



BUILD RAPPORT

2023:11

Klimadata til fugtsimuleringer

Referenceår

Nickolaj Feldt Jensen, Tessa Kvist Hansen, Martin Morelli, Anne Marie Svane & Rasmus Waagepetersen

Klimadata til fugtsimuleringer

Referenceår

Nickolaj Feldt Jensen
Tessa Kvist Hansen
Martin Morelli
Anne Marie Svane
Rasmus Waagepetersen

BUILD, Aalborg Universitet
2023

TITEL	Klimadata til fugtsimuleringer
UNDERTITEL	Referenceår
SERIETITEL	BUILD rapport 2023:11
FORMAT	Digital
UDGIVELSEÅR	2023
UDGIVET DIGITALT	Juni 2023
FORFATTER	Nickolaj Feldt Jensen, Tessa Kvist Hansen, Martin Morelli, Anne Marie Svane & Rasmus Waagepetersen
SPROG	Dansk
SIDETAL	86
LITTERATURHENVISNINGER	Side 82-85
EMNEORD	Klimadata, fugtreference år, hygrotermiske simuleringer,
ISBN	978-87-563-2113-6
ISSN	2597-3118
OMSLAGSILLUSTRATION	Phanuwat Nandee
UDGIVER	Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post build@build.aau.dk www.build.aau.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

INDHOLD

FORORD	6
1 INDLEDNING	8
2 LITTERATURSTUDIE	10
2.1 Typer af referenceår	10
2.2 Vægtning af klimaparametre	11
2.3 Opsamling	13
3 DATA – KLIMAPARAMETRE	16
3.1 Simuleringsprogrammer – WUFI og DELPHIN	16
3.2 Klimaparametre – rådata	17
4 BEHANDLING AF KLIMADATA	20
4.1 Metode	20
4.2 Referenceår til fugtsimulering	21
4.3 Sammenligning af klimadata	22
5 SIMULERING MED REFERENCEÅR	36
5.1 Risiko for skimmelsvampevækst	36
5.2 WUFI simuleringer – typiske konstruktioner	37
5.3 DELPHIN simuleringer – sammenligning med måledata	50
6 KONKLUSION	76
7 REFERENCER	80

FORORD

Bygningsreglementet foreskriver, at bygninger skal konstrueres og udføres så fugtskader undgås fx skimmelvækst. Bygningers konstruktioner påvirkes af fugt fra udeklimaet og indefra af bygningens brug. En måde til at dokumentere, at konstruktioner er projekteret uden risiko for fugtskader, er ved at udføre en simulering af varme- og fugtforholdene i konstruktioner. I Danmark findes der ikke et simuleringsprogram, som skal anvendes til simuleringer, men der anvendes forskellige programmer fx WUFI® Pro og DELPHIN. Disse programmer har ikke danske klimadata, og derfor anvendes nærliggende klimadata fra fx Lund, Sverige eller Bremerhaven, Tyskland.

Denne rapport omhandler udarbejdelse af et referenceår til anvendelse ved varme- og fugtsimuleringer (hygrotermiske simuleringer). Referenceåret er udarbejdet på baggrund af historiske data for perioden 2001-2019 for Sjølsmark, suppleret med nedbørs data fra Holbæk flyveplads, Hillerød SØ, Store Hareskov og Gørløse for perioden 2001-2010. Rapporten er udformet så den dokumenterer grundlaget for referenceåret. Det er hensigten, at referenceåret kan anvendes af projekterende og udførende til at gennemføre fugtsimuleringer og bedømme konstruktioner ud fra danske klimadata.

Rapporten er udarbejdet af post.doc Nickolaj Feldt Jensen, adjunkt Tessa Kvist Hansen og seniorforsker Martin Morelli, fra Institut for Byggeri, By og Miljø og adjunkt Anne Marie Svane og professor Rasmus Waagepetersen fra Institut for Matematiske Fag.

Projektet er muliggjort med økonomisk støtte fra Aase og Ejnar Danielsens Fond. Vi takker for støtten, der har muliggjort udarbejdelse af et referenceår til fugtsimuleringer.

Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet
Sektion for Bygge-, Anlægsteknik og Proces
December 2022

Ruut Peuhkuri
Forskningschef

The background of the page is filled with a pattern of thin, dark blue, wavy lines that create a sense of movement and depth. These lines are arranged in concentric, overlapping curves that flow across the entire page.

1

INDLEDNING

1 INDLEDNING

Fugt er den dominerende faktor i forhold til nedbrydning af materialer og konstruktioner. Det er ikke muligt at holde fugten 100% ude af konstruktioner, da der altid vil være fugttransport fra diffusion, konvektion og/eller kapillarsugning ind i konstruktionen. Desuden er mange byggematerialer hygroskopiske og udveksler fugt med det omgivende klima.

Slagregn er måske den mest betydelige faktor, der påvirker fugtforholdene i bl.a. bygningsfacader og deres holdbarhed (Blocken & Carmeliet, 2004). Det er derfor vigtigt, at referenceår til fugtsimuleringer indeholder data om bl.a. nedbør, vindhastighed og -retning, der kan omsættes til slagregn i hygrotermiske simuleringer.

Der findes metoder til at beregne fugtforhold i konstruktioner under stationære forhold (Glaser metoden) eller dugpunktmetode (DS/EN ISO 13788:2013), men disse kan ikke vurdere længerevarende ydeevne af en konstruktion, der fx optager regn.

Hygrotermiske simuleringer (herefter benævnt fugtsimuleringer) er et stærkt værktøj til at undersøge konstruktioners ydeevne over tid ift. de randbetingelser de udsættes for, fx inde- og udeklima. Fugtsimuleringer er dog ikke bedre end de data, der anvendes i simuleringerne, og den person, der vurderer resultaterne. Til trods herfor er fugtsimuleringer et værktøj, der oftere anvendes ved projektering af konstruktioner, for at se om fugt der måtte trænge ind i konstruktionen udgør en fare for fugtforholdene, fx om der opstår skimmelvækst. Fugtsimuleringer anvendes også til at vurdere forskellige konstruktioner op mod hinanden.

Resultatet af projektet er referenceår til fugtsimulering, og kan downloades på <https://doi.org/10.5278/2a54ca3c-7a1c-4d6c-9933-4c75b7b5435d>. Klimadata er udarbejdet så der findes et referenceår til direkte implementering i WUFI® Pro og DELPHIN, men også så samme referenceår kan konverteres til andre simuleringssystemer. Rapporten er en dokumentation af udarbejdelse af referenceåret. Afsnit 2 er et litteraturstudie om udarbejdelse af referenceår til fugtsimuleringer, afsnit 3 oplister de nødvendige klimaparametre i udeklimaet og i referenceåret. I afsnit 4 er den anvendte metode beskrevet, resultaterne fra udvælgelse af måneder, og hvilke måneder referenceåret er sammenstykket af. Afsnit 5 anvender referenceåret i simuleringer af typiske konstruktioner, som en kontrol af referenceåret.



2

LITTERATURSTUDIE

2 LITTERATURSTUDIE

2.1 Typer af referenceår

Der findes forskellige typer af referenceår, som udarbejdes til forskellige formål. Der er bl.a. Test Reference Year (TRY), Design Reference Year (DRY), og Typical Meteorological Year (TMY), hvor forskellen består i, hvilke parametre der indgår og deres ekstremer. Disse referenceår består af individuelle udvalgte måneder taget ud af en længere måleserie over 10 år, og gerne op til 30 år. Referenceår er tidsserier af metrologiske data, der repræsenterer en given geografisk placering og periode. De består typisk af et sammensat år med flere forskellige klimaparametre fx temperatur, relativ fugtighed, solstråling.

De eksisterende design referenceår for Danmark er primært udarbejdet til brug ved termiske analyser, herunder energiforbrug, indeklima, ydeevne af varmeanlæg og lign. Referenceår benyttes endvidere til simuleringer af bygningers hygrotermiske forhold, herunder de dynamiske temperaturer og fugtforhold, men hidtil har danske referenceår ikke indeholdt data for nedbør. I litteraturen kaldes disse fugtige referenceår under tiden Moisture Reference Year (MRY), eller Hygrothermal Reference Year (HRY).

Referenceår bør baseret på mindst 10 års opsamling af klimadata og gerne mere (DS/EN ISO 15927-4:2006), men dette er ofte meget omkostningstungt. Ved længere perioder af klimadata vil usædvanlige varme og kolde perioder blive udelukket.

Der findes forskellige typer af referenceår, hvor nogle er:

- Middelår
- Near-extreme år
- Multi år – flere sammensatte år.

Der findes ikke en standardiseret metode til udarbejdelse af referenceår til fugtsimuleringer, men der har været forskellige tilgange til at udarbejde referenceår. Vandemeulebroucke et al. (2022) beskriver to overordnede anvendte metoder,

1. Referenceår udarbejdes på baggrund af klimadata, der er udvalgte på baggrund af klimaparametre for en given periode. Referenceåret forholder sig ikke til konstruktion eller nedbrydningsmekanismer, men er et generelt referenceår.
2. Referenceår udvælges på baggrund af nedbrydningsmekanismer på forskellige konstruktioner og materialer fx fryse-tø eller skimmelvækst. Her vil der være flere forskellige referenceår afhængig af nedbrydningsmekanisme og materiale.

Den første metode relaterer sig til opgaver, hvor referenceåret skal være 'one-fits all' tilgang, og kan anvendes mere bredt i fugtsimuleringer, hvor nedbrydningsmekanismer kan være forskelligartede, fx anvendes af praktikere. Den anden metode anbefales især ved akademiske studier, hvor der ofte kan anvendes mere tid på beregning og databehandling.

Et referenceår skal repræsentere et klima, der tillader en korrekt evaluering af den fugtbelastning en klimaskærm udsættes for. Fugtproblemer skyldes ofte en kombination af flere ekstreme vejrforhold.

