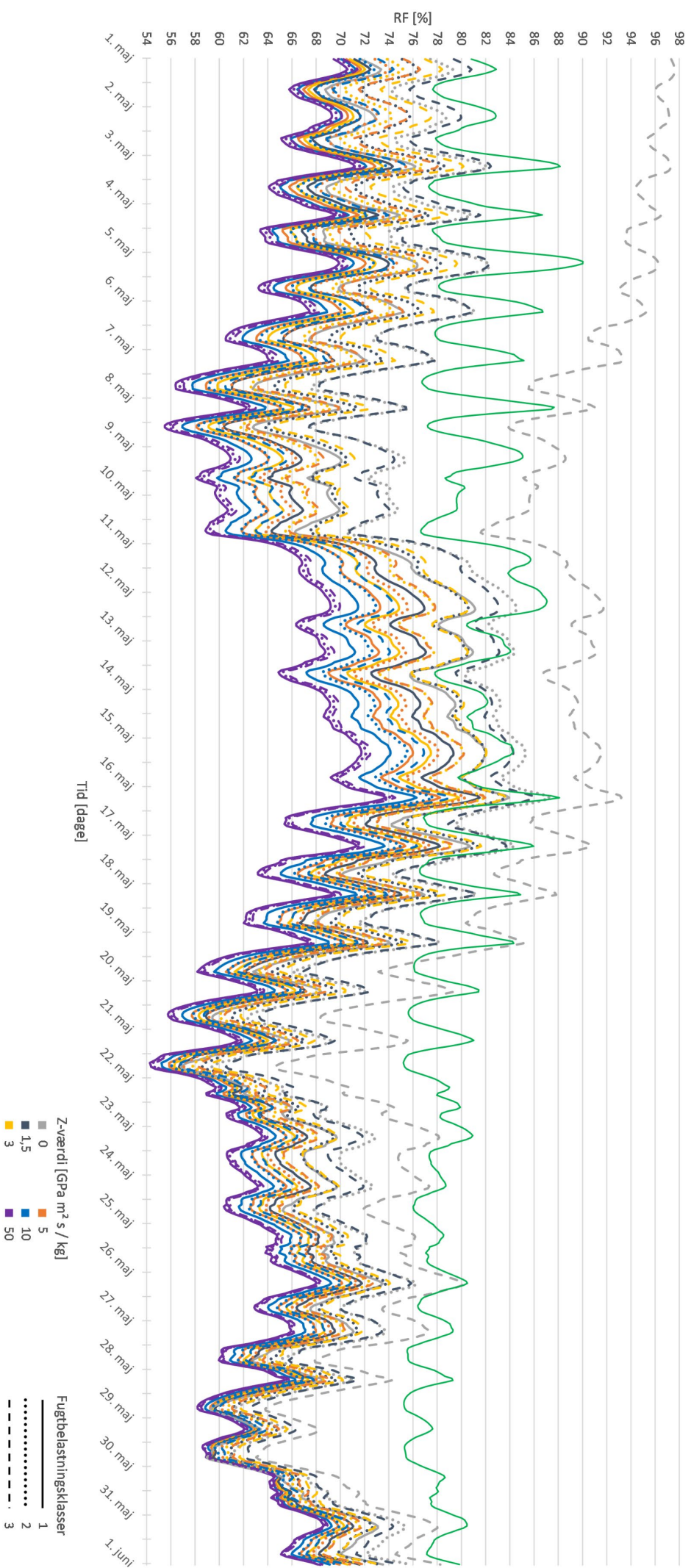
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: Marts



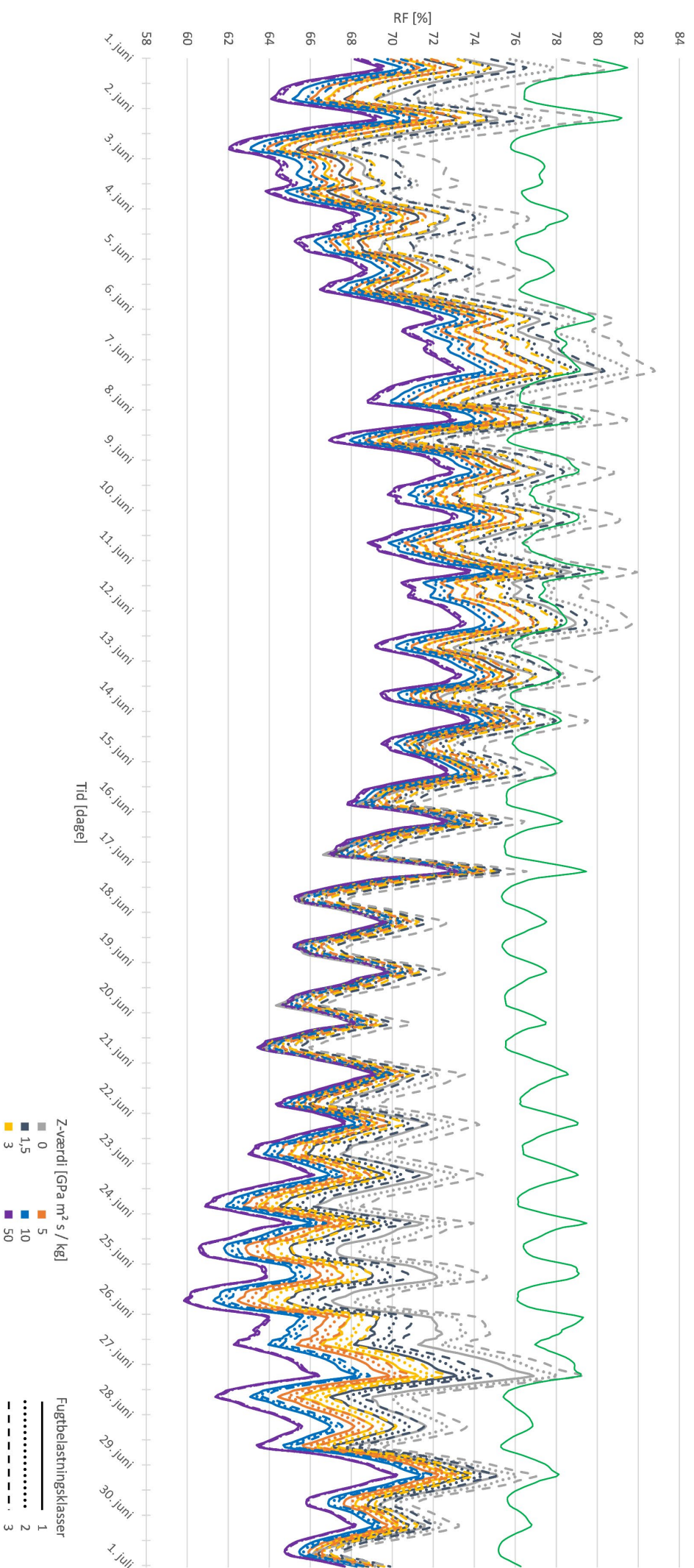
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: April