Siden 1990'erne har flere metoder været udviklet til bestemmelse af referenceår til fugtsimuleringer. Fremgangsmåden af Ali Mohamed & Hens (1992) var baseret på årlig middeltemperatur. Rode (1993) og Geving (1997) foreslog en metode baseret på

fugtindholdet i konstruktioner. Hagentoft og Harderup (1996) foreslog en metode baseret på π -faktoren, som funktion af udtørningspotentialen ved hjælp af (mætning) absolut fugtighed på den yvendige overflade. En lignende metode blev brugt af Kalamees og Vinha (2004) for at vurdere risikoen for kondensation i konstruktionen. Cornick, Djebbar & Dalgliesh (2003) udviklede Moisture Index (MI), som er en funktion af det normaliserede opfugtnings- og udtørningsindeks. Salonvaara et al. (2010) udviklede en metode til udvælgelse af det mest kritiske år ift. fugtydeevne af en konstruktion. Schöner & Zirkelbach (2016) udvalgte måneder i fugtreferenceåret på baggrund af median, minimum og maksimum af klimadata for temperatur og nedbør samt 25% og 75% fraktiler. I metoden af Zhou, derome & Carmeliet (2016a; 2016b) er tre år forudvalgt af et 30-årigt datasæt ved hjælp af Climatic Index (CI). De tre forudvalgte år bruges derefter som randbetingelser for fugtsimuleringer for at udvælge et enkelt år ved hjælp af RHT-indekset (Kumaran, 2002; Mukhopadhyaya, 2002). Nik (2016; 2017) foreslog en metode til at sammenfatte tre referenceår, dvs. et typisk, et ekstremt højt og et ekstremt lavt år.

Libralato et al. (2018) tager udgangspunkt i DS/EN ISO 15927-4 som henvises til DS/EN 15026 ift. udarbejdelse af fugtreferenceår.

Ved gennemgangen af litteraturen fremgår det tydeligt, at der ikke findes en fælles tilgang i udarbejdelse af referenceår til fugtsimuleringer. Dog er der nogle punkter, der går igen:

- Referenceåret bør være baseret på klimadata med en tilstrækkelig længde 10-30 år. Længere perioder betyder, at der i større grad kan tages højde for variationer i klimaet.
- Referenceåret skal være repræsentativt for den givne geografiske placering.
- Brugen af referenceåret skal muliggøre en vurdering af klimaskærmens ydeevne under kritiske fugtforhold. En gentagelsesperiode på 10 år er der bred enighed om. Dermed forventes, at akkumuleret fugt under et ekstremt år kan udtørres i de efterfølgende år. Dette er i tråd med DS/EN 15026, der beskriver udeklimaet til at være en 90% fraktile.

Der er ikke enighed om fugtreferenceåret skal være baseret på udelukkende klimadata eller på nedbrydningsmekanismer. Det betyder også, at det ikke er entydigt hvilke parametre der skal indgå i udarbejdelse af referenceår til fugtsimuleringer.

2.2 Vægtning af klimaparametre

Ved simuleringer af fugtforhold i konstruktioner beskriver DS/EN 15026 at klimafilen skal indeholde nedenstående parametre. Desuden skal parametrene være relevante for den givne problemstilling der undersøges.

- Temperaturen i udeluften
- Damptryk eller andre fugtighedsparametre der kan anvendes til at beregne damptrykket
- Global og diffus solstråling
- Himmeltemperatur
- Vindhastighed og -retning
- Totale atmosfærisk tryk
- Nedbør (regn, sne, finregn).

Udeklimaet kan opdeles i tre grupper (a) lufttemperatur, relativ fugtighed og atmosfærisk tryk, der beskriver udeluftens egenskaber. (b) nedbør på en vandret flade, vindhastighed og -retning, der beskriver omfanget af slagregn. (c) global og diffus stråling og himmeltemperatur, der beskriver omfanget af strålingsudveksling fra solen til himlen.

En del forskning er udført for at undersøge forskellige typer af referenceår til fugtsimuleringer, se afsnit 2.1, *Typer af referenceår*. Nærværende afsnit vil se hvilke parametre der typisk er anvendt til udarbejdelse af referenceår.

TABEL 1. Oversigt over væsentlige parametre anvendt til udarbejdelse af fugtreferenceår i forskellige videnskabelig kilder.

Reference	Temperatur	Relativ fugtighed	Solstråling	Vindhastighed	Vindretning	Nedbør	Orientering	Bemærkning ¹
DS/EN ISO 15927-4	X	X	X	X				Klima
Kalamees & Vinha (2004)	X	X						Klima
Cornick, Djebbar & Dalgliesh (2003)	X	X				X		Klima
Cornick & Dalgliesh (2003)	X	X		X	X	X		Klima
Nik (2017)	X		X			X		Klima
Das & Sarkar (2020)	X	X	X	X		X		Klima
Schöner & Zirkelbach (2016)	X					X		Klima
Libralato et al. (2018) ³	X	X	X	X		X		Klima
Libralato et al. (2019)	X	X	X	X		X ⁴		Klima
Rode (1993)							X	Konstruktion
Zhou, Derome & Carmeliet (2016a; 2016b)	X	X	X	X	X	X	X	Konstruktion
Salonvaara et al. (2010)	X	X	X ²	X	X	X	X	Konstruktion

¹ Klima/konstruktion angiver om referenceåret er baseret udelukkende på klimadata eller konstruktionernes fugtforhold.

² Solstråling på vægoverflade og skydække var også anvendt.

³ Angivelser er baseret på konklusion af studie, da både horisontal regn og slagregn er inkluderet i studiet.

⁴ I vurdering inkluderes også længde af nedbørsperioder.

I de tilfælde hvor referenceåret anvender nedbør på et vandret plan i stedet for at slagregn, hvor der også tages højde for vindretning og -hastighed, vil referenceåret være uafhængigt af bygning og konstruktionstype (Cornick, Djebbar & Dalgliesh (2003)).

Nik (2016; 2017) foreslår en metode til at sammenfatte tre referenceår, dvs. et typisk, et ekstremt højt og et ekstremt lavt år. Metoden var baseret på TMY, og brugte lufttemperatur, sol-luft temperatur eller nedbør som parameter. Sol-luft temperatur er en værdi, der repræsenterer udetemperaturen, mens de kombinerede effekter af konvektion, langbølget stråling, solstråling (kortbølget) og latent varmeoverførsel tages i betragtning.

Libralato et al. (2018) nævner at typiske parametre jf. DS 15927-4 er temperatur, relativ fugtighed, stråling og vindhastighed. Libralato et al. (2018) udvider metoden til også at inkludere normal regn (falder lodret) og slagregn (inkluderer vindretning og -hastighed). For 34 kombinationer af referenceår udføres simuleringer, og det konkluderes, at differentieret ift. orientering ikke fører til mere repræsentative fugtreferenceår. Libralato et al. (2018) foreslår at anvende metoden beskrevet i DS/EN ISO 15927-4 til udarbejdelse af fugtreferenceår, når der kun ønskes et enkelt referenceår.

Zhou, Derome & Carmeliet (2016b) anvender et Climate Index, der omfatter opfugtning og udtørring, hvor opfugtning baseres på årlig slagregn og udtørring på årlige potentiel fordampning. Zhou, Derome & Carmeliet (2016a) uddyber, at slagregn er vigtigste parameter for opfugtning og afhænger af konstruktionens orientering, nedbørs intensitet, vindhastighed, vindretning, placering på væggen og byrummet. Hvorimod udtørringen er afhængig af lufttemperatur, luftfugtighed, vindhastighed, tilgængelig vand og tilførsel af varme fra f.eks. solstråling.

For at kunne regne på fugtforholdene i konstruktioner skal der først regnes på de termiske forhold. Derfor vurderes det umiddelbart som udgangspunkt at temperatur eller solstråling er væsentlige parametre for termiske beregninger. For fugtberegninger vurderes det umiddelbart at være nedbør, vindretning, vindhastighed.

2.3 Opsamling

Der tages udgangspunkt i et referenceår hvor 'one-fits all', da referenceåret skal bruges af rådgivere og udførende. De kender sjældent til eller har økonomiske overskud til at undersøge hver enkelt nedbrydningsmekanisme med et nyt referenceår. Desuden er arbejdet første skridt i at få generet et referenceår til fugtsimuleringer for Danmark. I den sammenhæng bør det nævnes, at et referenceår for Danmark måske ikke er tilstrækkeligt, og det bør undersøges om Danmark kan/skal inddeles i zoner eller der på anden vis kan etableres referenceår, der kan anvendes til fugtsimuleringer.

På baggrund af den læste litteratur og projektets begrænsede økonomi, er det besluttet at anvende metode beskrevet i DS/EN ISO 15927-4:2006 *Bygningers hygrotermiske ydeevne – Beregning og præsentation af klimadata – Del 4: Timeværdier til bestemmelse af det årlige energibehov til opvarmning og køling*. Metoden beskrevet i standarden egner sig til vurderingen af gennemsnitlige år, og ikke til udarbejdelse af (delvis) ekstrem-år (DS/EN ISO 15927-4:2006). Afsnit 5.2 og 5.3 i standarden beskriver fremgangsmåden for analyse af rådata og udvælgelse af måneder.

I tilfælde af manglende værdier, pludselige eller unaturlige spring skal værdier tilpasses ved lineær interpolations (DS/EN ISO 15927-4:2006, afsnit 4).

The background of the page is filled with a pattern of thin, dark blue, wavy lines that create a sense of movement and depth. These lines are arranged in concentric, slightly irregular curves that flow across the entire page.

3

DATA – KLIMAPARAMETRE

3 DATA – KLIMAPARAMETRE

3.1 Simuleringsprogrammer – WUFI og DELPHIN

I TABEL 2 præsenteres de randbetingelser der benyttes til hygrotermiske simuleringer i de to fugtsimuleringsprogrammer, hhv. WUFI® Pro og DELPHIN. Disse parametre anses for nødvendige for en almindelig fugtsimulering. Endvidere fremgår hvilke data der er rekvireret fra DMI, og hvilke parametre der kan beregnes ud fra øvrige parametre.

Følgende parametre er rekvirerede og nødvendige for fugtsimulering;

- Temperatur
- Relativ Fugtighed
- Regn på horisontal flade
- Vindhastighed
- Vindretning
- Kortbølget stråling; global
- Lufttryk

Følgende parametre skal beregnes, og bør kunne regnes på baggrund af rekvireret data:

- Kortbølget stråling; diffus,
- Kortbølget stråling; direkte
- Langbølget stråling; Atmosfærisk modstråling
- Skydække

TABEL 2. Klima parametre der indgår i klimadatasæt for fugtsimuleringsprogrammerne WUFI® Pro og DELPHIN, samt de rekvirerede data.

WUFI	DELPHIN	Parameter	Enhed	WUFI® Pro *	DELPHIN*	Rekvireret fra DMI
ISGH	SHWRAD	Globalstråling, kortbølget	W/m ²	(X)		X (W/m ²)
ISDH	DIRRAD	Direkte stråling, kortbølget	W/m ²	(X)	X	Kan regnes
ISD	DIFRAD	Diffus stråling, kortbølget	W/m ²	X	X	Kan regnes
ILAH	SKYEMISS	Atmosfærisk modstråling, langbølget	W/m ²	(X)	X	Kan regnes
CI	CLOUDCOV	Skyindeks (skydække)	[0;1]	(X)		(Kan regnes)
WS	WINDVEL	Vindhastighed, skaleret gennemsnit	m/s	X	X	X (m/s)
WD	WINDDIR	Vindretning	(°), nord=0	X	X	X (°)
RN	HORRAIN	Normal regn / Regnfluxtæthed på vandret plan	WUFI: mm/t or l/m ² h DELPHIN: l/m ² s	X	X	X (mm)
TA	TEMPER	Lufttemperatur	°C	X	X	X (°C)
HREL	RELHUM	Relativ fugtighed	%	X	X	X (%)
PSTA	GASPRESS	Lufttryk ved stationshøjde / Gas (luft) tryk	hPa	(X)	(X)	X (hPa)

*Minimumsklimaparametre, der er nødvendige for fugtsimuleringer.

- for DELPHIN er dette defineret af det tyske TRY-klimadatasæt fra 2011, fra Bremerhaven, Essen, Rostock, Hamburg og Potsdam.

- for WUFI er dette defineret af WUFI i online-hjælpeplatformen under "Creating Climate Files", der definerer nødvendige parametre for bygningsfysiske simuleringer

Kan regnes: betyder at disse klimaparametre kan beregnes hvis de andre parametre er tilgængelige.

- Global eller direkte stråling beregnes hvis den anden samt diffus stråling er tilgængelig.

- Atmosfærisk modstråling, langbølget, kan estimeres hvis skydække målinger er tilgængelig, eller ved at bruge en fast værdi for hele året.

- Skydække kan estimeres ud fra temperatur, relativ luftfugtighed og kortbølget stråling (kun for dagtimer).

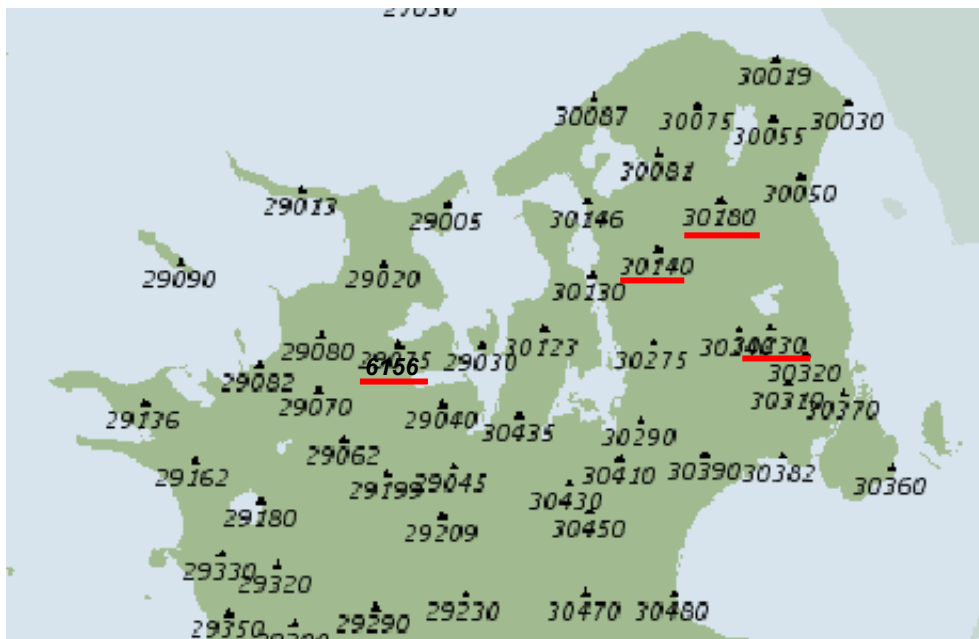
3.2 Klimaparametre – rådata

Data grundlaget er leveret fra DMI strækker sig fra 2001 til primo 2019. Der er taget udgangspunkt i vejrstationerne Sjælsmark (6188) [temperatur, relativ fugtighed, vindhastighed, globalstråling] og suppleret med data fra 6156 (Holbæk flyveplads) [nedbør], Hillerød SØ (30180) [nedbør], Store Hareskov (30230) [nedbør] og Gørløse (30140) [nedbør]. Sjælsmark har målt nedbør fra ca. 2010 og frem mens de øvrige stationer har leveret nedbørs data fra ca. 2001-2010. Det er observeret, at der er mangel på pålidelige nedbørsdata fra Sjælsmark såvel som de nærliggende vejrstationer for 2010, derfor er al klimadata for 2010 fra valgt, da dette ville have en indflydelse på vægtningen af klimaparametrene til fugtreferenceåret.

Det samme datasæt er anvendt til udarbejdelse af referenceår, der benyttes til energi og indeklimasimulering i hhv. Be18 og BSim (to programmer).



FIGUR 1. Stationsnet for globalstråling, men station 6188 (Sjælsmark) måler også temperatur, relativ fugtighed og vindhastighed som er benyttet til at oprette dette referenceår. Kilde: (Wang, 2013)



FIGUR 2. Stationsnet for nedbør. De røde markeringer angiver de anvendte vejrstationer for nedbør, hhv. Holbæk flyveplads, Hillerød, Store Hareskov og Gørlose. Kilde: (Wang, 2013)

The background of the page is filled with a pattern of thin, dark blue, wavy lines that create a sense of movement and depth. These lines are arranged in concentric, slightly irregular curves that flow across the entire page, creating a modern and abstract aesthetic.

4

BEHANDLING AF KLIMADATA

4 BEHANDLING AF KLIMADATA

4.1 Metode

Referenceåret skal indeholde de værdier oplyst i afsnit 3.2, *Klimaparametre – rådata*, for WUFI® Pro og DELPHIN simuleringsprogrammerne. Den prioriterede rækkefølge er baseret på afsnit 2.2, *Vægtning af klimaparametre*.

1. Nedbør, relativ fugtighed, temperatur og stråling
2. Vindretning og -hastighed
3. Skydække

For at konstruere de nye danske hygrotermiske referenceår, tages udgangspunkt i 17 års data fra DMI i perioden 2001 til ultimo 2019, fratrukket 2010. Konstruktion af referenceåret fulgte (DS/EN ISO 15927-4:2006) afsnit 5.2 og 5.3. Heri beskrives hvordan de mest typiske måneder på baggrund af tre primære variable og en sekundær variabel blev udvalgt. De tre primære variable og den sekundære variabel benyttet i udvælgelsen var som vist i TABEL 3.

TABEL 3. Udvalgte kriterier og begrundelse.

#	Primær parameter	Primær parameter	Primær parameter	Sekundær parameter	Bemærkning
1	Temperatur	Relativ fugtighed	Nedbør	Vindretning	
2	Temperatur	Relativ fugtighed	Nedbør	Stråling	Tung konst.
3	Temperatur	Relativ fugtighed	Stråling	Nedbør	Let konst.
4	Nedbør	Vindretning	Vindhastighed	Stråling	Slagregn
5	Nedbør	Vindhastighed	Stråling	Temperatur	Mix

Referenceåret er således stykket sammen af de udvalgte måneder, der er mest repræsentative for gennemsnittet af de valgte primære og sekundære parametre for hele dataperioden. Ved overgangen mellem to måneder er der lavet en interpolation mellem de to måneder for at sikre en gradvis overgang. Mere specifikt, er data fra de 8 sidste timer før og de 8 første timer efter overgangen fra begge repræsentative måneder benyttet. Den samme procedure blev anvendt til overgangen mellem 31. december og 1. januar, for at muliggøre udførelse af flerårige simuleringer. Et vægtet gennemsnit af hvert par af målinger sikrer en gradvis overgang fra målingerne det ene år til målingerne fra det andet år.

Referenceåret er stykket sammen uden brug af data for 29. februar, grundet at simuleringsprogrammerne ikke er i stand til at køre simuleringer med sådanne datasæt. Programmer anvender typisk referenceår indeholdende 8760 timeværdier, svarende til et normalt år med 365 dage. I tilfælde af referenceår indeholdende 29. februar, vil data for denne dag fjernes og overgangen udføres mellem 28. februar og 1. marts.

Der var ganske få manglende målinger i datasættene. De er erstattet af et gennemsnit af målingen før og målingen efter ved lineær interpolation.

Opdeling af globalstråling i diffus og direkte stråling er foretaget vha. Pythons DIRINT funktion fra pakken pvlib (pvlib, 2022). Metoden til opdeling af global stråling i diffus og direkte stråling er beskrevet i (Perez et al., 1992; Maxwell, 1987). De variable der indgik i beregningen, var globalstråling, dato og klokkeslæt, solens zenithvinkel samt atmosfærisk tryk. Trykmålinger er ikke angivet før 8. august 2003. Her er værdien sat til Pythons default værdi 101325Pa.

4.1.1 Skydække og langbølget modstråling

Simuleringsprogrammerne kræver skydækkeværdier (til estimering af langbølget modstråling) eller målinger for den langbølget modstråling. Disse typer data var ikke tilgængelige fra de anvendte vejrstationer. I stedet blev BSim (BUILD Aalborg Universitet, 2022) og EnergyPlus skydække data (U.S. Department of Energy, 2022a) anvendt til at estimere skydækket, og den langbølgede modstråling blev efterfølgende estimeret jf. afsnit 2.9.1.13 i EnergyPlus Auxiliary Programs Version 22.1.0 Documentation (U.S. Department of Energy, 2022b). Ifm. estimering af langbølget modstråling var det nødvendigt at beregne dugpunktstemperaturen, hvilket blev udført på baggrund af målinger af hhv. temperatur samt mætningsvanddamptrykket for luften jf. Annex E.1 i (DS/EN ISO 13788:2013).