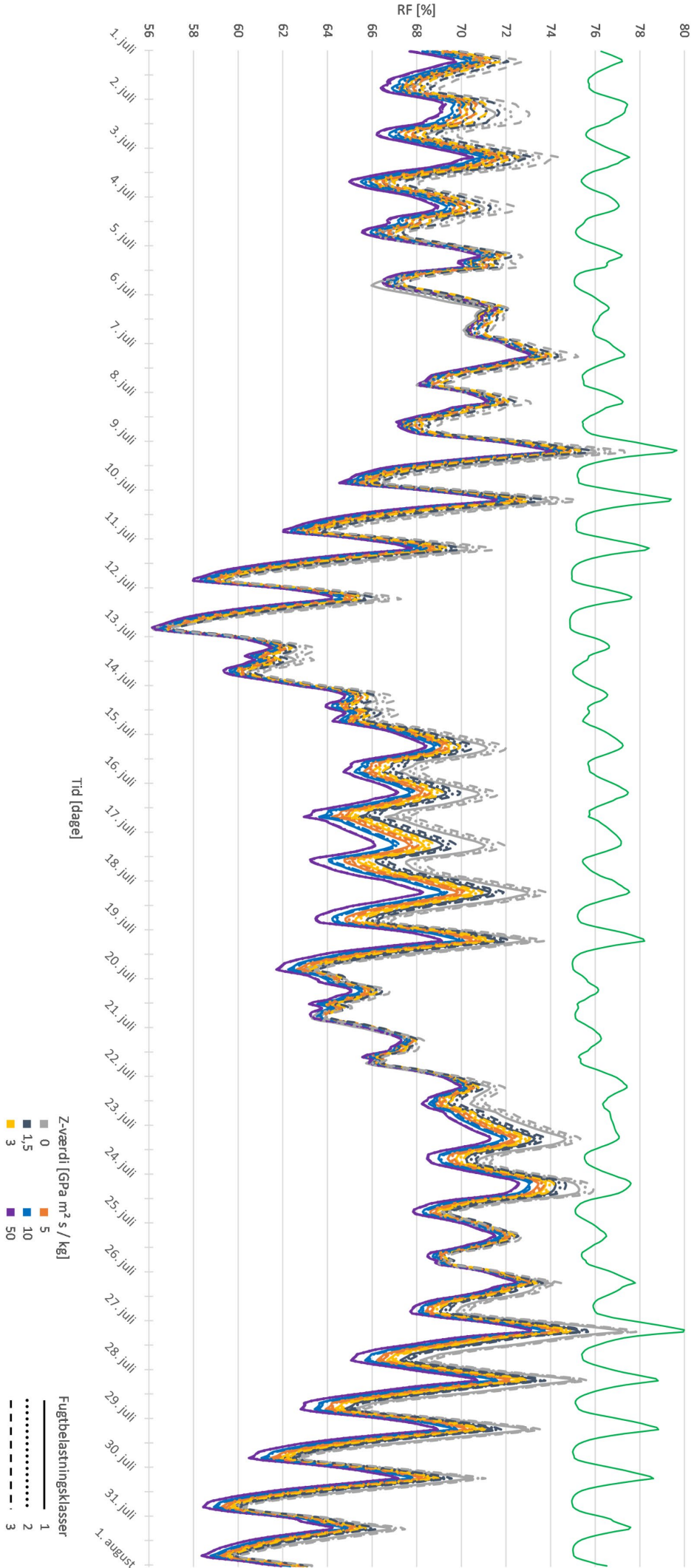
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: Maj



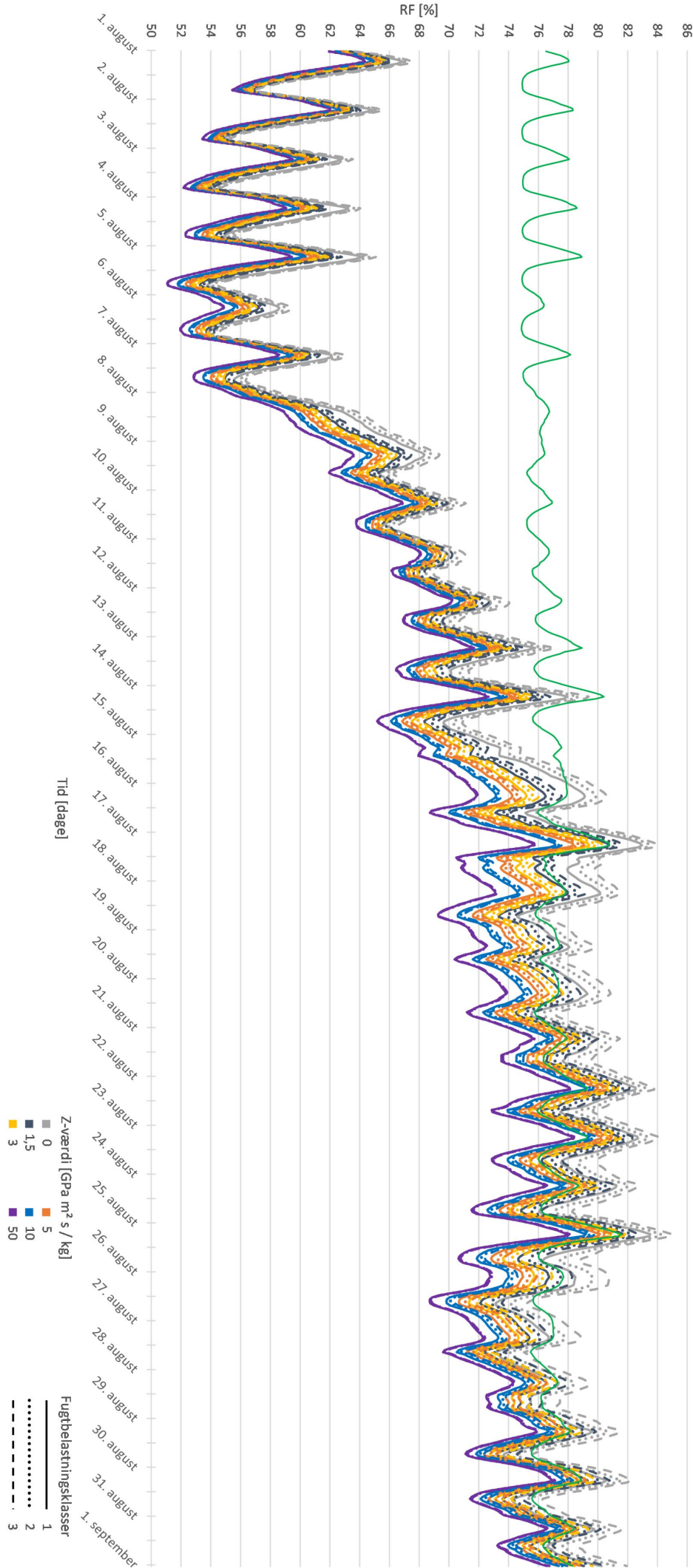
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: Juni