Skydække data fra vejrstationer findes ofte som "Cloudiness" opgivet i oktas (ottendedele af himmelen), men til estimering af langbølget modstråling skal skydække data omregnes til "Sky cover" opgivet i tiendedele.

Som nævnt ovenfor blev skydækket estimeret ved hjælp af BSim beregninger i kombination med EnergyPlus skydække data (time middelværdier for hver måned, f.eks. 24 timeværdier for skydække gældende for hele januar måned). Denne kombination af metoder blev anvendt da BSims estimering af skydække tager udgangspunkt i mængden af solstråling (global- og diffus stråling). Dette betyder, at BSim regner med 100% skydække i alle natteimer gennem hele året, fordi der ikke er nogen solstråling om natten, som beskrevet for metoden til estimering af skydække i afsnit 2.2.2 i (Finkenstein & Häupl, 2008). Kombinationen består i, at BSims estimering af skydække anvendes for alle dagtimer i de nye danske referenceår, mens EnergyPlus skydække data anvendes for alle natteimer.

4.1.2 Kontrol af klimaparametre i fugtreferenceår

Efter generering af de fem fugtreferenceår, blev der lavet fordelingsfunktioner for at sikre, at de valgte repræsentative måneder ikke var ekstreme, og for at undersøge om overgangene mellem månederne var tilpas udglattet. Derefter blev dataene for hver klimaparameter visualiseret, og der blev kontrolleret at dataene ikke indeholdt unormalt høje/lave værdier eller andre fejl. I tilfælde af unormalt høje/lave værdier eller fejl, blev disse værdier fjernet, og der blev udført interpolation mellem forrige og efterfølgende værdier. Derudover blev det kontrolleret, at overgange mellem månederne og i slut/start af året virker korrekte.

4.2 Referenceår til fugtsimulering

Resultatet af den statistiske udvælgelse af repræsentative måneder for de fem danske referenceår iht. kriterierne i TABEL 3 er præsenteret i TABEL 4.

TABEL 4. Udvalgte repræsentative måneder for de fem danske referenceår.

#	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.
1	2018	2001	2004	2004	2014	2008	2019	2001	2015	2004	2008	2018
2	2019	2004	2011	2004	2014	2006	2019	2004	2011	2013	2017	2017
3	2019	2005	2015	2004	2011	2002	2005	2019	2009	2013	2008	2017
4	2003	2015	2017	2004	2009	2006	2009	2017	2003	2013	2012	2019
5	2019	2018	2015	2005	2012	2005	2019	2007	2003	2019	2012	2017

4.3 Sammenligning af klimadata

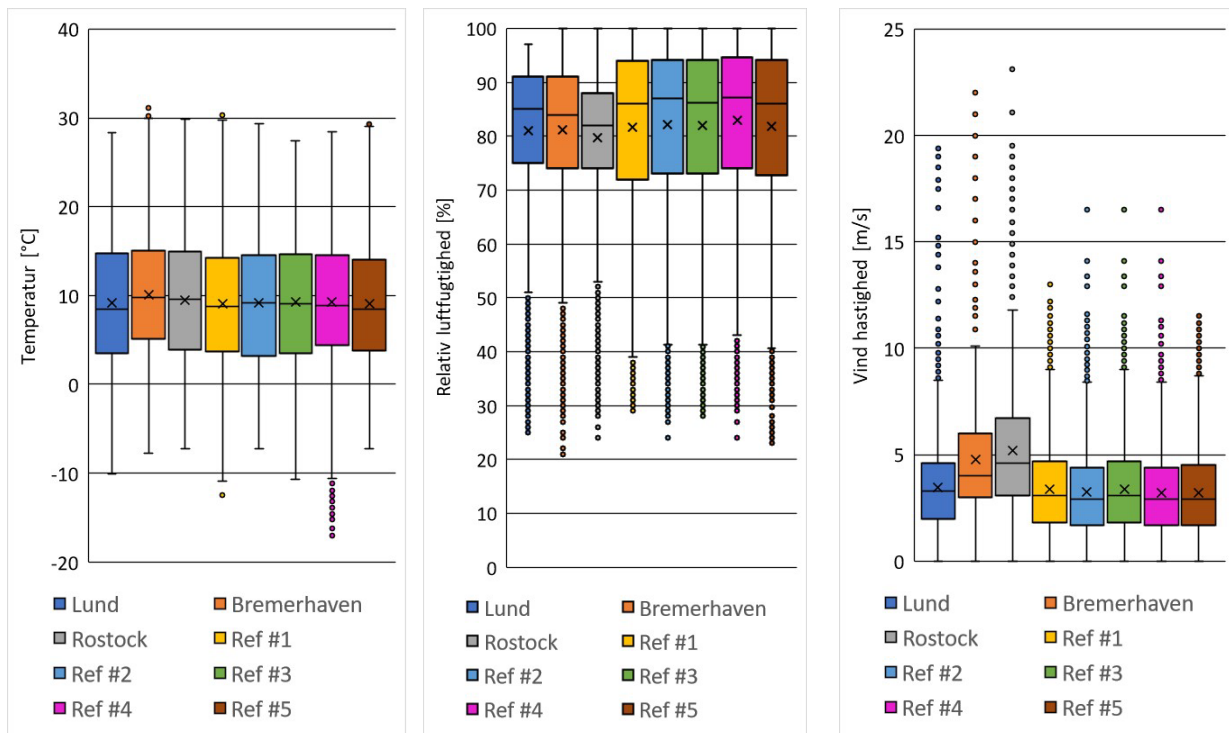
I dette afsnit sammenholdes klimaparametrene for de fem danske referenceår med referenceår for nærliggende målestationer/byer (Lund, Bremerhaven og Rostock). De tre målestationer er valgt fordi de typisk vælges af praktikere og forskere der arbejder med fugtsimuleringer af bygningskonstruktioner, i manglen på et dansk fugtreferenceår. Referenceår for Lund og Rostock blev indhentet fra Fraunhofer IBP (Institut for bygningsfysik), der står bag simuleringsprogrammet WUFI® Pro, og referenceår for Bremerhaven blev indhentet fra databasen for simuleringsprogrammet DELPHIN. Bremerhaven referenceåret fra DELPHIN blev valgt da dette var opdateret i 2010, mens at referenceåret fra WUFI® Pro er fra 1986. Følgende referenceår blev anvendt til at sammenholde med de danske referenceår:

- Lund TRY (genereret fra data for perioden 1995 til 2005)
- Rostock HRY (genereret fra data for perioden 2003 til 2010)
- Bremerhaven TRY (genereret fra data for perioden 1988 til 2007)

4.3.1 Kontrol af klimaparametre i referenceår

FIGUR 3-5 viser en boxplot graf for hver klimaparameter, og illustrerer fordelingen af værdier for den enkelte klimaparameter, og som gør det muligt at sammenligne fordelingen mellem de forskellige referenceår.

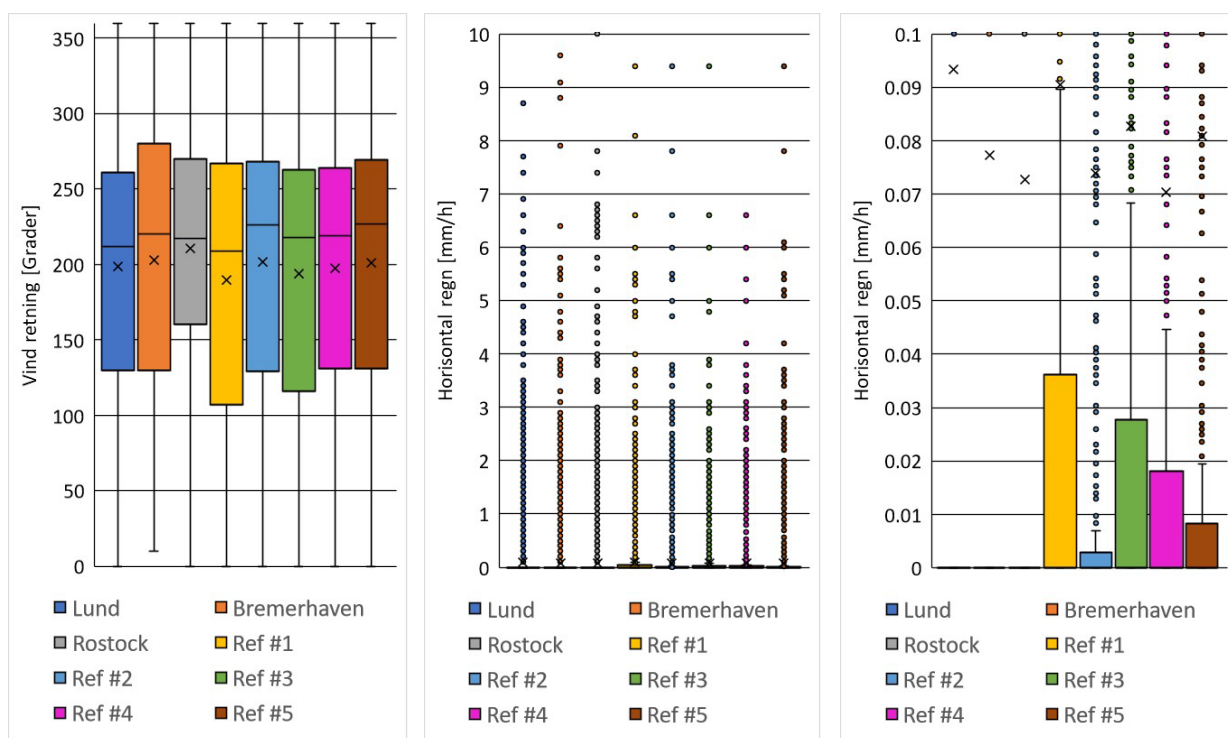
Boxplot grafen for udetemperatur (FIGUR 3a) viser, at fordelingen er relativt ens for alle referenceår, dog med lidt afvigelser mellem de forskellige referenceår ift. de mere ekstreme værdier (dvs. afgivelser i længderne af top og bund "halerne"). Boxplot grafen for udvendig relativ luftfugtighed (FIGUR 3b) viser derimod, at de fem danske referenceår generelt har en større spredning, altså flere værdier i de høje og lave ender af skalaen set i forhold til de øvrige referenceår fra de tre nærliggende målestationer (f.eks. vist ved længere bund halerne for de lavere relative fugtighedsværdier, som strækker sig længere ned).