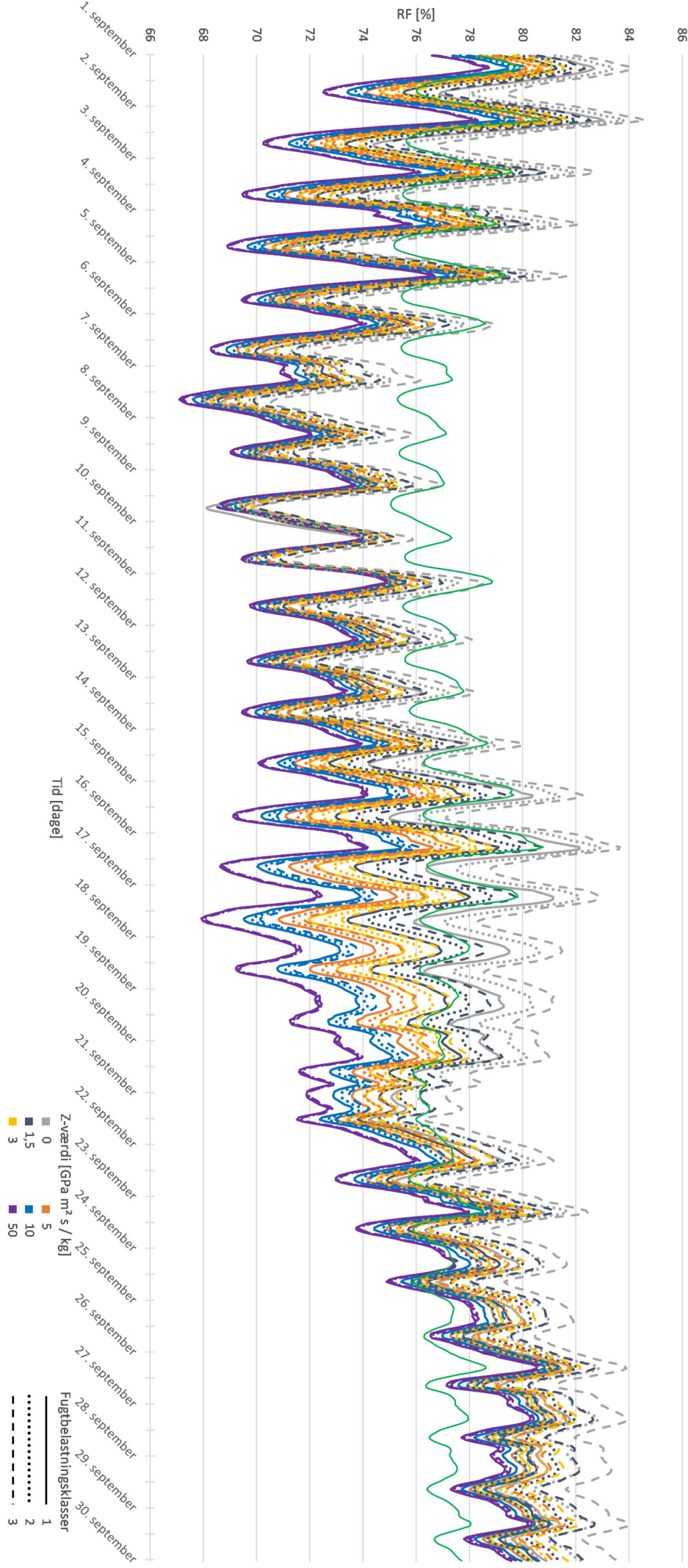
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: Juli



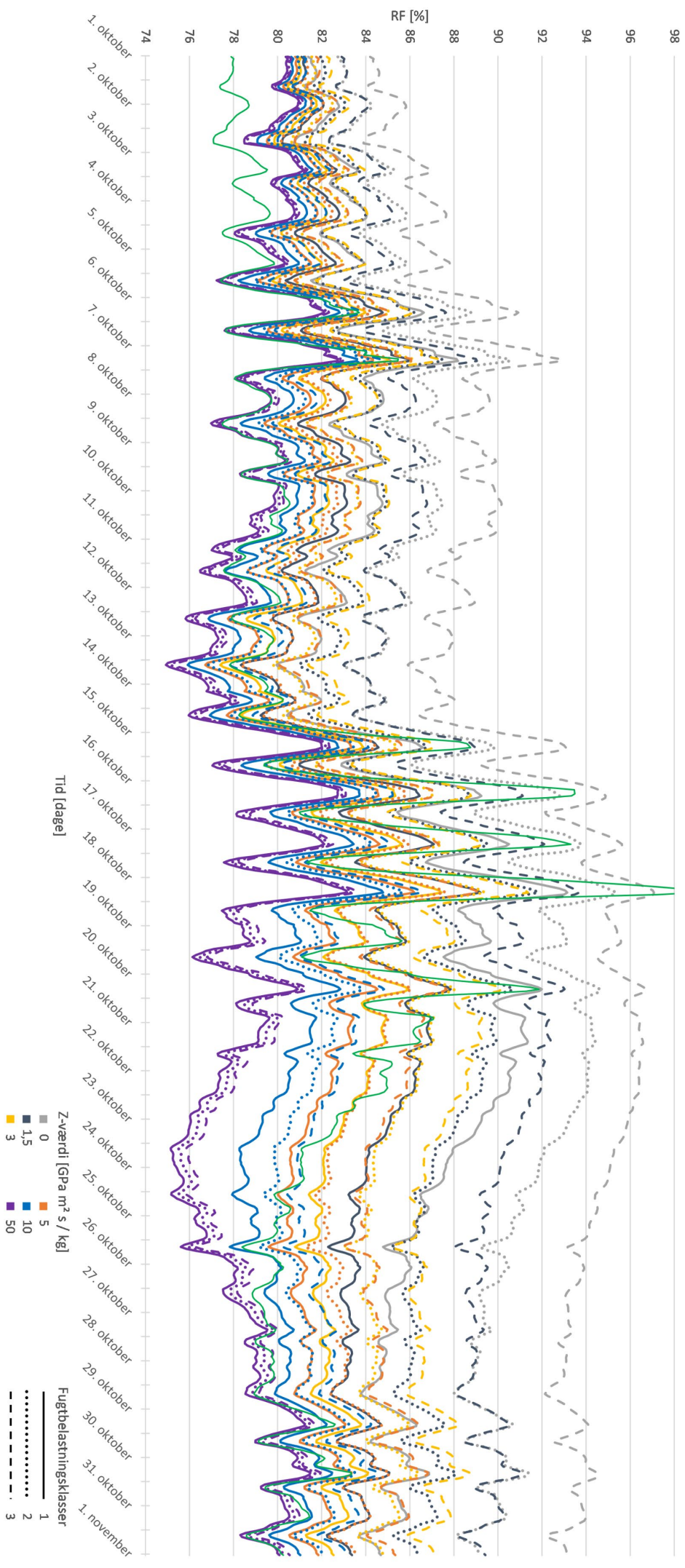
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: August