FIGUR 3. Boxplots for (a) Udetemperatur, (b) Ude relativ luftfugtighed, og (c) Vind hastighed. Vist for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.

For vindhastighed viser boxplot grafen (FIGUR 3c), at de fem danske referenceår har en fordeling af vindhastigheder meget lig med klimaet i Lund, mens at der observeres højere vindhastigheder i Bremerhaven og Rostock. Dette fremgår også af vindroserne for Bremerhaven og Rostock (FIGUR 6b-c). Det fremgår, at de høje vindhastigheder kommer fra de vestlige til nordlige retninger. Ift. vind retningen viser boxplot grafen (FIGUR 4a), at den inter-kvartile fordeling generelt er relativt ens for de danske referenceår og for referenceårene for Lund, Bremerhaven og Rostock, men der ses dog, at Rostock afviger en smule ift. 1. kvartil. Dette er i overensstemmelse med vindrosen for Rostock (FIGUR 6c), hvor der observeres lavere vindpåvirkning fra retningerne nord til øst set i forhold til de andre referenceår. Derudover viser grafen og vindroserne også, at referenceår 1 har mere vindpåvirkning fra øst (FIGUR 4a og FIGUR 6d).

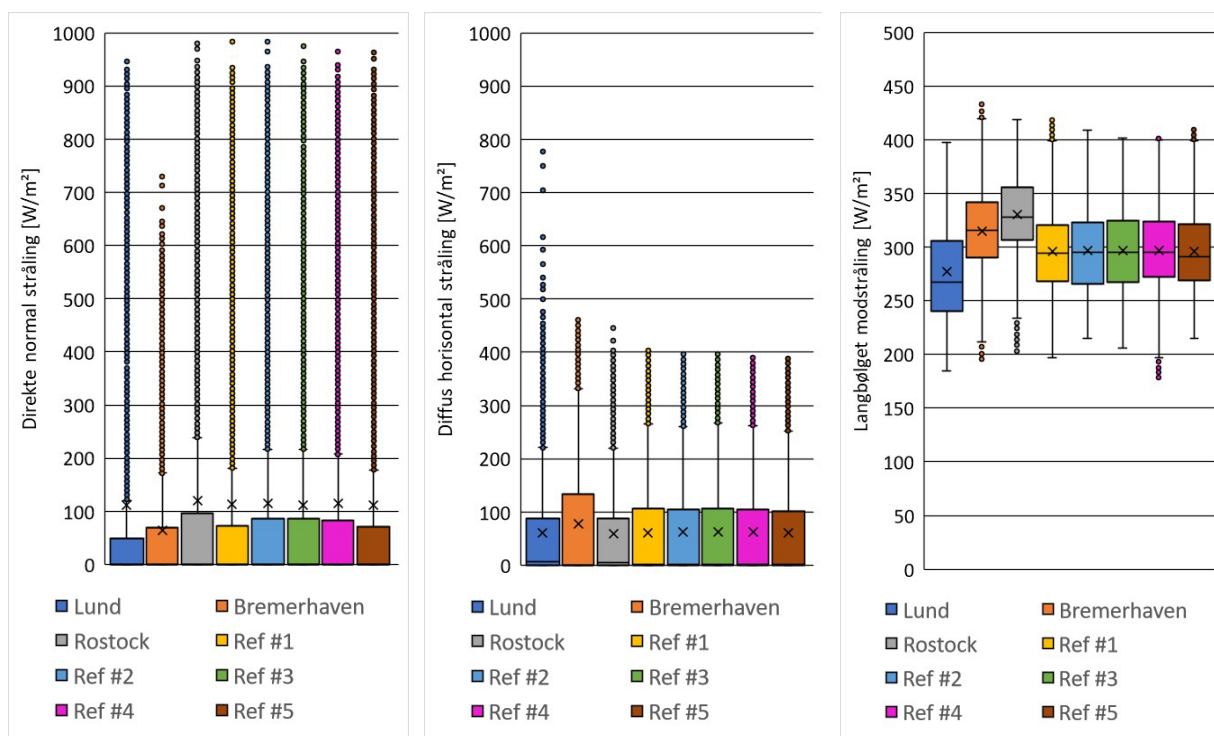
En sammenligning af den samlede mængde horisontal regn over året viser at de fleste af de danske referenceår ligger mellem eller på samme niveau som de øvrige referenceår (TABEL 8). Her fremgår det, at de danske referenceår typisk ligger lidt lavere end Lund men derimod lidt over Bremerhaven og Rostock. Kigger man derimod på boxplot graferne for horisontal regn (FIGUR 4b-c), så ses det, at de fem danske referenceår har betydeligt flere timer med regn set i forhold til Lund, Bremerhaven og Rostock. Derimod har Lund, Bremerhaven og Rostock betydeligt flere tilfælde af kraftige regnskyl. Et nærstudie af dataene for horisontale regnmængder (FIGUR 4c) viser, at de fem danske referenceår har op til 3-4 gange flere timer hen over året med regn set i forhold til Lund, Bremerhaven og Rostock (2354-3274 timer med regn for de danske referenceår, mod 787-988 timer med regn for Lund, Bremerhaven og Rostock). Betragtes derimod den estimerede mængde slagregn (kombination af regnmængde, vind hastighed og vind retning) fra WUFI® Pro, vist i FIGUR 7, så ses det at Lund, Bremerhaven og Rostock generelt har større mængder slagregn set i forhold til de danske referenceår. Dette er gældende for de fleste orienteringer. Dette indikerer at referenceårene for Lund, Bremerhaven og Rostock potentielt kunne føre til højere relativ fugtighed i fugtsimuleringer.



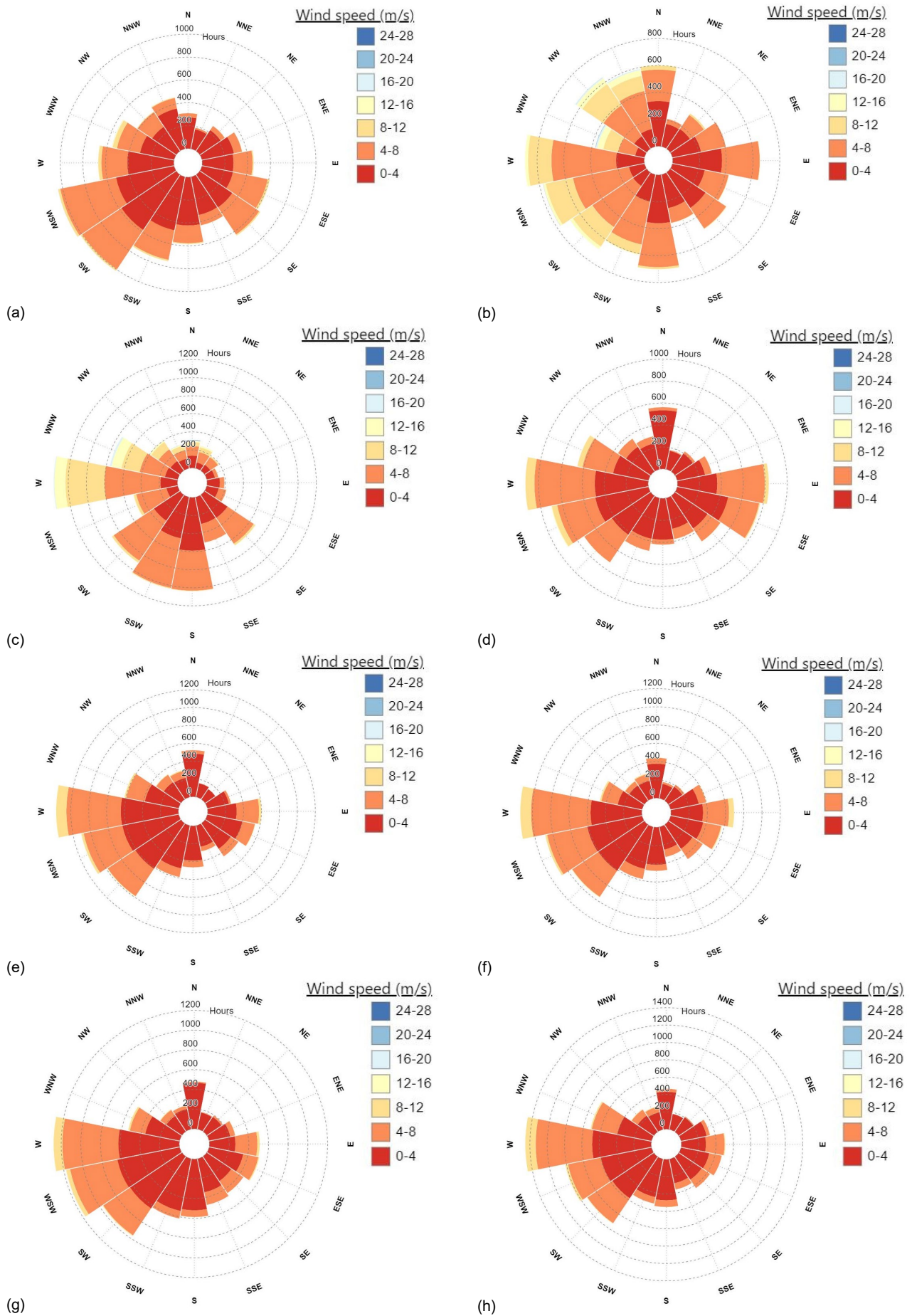
FIGUR 4 Boxplots for (a) Vind retning, (b) Horisontal regn, og (c) Horisontal regn – nærbillede. Vist for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.

Boxplot grafen for direkte og diffus stråling (FIGUR 5a-b) viser, at fordelingen af værdier for de fem danske referenceår er relativt lig fordelingerne for de øvrige referenceår. Det blev imidlertid observeret fra fordelingen af direkte stråling for Bremerhaven, at der er mindre direkte stråling i forhold til de andre referenceår, mens at fordelingen for diffus stråling viser, at der er mere stråling set i forhold til de andre referenceår.

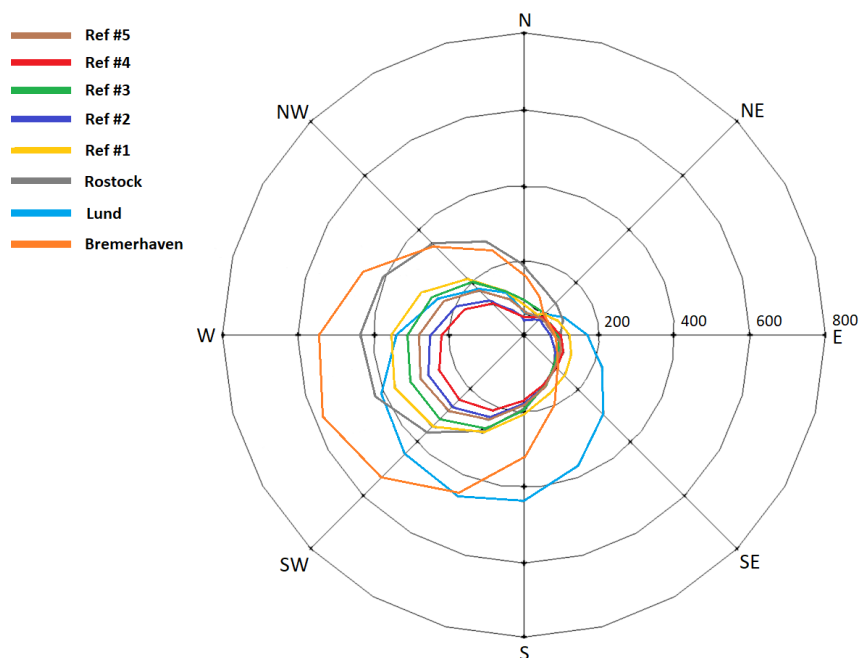
Boxplot grafen for langbølget modstråling (FIGUR 5c) viser at fordelingen af værdier for de danske referenceår er relativt lig dem fra referenceåret for Lund, mens der observeres mere langbølget modstråling for Bremerhaven og Rostock. De lavere værdier for de fem danske referenceår og Lund skyldes muligvis, at dataene for langbølget modstråling i disse seks referenceår er beregnet ud fra estimeret værdier for skydække, hvorimod at det antages at data for Bremerhaven og Rostock er målte værdier. Dette kunne indikere, at metoden til beregningen af langbølget modstråling ud fra skydække værdier har en tendens til at undervurdere mængden af langbølget modstråling. Dette synes understøttet af en supplerende beregning af langbølget modstråling, der blev udført med målt skydække data (fra EnergyPlus' database) for København, Hamborg, Bremen og Gøteborg. Resultaterne for de fire byer var relativt ens og alle lavere end de målte værdier for Bremerhaven og Rostock. Dataene er vedlagt i de supplerende filer (Jensen et al., 2022).



FIGUR 5. Boxplots for (a) Direkte normal stråling, (b) Diffus horisontal stråling, og (c) Langbølget modstråling. Vist for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



FIGUR 6. Vindrose for (a) Lund, (b) Bremerhaven, (c) Rostock, (d) Ref1, (e) Ref2, (f) Ref3, (g) Ref4, (h) Ref5, (WindRose.xyz, 2022)



FIGUR 7. Total mængde slagregn ift. orientering for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår. (Produceret af WUFI® Pro (Fraunhofer, 2021; Künzle, 1995).

Tabellerne 5-8 viser måneds og års værdier for hver klimaparameter for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår fra de nærliggende målestationer. TABEL 5-7 viser måneds- og årgennemsnit samt standard afvigelse for henholdsvis udetemperatur, ude relative luftfugtighed og vind hastighed. Mens TABEL 8 viser måneds og års total for horisontal regn, direkte stråling, diffus stråling, og langbølget modstråling. Fra tabelværdierne kan det ligeledes ses at de fem danske referenceår er meget lig de øvrige referenceår ift. måneds- og årsværdier for de enkelte klimaparametre.

TABEL 5. Klimaparametre: måneds- og årgennemsnit og standard afvigelse (SD) for udetemperatur.

		Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	År
Gns. Temperatur [°C]	Lund	2,8	2,2	3,3	7,7	10,6	15,1	18,3	17,0	16,0	9,1	5,1	2,4	9,2
	Bremerhaven	2,9	3,2	5,4	9,0	13,1	16,0	17,9	18,2	15,0	10,6	6,1	3,2	10,1
	Rostock	3,6	1,5	3,6	7,2	11,8	16,0	16,1	17,5	17,3	9,7	7,1	2,3	9,5
	Ref1	2,3	0,3	3,5	7,9	12,3	15,1	17,2	17,2	13,4	9,4	5,8	3,8	9,1
	Ref2	1,4	1,4	2,7	8,0	12,3	15,9	17,2	17,7	14,0	11,0	5,1	3,3	9,2
	Ref3	1,4	-0,2	4,7	7,9	11,6	15,9	17,1	17,5	14,3	11,0	5,8	3,3	9,2
	Ref4	-0,2	1,8	4,7	8,0	11,6	15,9	17,8	16,1	13,9	11,0	6,1	4,3	9,3
	Ref5	1,4	1,4	4,7	7,6	12,6	14,0	17,2	17,1	13,9	9,2	6,1	3,3	9,1
SD for temperatur [°C]	Lund	3,3	3,0	3,1	3,6	4,6	3,1	3,9	4,1	3,2	3,5	3,8	3,2	6,9
	Bremerhaven	3,7	2,6	3,3	3,9	3,9	3,4	3,5	3,3	2,9	3,1	3,2	3,7	6,6
	Rostock	3,4	1,0	4,9	3,6	3,0	4,0	2,7	2,8	3,1	2,9	2,8	2,9	6,7
	Ref1	2,6	4,6	4,1	3,9	4,5	4,1	4,2	3,6	3,2	3,1	3,5	2,8	6,8
	Ref2	2,8	3,5	3,4	3,9	4,5	4,4	4,2	3,8	3,0	2,8	3,3	2,7	7,0
	Ref3	2,8	2,6	2,9	3,9	4,6	3,4	3,7	3,7	3,4	2,8	3,5	2,7	6,9
	Ref4	5,4	2,6	3,5	3,9	3,9	4,4	3,6	3,1	4,0	2,8	2,3	2,5	6,8
	Ref5	2,8	3,5	2,9	4,2	5,4	3,9	4,2	3,9	4,0	3,8	2,2	2,7	6,7

TABEL 6. Klimaparametre: måneds- og årsgennemsnit og standard afvigelse (SD) for ude relative luftfugtighed.

		Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	År
Gns. Relativ fugtighed [%]	Lund	88,4	88,2	84,7	77,4	72,4	76,1	72,5	75,9	80,0	83,2	87,0	87,2	81,0
	Bremerhaven	89,1	87,8	83,2	69,4	76,8	76,0	80,0	76,2	78,3	81,9	85,0	89,9	81,1
	Rostock	82,9	83,6	82,1	75,4	73,1	75,7	77,9	78,1	74,3	82,7	83,4	87,5	79,7
	Ref1	89,3	82,3	80,8	72,3	76,5	71,6	76,5	79,3	83,0	86,3	90,8	89,9	81,6
	Ref2	86,3	86,2	79,6	72,4	76,6	74,0	76,6	79,6	85,9	87,7	90,7	90,3	82,1
	Ref3	86,2	85,1	80,3	72,3	74,2	73,3	79,5	81,1	83,1	87,8	90,8	90,3	82,0
	Ref4	86,4	87,3	84,5	72,3	76,2	74,1	81,3	81,8	79,5	87,7	93,3	90,2	82,9
	Ref5	86,3	86,2	80,3	68,3	72,9	77,0	76,5	83,3	79,4	88,0	93,3	90,3	81,8
SD for relativ fugtighed [%]	Lund	6,5	6,0	9,8	14,6	18,2	13,4	15,8	17,8	13,9	9,7	7,8	7,0	13,8
	Bremerhaven	8,2	10,6	12,7	17,4	13,3	11,9	12,3	13,6	11,4	9,3	8,8	7,7	13,1
	Rostock	7,0	3,8	12,8	15,6	14,3	12,5	10,6	12,2	13,5	8,7	7,6	6,5	11,8
	Ref1	7,7	12,1	12,9	19,0	16,7	17,8	15,9	16,2	13,5	10,7	8,8	8,1	15,2
	Ref2	12,4	12,1	15,6	19,0	16,7	17,4	15,9	15,1	10,9	10,7	7,7	6,1	15,2
	Ref3	12,4	11,5	14,7	19,0	17,7	16,0	16,8	15,1	13,1	10,7	8,8	6,1	15,3
	Ref4	7,9	10,2	14,1	19,0	17,0	17,5	14,9	14,7	14,6	10,7	6,0	8,1	14,9
	Ref5	12,4	12,1	14,7	18,7	18,6	15,2	15,9	12,9	14,6	10,8	6,0	6,0	15,5

TABEL 7. Klimaparametre: måneds- og årsgennemsnit og standard afvigelse (SD) for vind hastighed.

		Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	År
Gns. Vind hastighed [m/s]	Lund	3,6	3,7	3,5	3,9	3,3	3,1	2,9	2,7	3,2	3,8	3,0	4,8	3,5
	Bremerhaven	5,5	4,5	5,6	5,0	4,1	4,3	4,4	4,7	5,0	4,8	5,0	4,5	4,8
	Rostock	7,3	5,3	5,2	4,9	4,7	4,1	4,8	4,1	4,7	4,6	6,6	6,1	5,2
	Ref1	3,6	4,0	4,0	3,4	2,4	3,4	3,2	3,2	2,8	3,3	3,8	3,5	3,4
	Ref2	3,5	3,4	4,0	3,5	2,4	2,6	3,1	2,6	3,1	3,2	3,1	4,2	3,2
	Ref3	3,5	3,6	3,6	3,4	3,3	4,3	2,4	2,2	3,1	3,2	3,8	4,2	3,4
	Ref4	4,1	3,7	3,6	3,4	3,0	2,6	2,8	2,6	2,8	3,2	3,0	3,6	3,2
	Ref5	3,5	3,4	3,6	3,2	3,1	3,1	3,2	2,8	2,8	2,8	3,0	4,2	3,2
SD for vind hastighed [m/s]	Lund	1,5	1,6	1,8	2,3	1,9	1,4	1,6	1,8	1,8	2,1	1,8	2,9	2,0
	Bremerhaven	3,2	2,1	3,4	3,2	2,0	2,3	2,6	2,6	3,0	3,2	3,0	3,2	2,9
	Rostock	3,6	1,0	2,7	2,3	2,9	2,4	4,9	2,1	3,2	2,2	4,0	3,4	3,2
	Ref1	2,3	2,1	2,3	2,1	1,6	2,4	2,1	1,8	1,6	1,7	2,3	1,8	2,1
	Ref2	2,1	2,0	2,4	2,1	1,6	1,7	2,1	1,6	1,9	1,8	2,0	2,4	2,1
	Ref3	2,1	2,0	2,0	2,1	1,9	2,2	1,8	1,4	2,0	1,8	2,3	2,4	2,1
	Ref4	2,4	2,0	2,1	2,1	2,1	1,7	1,8	1,8	1,9	1,8	1,6	2,1	2,0
	Ref5	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	2,1	1,7	1,9	1,8	1,6	2,4	2,0

TABEL 8. Klimaparametre: måneds- og årstotal for horisontal regn, direkte stråling, diffus stråling, og langbølget modstråling.

		Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	År
Total horisontal regn [mm]	Lund	51	59	84	63	56	88	40	111	45	56	25	140	818
	Bremerhaven	41	27	38	34	61	54	104	40	55	81	82	59	677
	Rostock	38	0	35	16	80	55	68	127	49	49	49	71	637
	Ref1	57	47	52	29	75	34	88	112	93	88	65	54	793
	Ref2	53	53	30	30	75	31	88	53	60	70	49	55	648
	Ref3	53	44	49	30	62	88	88	87	31	71	65	56	724
	Ref4	59	34	43	29	61	31	49	70	60	70	59	51	617
	Ref5	53	53	49	11	28	73	89	74	61	102	59	56	708
Total dir. Stråling [W/m ²]	Lund	12406	31878	43273	110025	129520	136684	166950	122276	120295	57059	23018	14970	968354
	Bremerhaven	13110	24157	38379	89772	65861	61041	67812	74290	42082	42124	21237	13103	552968
	Rostock	24256	33311	85780	147908	159785	164942	127030	72099	135836	64537	23893	17025	1056403
	Ref1	13669	57626	72788	125128	156482	178460	133599	95859	97121	37979	18235	6835	993780
	Ref2	23761	32429	93203	125114	156504	168708	133466	99885	81709	54506	26324	16460	1012069
	Ref3	23761	35879	83239	125105	153888	152573	104740	107332	100179	54501	18235	16460	975892
	Ref4	19302	31655	74284	125116	159642	168903	134547	115244	94662	54501	19834	13519	1011209
	Ref5	23761	32446	83234	122201	167418	128764	133535	112784	94666	44622	19834	16460	979725
Total diff. stråling [W/m ²]	Lund	8665	20693	36818	53963	86376	83912	78279	63124	45338	27253	11987	7139	523546
	Bremerhaven	11619	24837	44848	76010	98225	101132	106367	86567	62098	37614	16962	9739	676018
	Rostock	12451	19339	40357	54744	73227	74185	77782	69308	40256	28279	14076	9348	513352
	Ref1	8388	19648	38709	57907	77984	85933	84573	70941	49657	24623	10846	6126	535334
	Ref2	9925	18620	37062	57894	77982	80804	84550	72865	50383	27866	12745	7320	538017
	Ref3	9925	19265	36171	57919	82431	93357	85569	73250	47578	27864	10846	7320	551494
	Ref4	10355	17554	40475	57903	79182	80805	88560	71477	47437	27863	10879	6913	539405
	Ref5	9925	18625	36174	60791	75309	81722	84566	69168	47436	27024	10879	7320	528941
Total langbøl. Stråling [W/m ²]	Lund	176617	160456	182180	195061	212314	226892	248473	239267	225679	202604	179269	176458	2425270
	Bremerhaven	212912	186940	218550	213834	244634	246468	264515	264632	243961	231898	213747	217967	2760058
	Rostock	236029	205138	220261	216646	244696	254702	267089	275759	257744	242550	234684	236503	2891801
	Ref1	192232	169446	199008	207657	230632	233239	250921	251413	229012	223063	201414	201668	2589705
	Ref2	188800	172962	196127	207705	230588	237477	250988	254065	232344	229140	199034	200156	2599386
	Ref3	188792	167438	202693	207636	227900	236897	250264	253971	233598	229098	201411	200182	2599878
	Ref4	183918	173883	203113	207730	228616	237500	253915	248280	231257	229091	202741	203559	2603605
	Ref5	188800	172991	202623	205244	231814	230264	250898	252689	231286	222060	202714	200140	2591524

4.3.2 Sammenligning af referenceår – akkumulerede resultater

FIGUR 8-14 nedenfor viser de akkumulerede værdier for hver klimaparameter. Formålet er at sammenligne de fem danske referenceår over tid, for at bestemme om der samlet set er betydelige forskelle mellem de danske referenceår og de øvrige referenceår for de tre nærliggende målestationer.

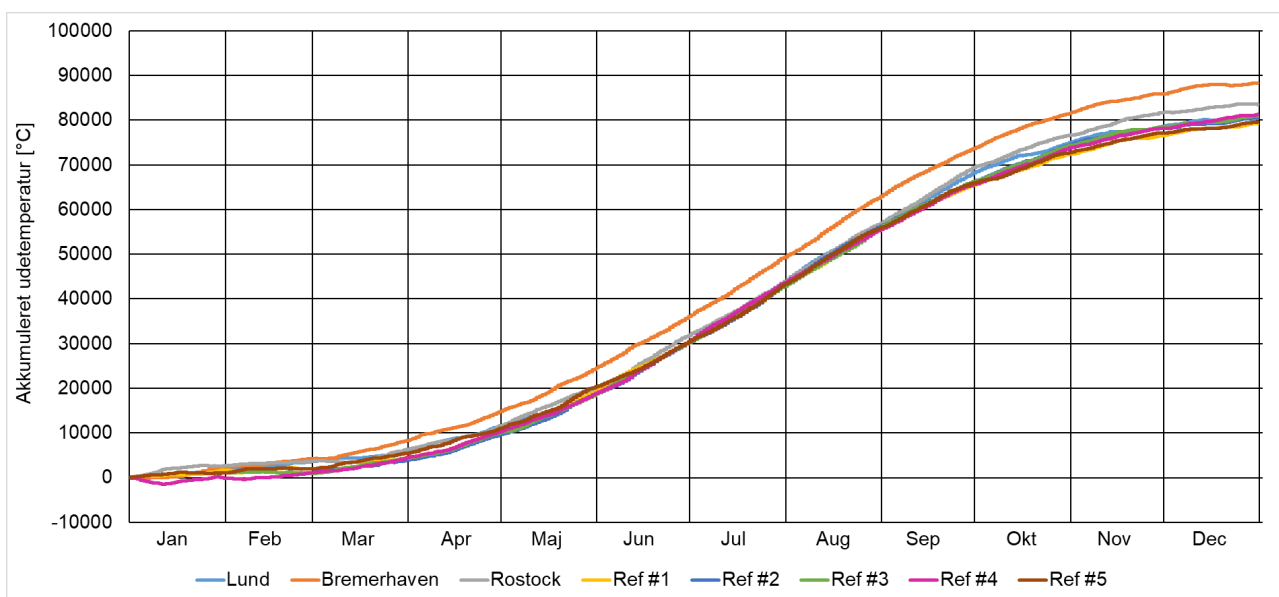
De akkumulerede grafer viser, at der generelt ikke er betydelige forskelle mellem de fem danske referenceår og de øvrige referenceår for de fleste klimaparametre. For temperatur og relativ fugtighed er referenceårene alle meget ens. De observerede afvigelser beskrives herunder.

For vind hastighed (FIGUR 10), blev det observeret, at den akkumulerede værdi var ca. 50% og 65% større for hhv. Bremerhaven og Rostock set i forhold til de fem danske referenceår og referenceåret for Lund. Derimod var der gode ligheder mellem de fem danske referenceår og referenceåret for Lund ift. vindhastighed.