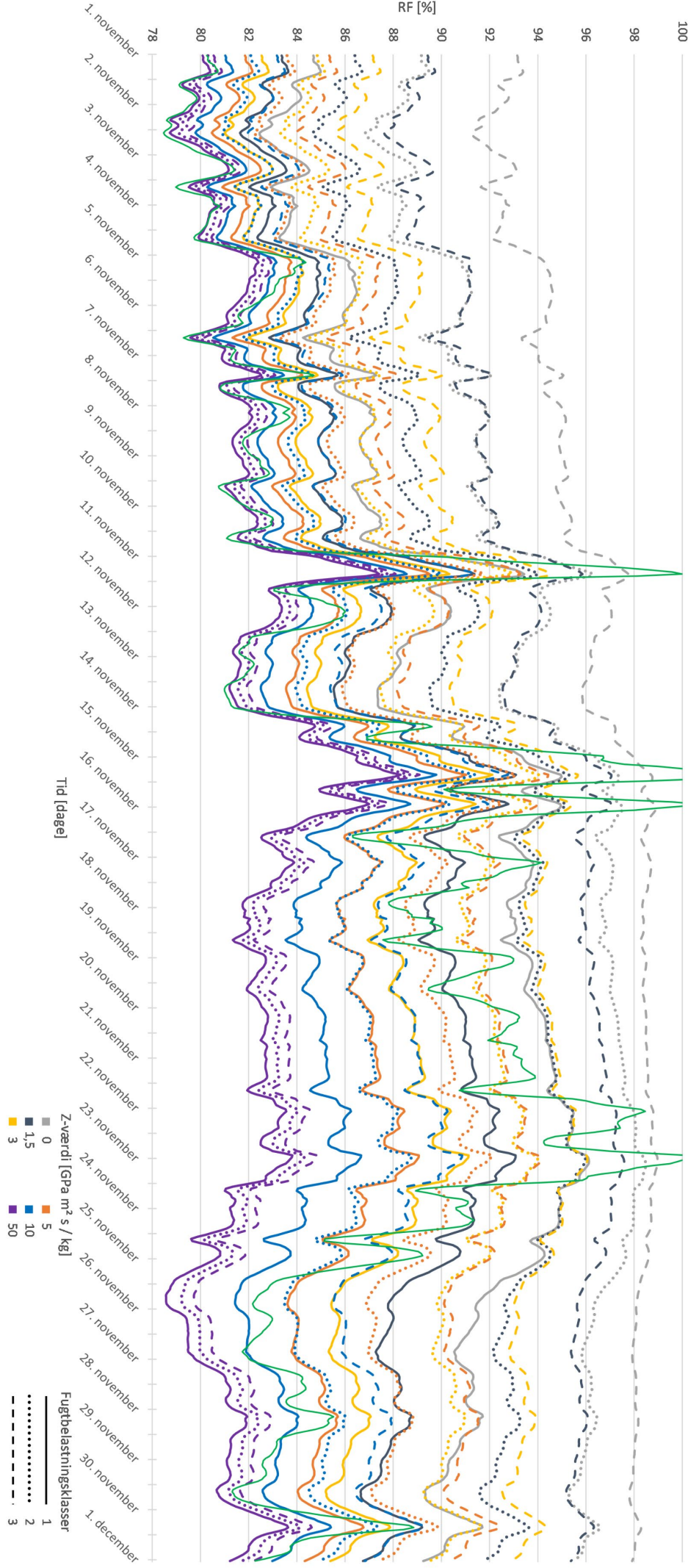
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: September



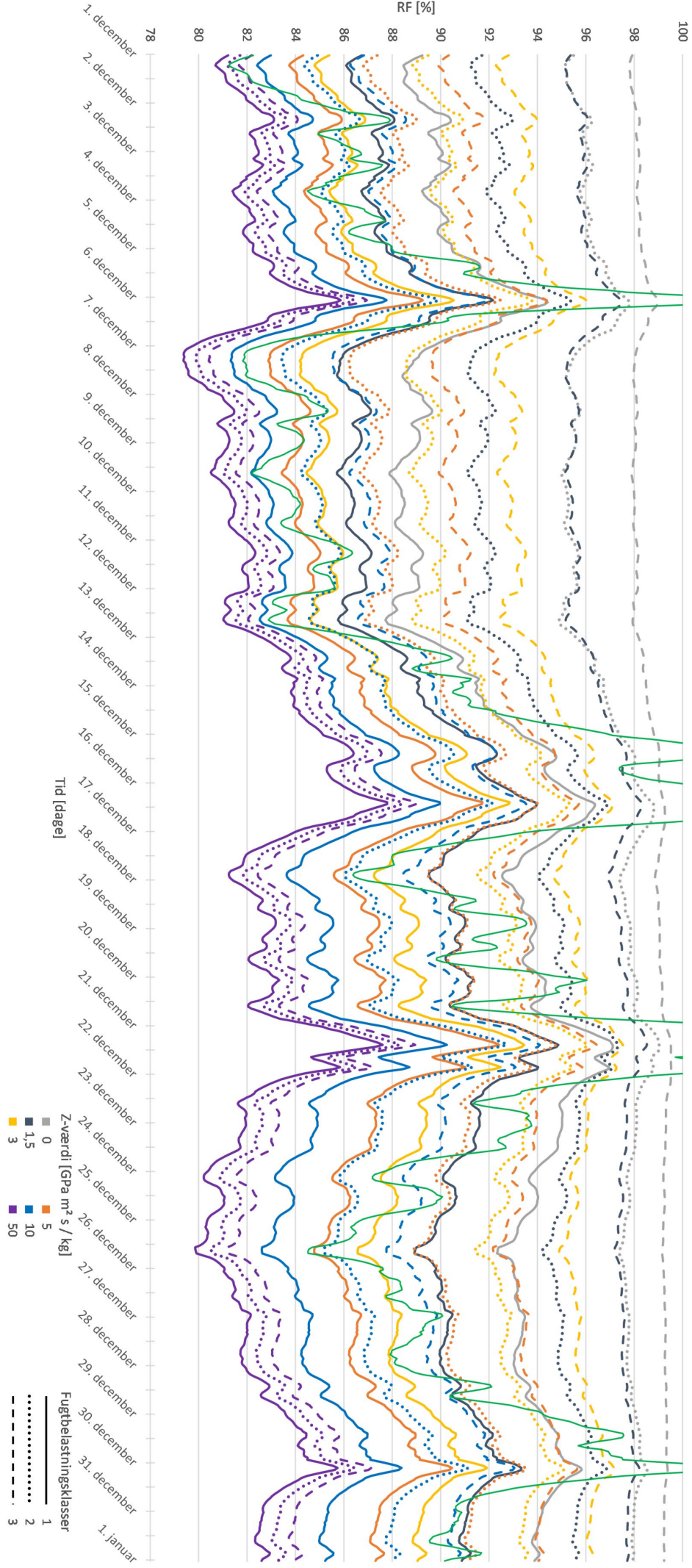
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: Oktober



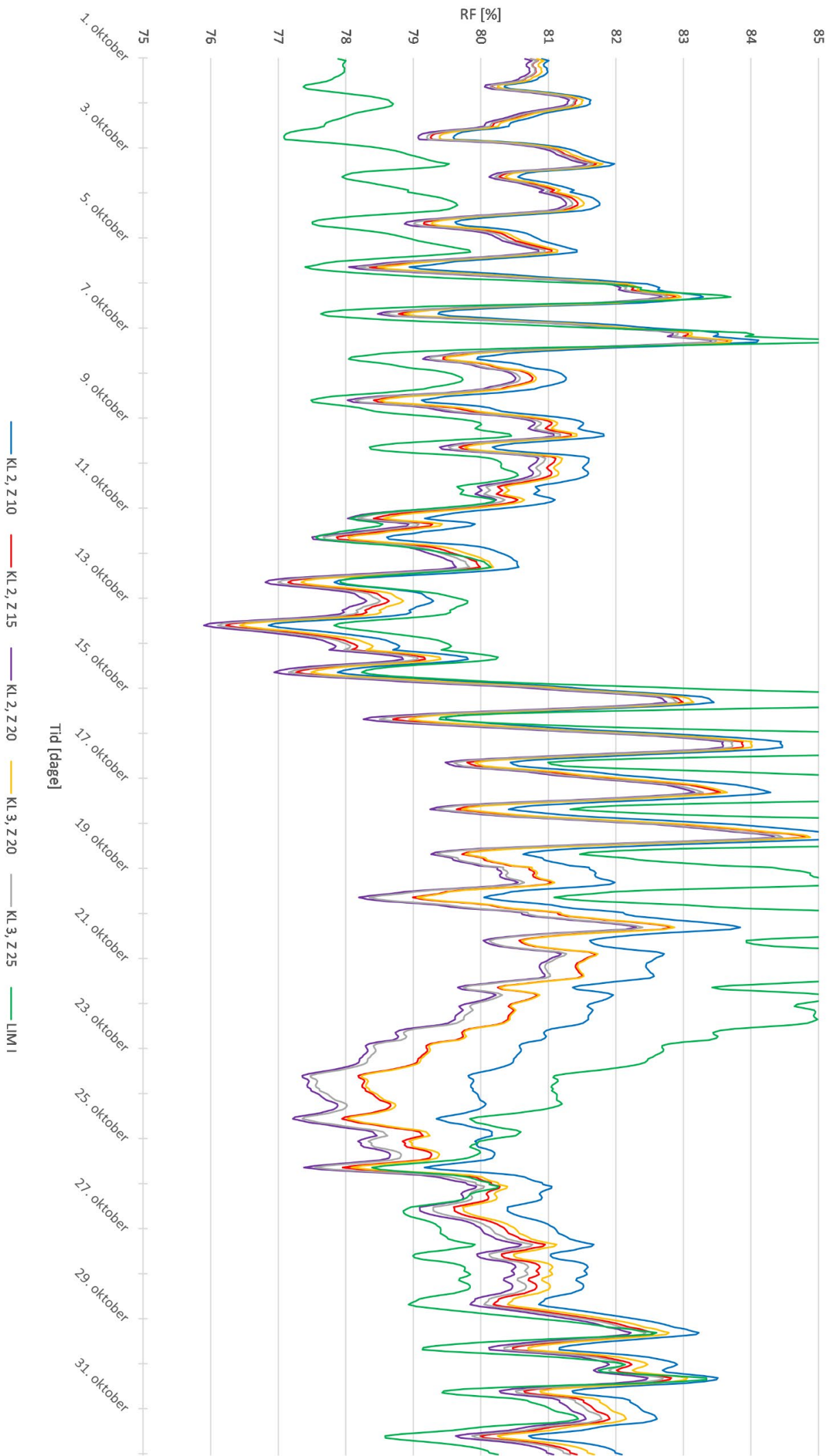
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: November



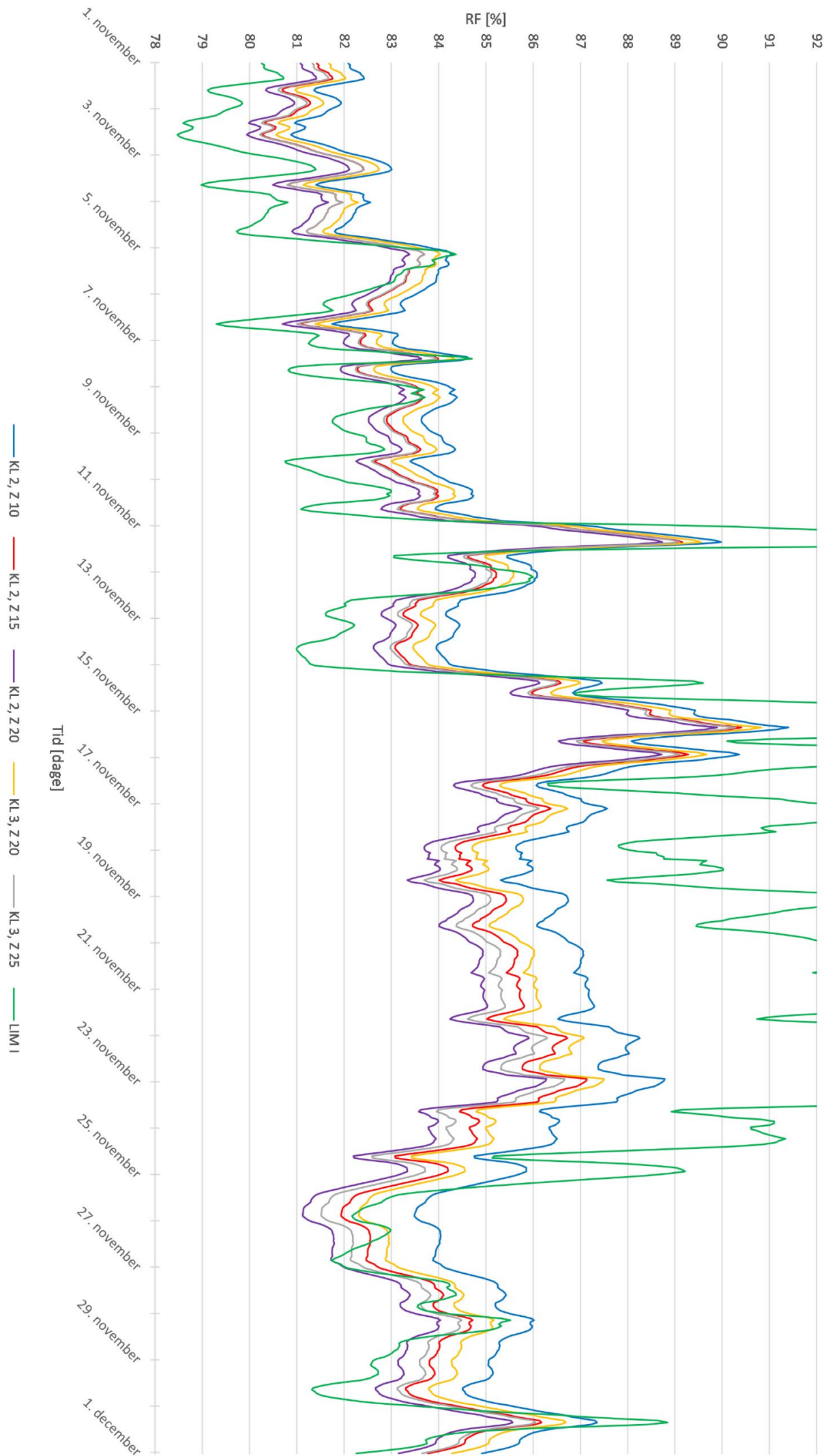
Pos A, Fugtbelastningsklasse 1-3, Z 0-50: December



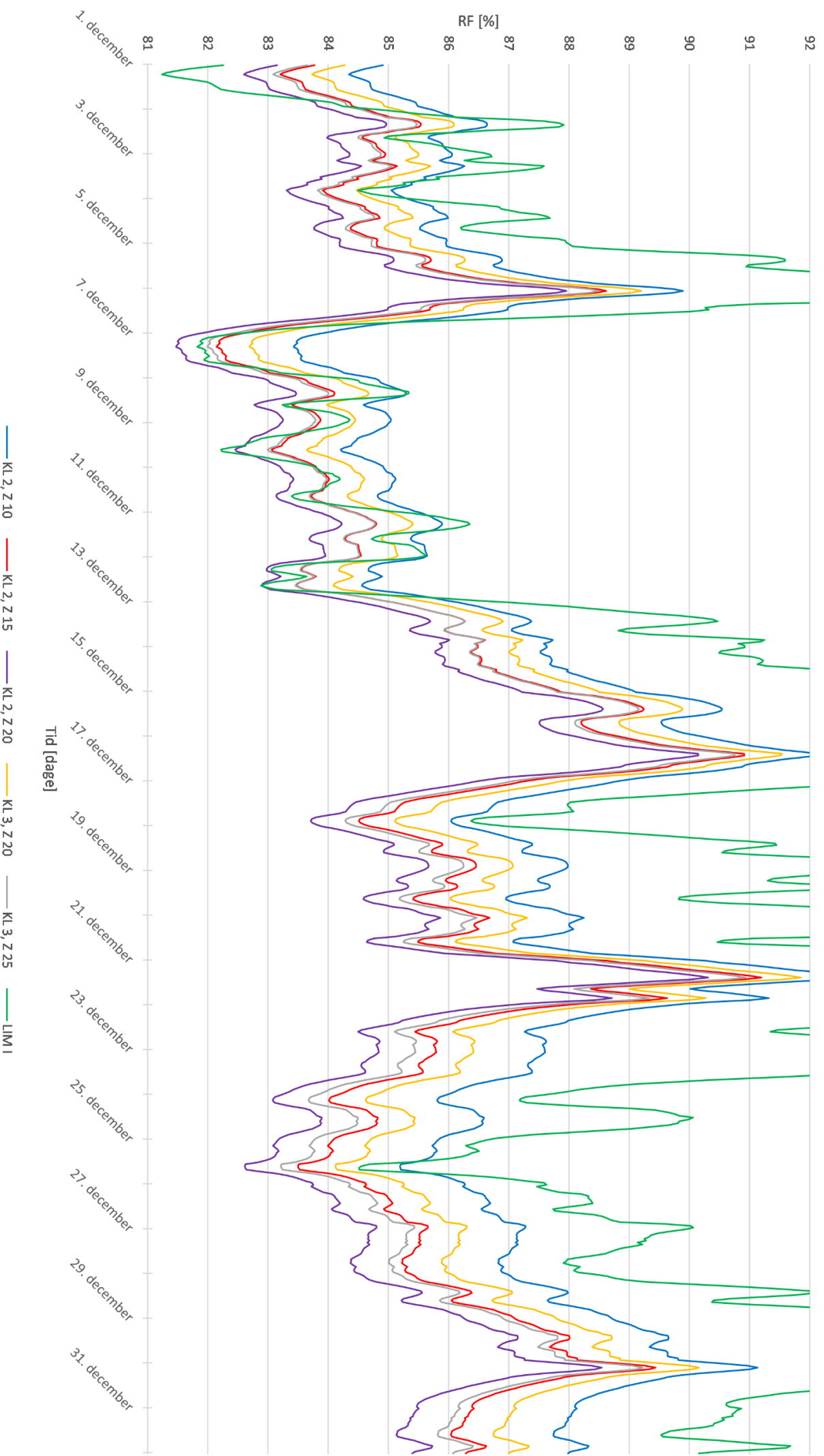
RF bag vindpladen, Oktober



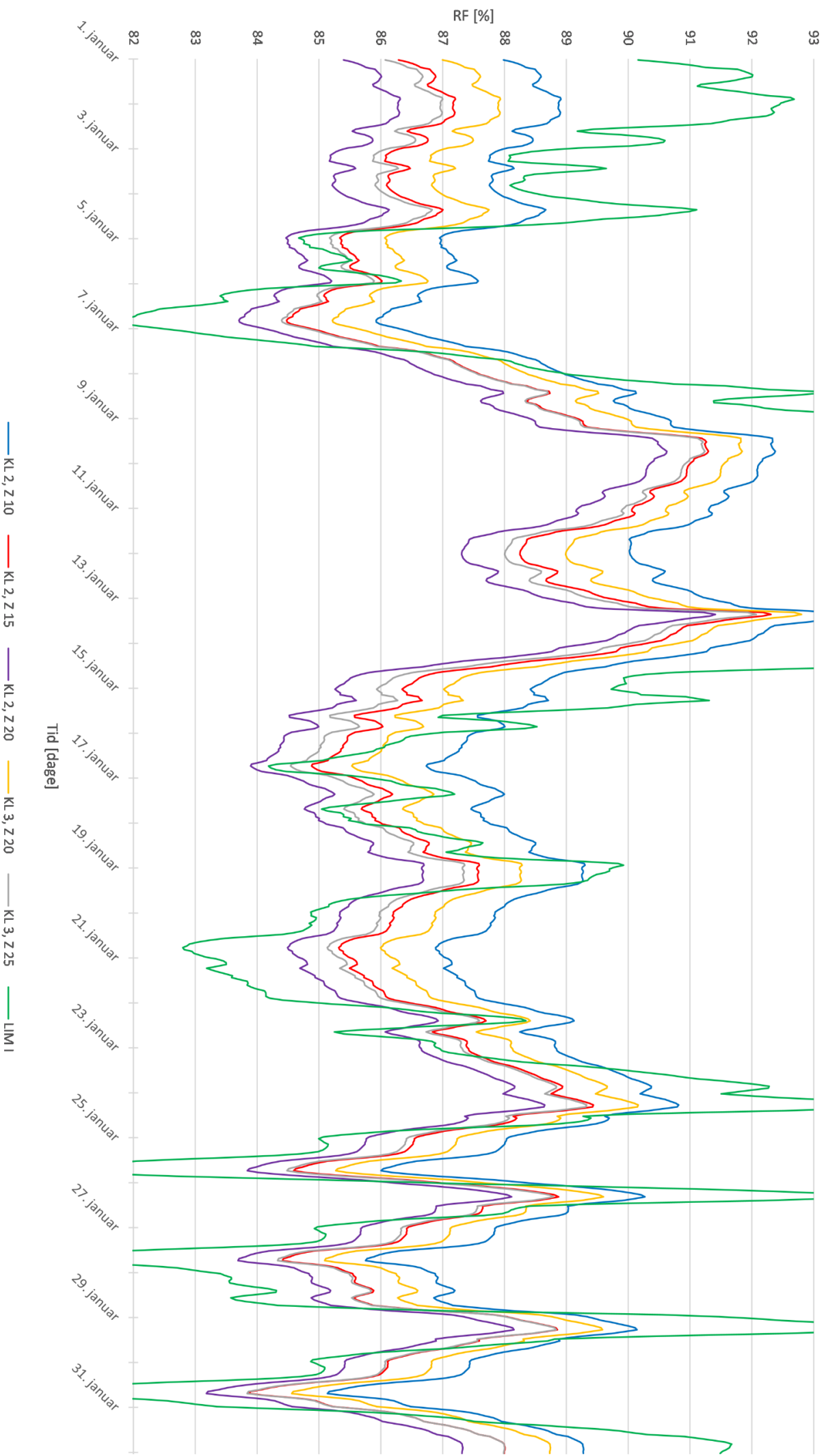
RF bag vindpladen, November



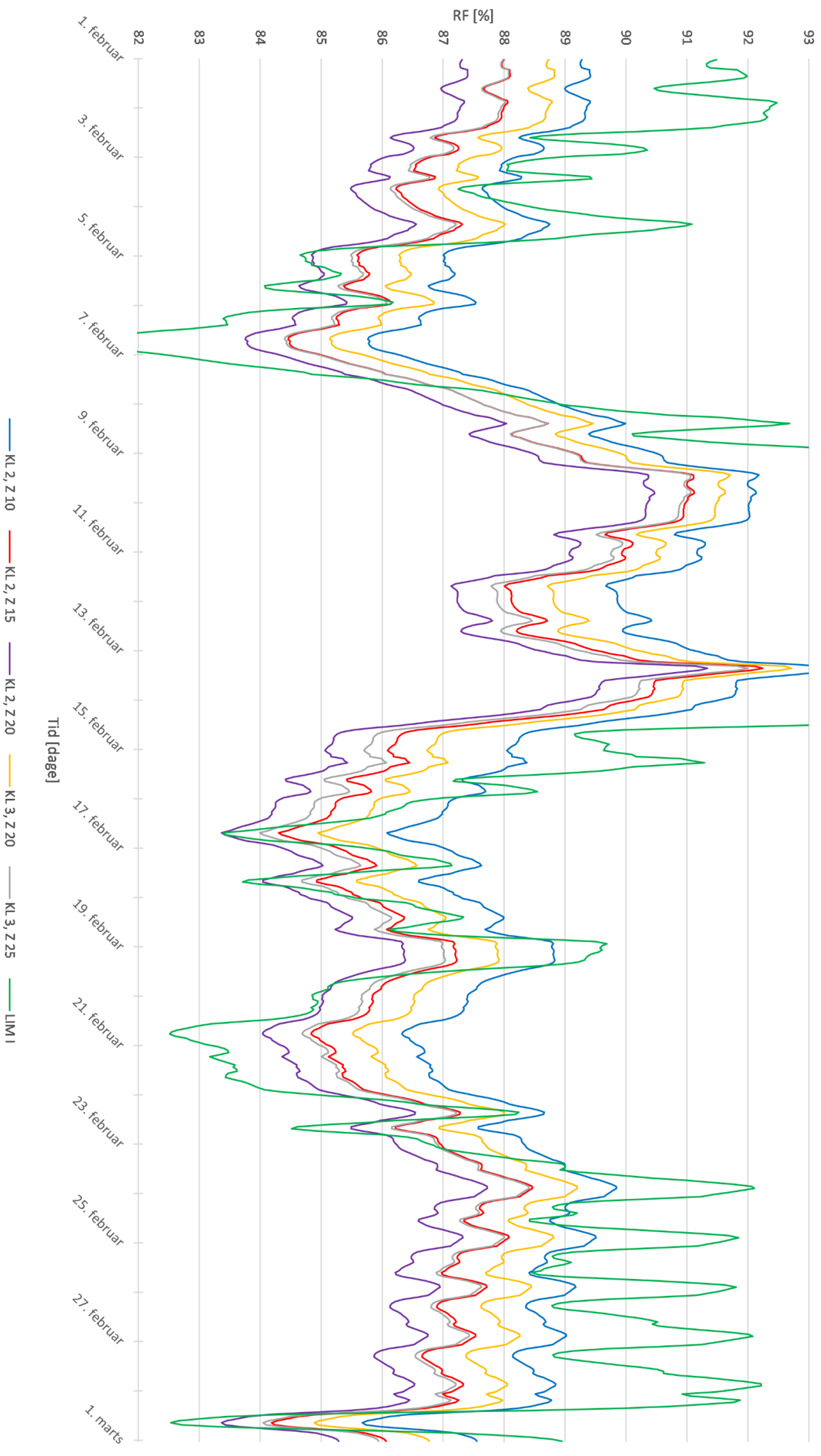
RF bag vindpladen, December



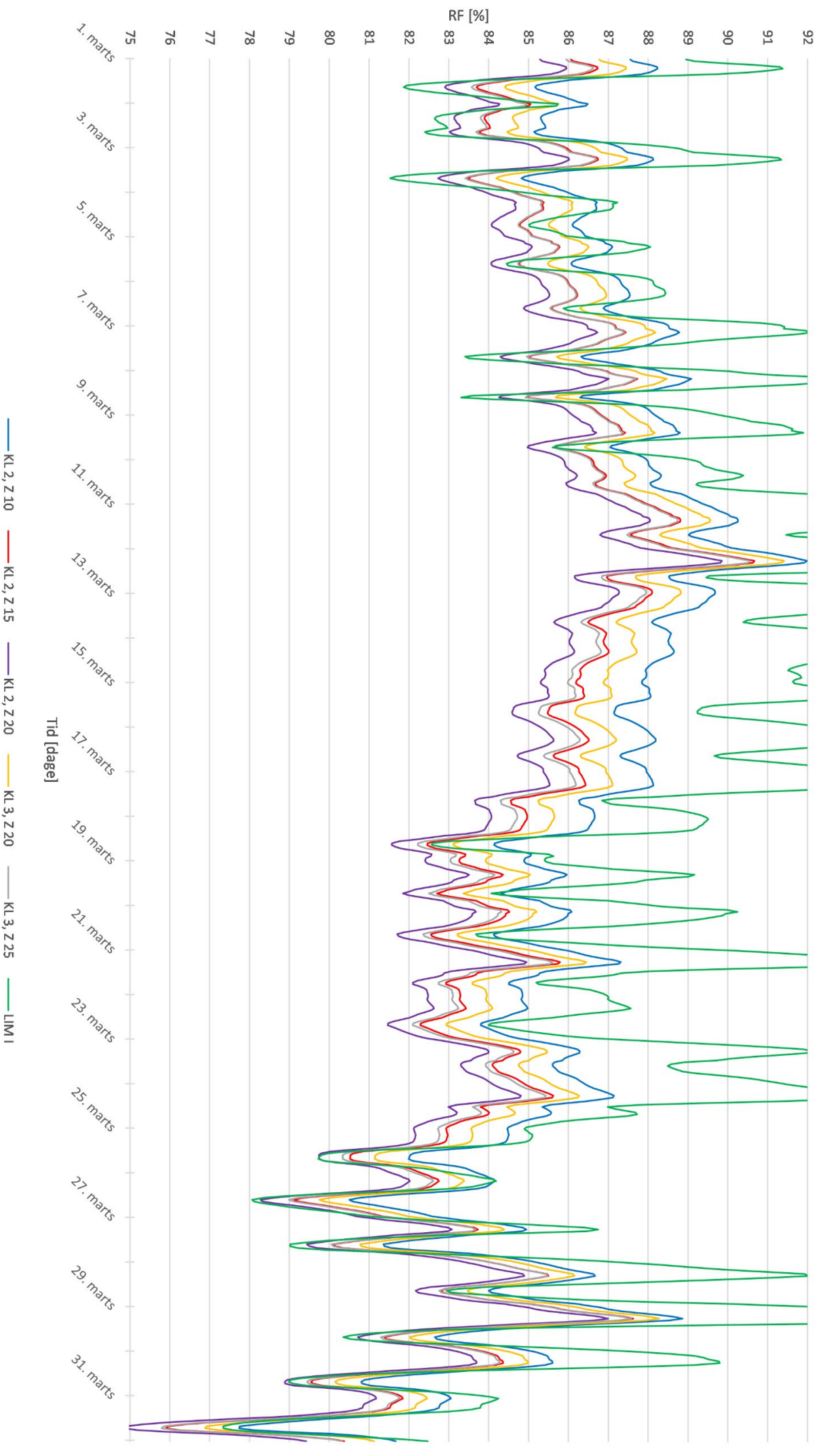
RF bag vindpladen, Januar



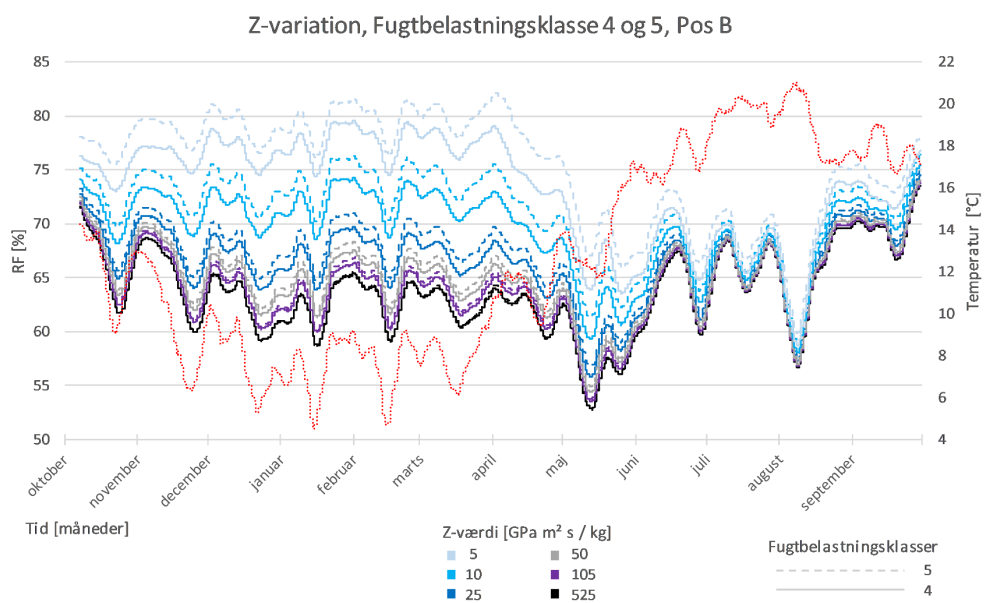
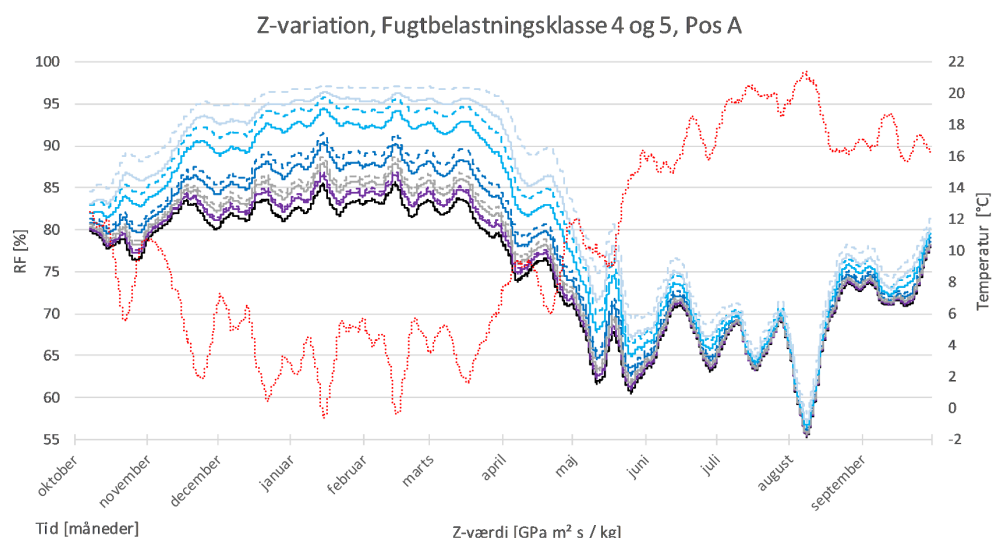
RF bag vindpladen, Februar



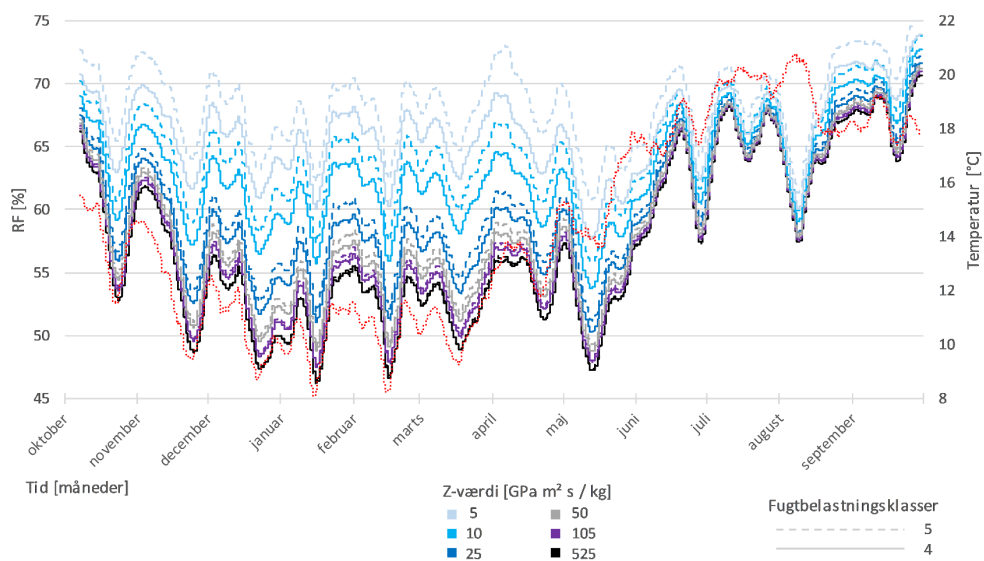
RF bag vindpladen, Marts



BILAG E



Z-variation, Fugtblastningsklasse 4 og 5, Pos C



Z-variation, Fugtblastningsklasse 4 og 5, Pos D