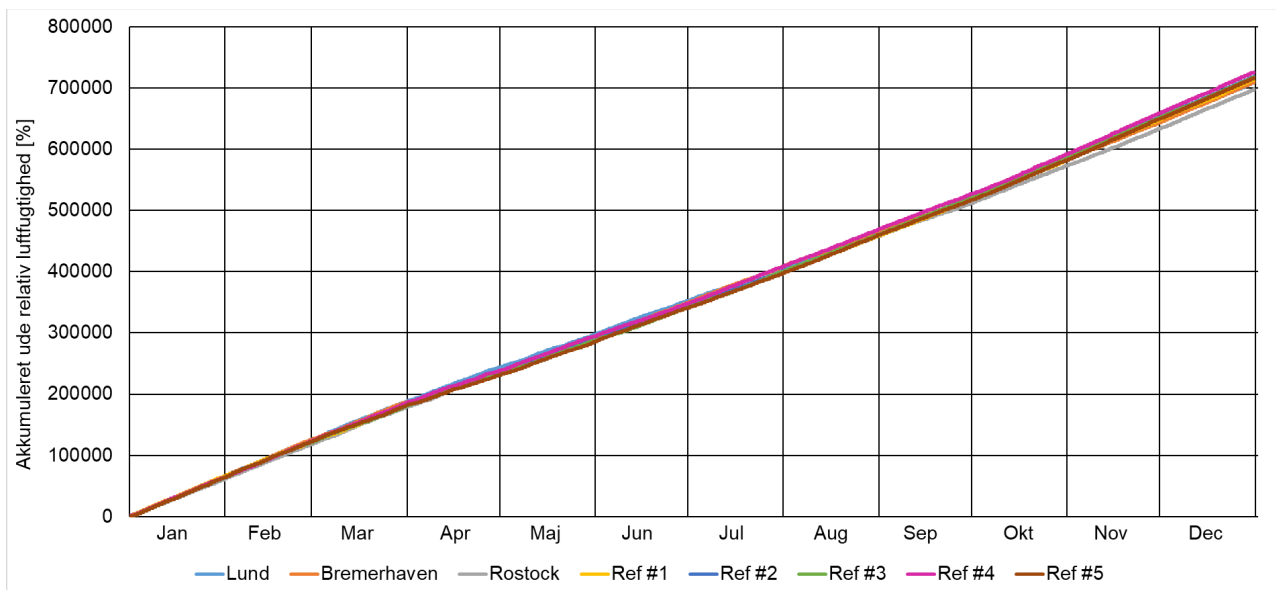
For direkte normal stråling og diffus horisontal stråling blev der ligeledes observeret nogle betydelige forskelle mellem referenceåret for Bremerhaven og de resterende referenceår (FIGUR 12-13). Her ses, at den akkumulerede diffuse stråling for Bremerhaven er betydeligt større i forhold til de resterende referenceår, mens at den direkte stråling er betydeligt lavere. Ifm. denne observation blev det undersøgt, om dette kunne skyldes fejl i udlæsning af data klimafilerne, hvilket ikke var tilfældet. Ligeledes blev dataene fra det ældre TRY1986 referenceår for Bremerhaven fra WUFI® Pro også undersøgt, hvor det blev observeret at den akkumulerede direkte stråling var på niveau med den akkumulerede diffuse stråling fra samme dataset og på niveau med den akkumulerede diffuse stråling fra det nyere TRY2010 referenceår for Bremerhaven. Derimod blev der observeret gode ligheder mellem de fem danske referenceår og referenceår for Lund og Rostock.

For den akkumulerede horisontale regn blev der observeret relativt store variationer mellem der undersøgte referenceår (FIGUR 11). Set over tid blev det observeret at de fem danske referenceår generelt lå på niveau med eller mellem de akkumulerede værdier for Lund, Bremerhaven og Rostock.

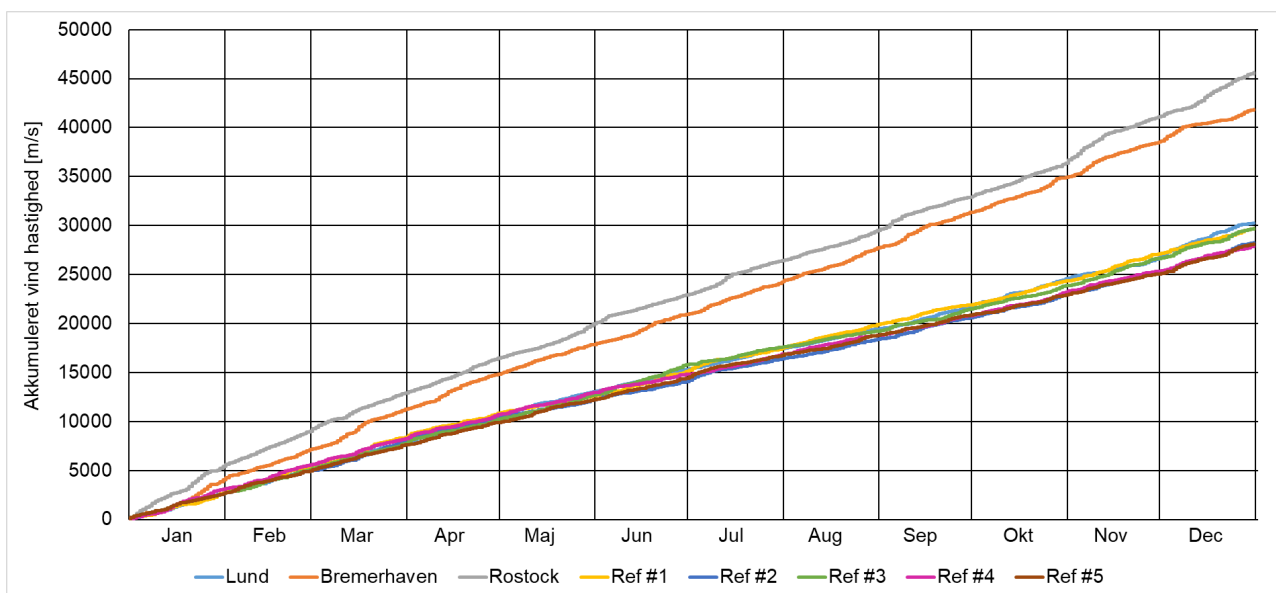
Samlet set indikerer denne sammenligning af de fem danske referenceår over tid generelt er meget lig de tre øvrige referenceår fra de nærliggende målestationer ift. de enkelte klimaparametre.



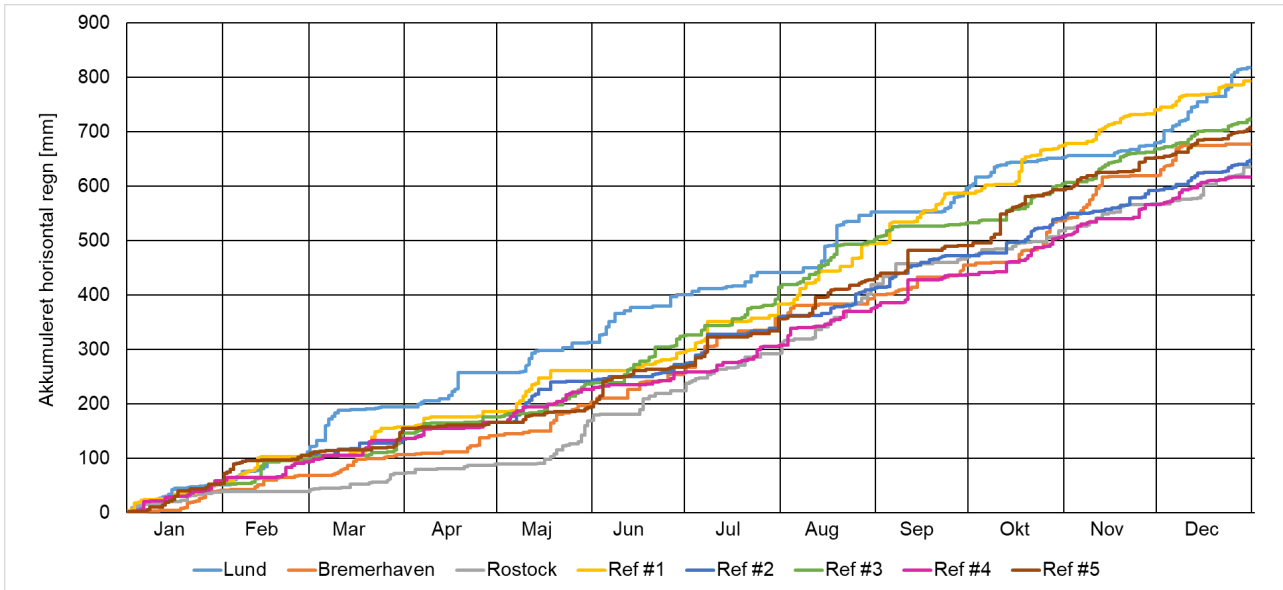
FIGUR 8. Akkumuleret udetemperatur for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



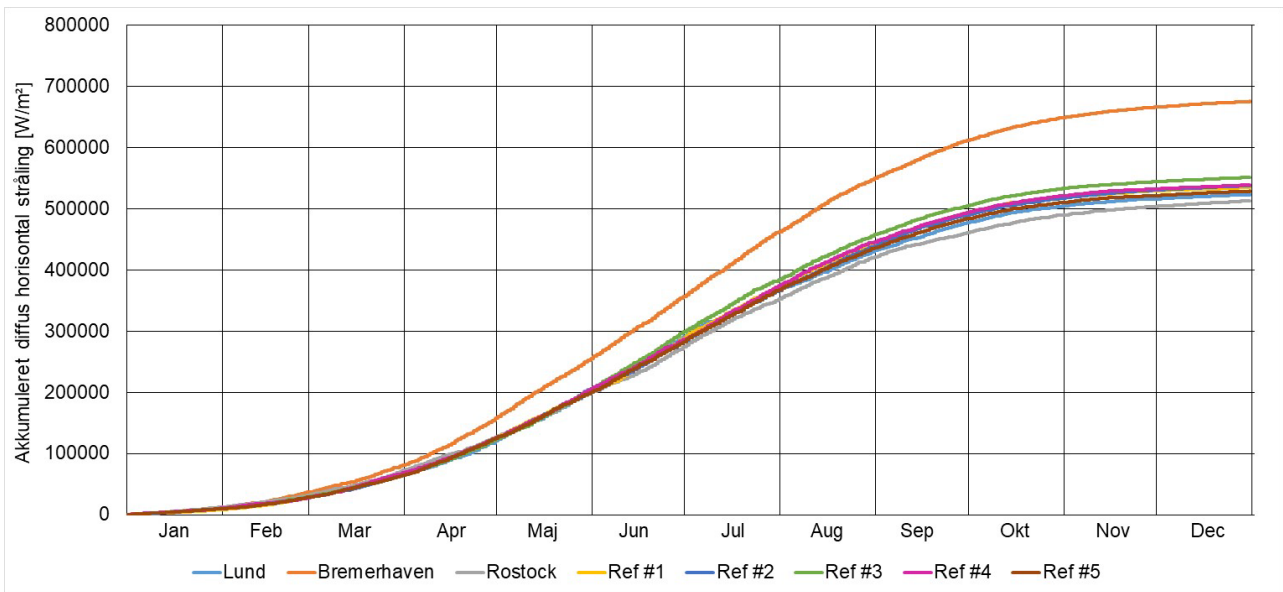
FIGUR 9. Akkumuleret ude relative luftfugtighed for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



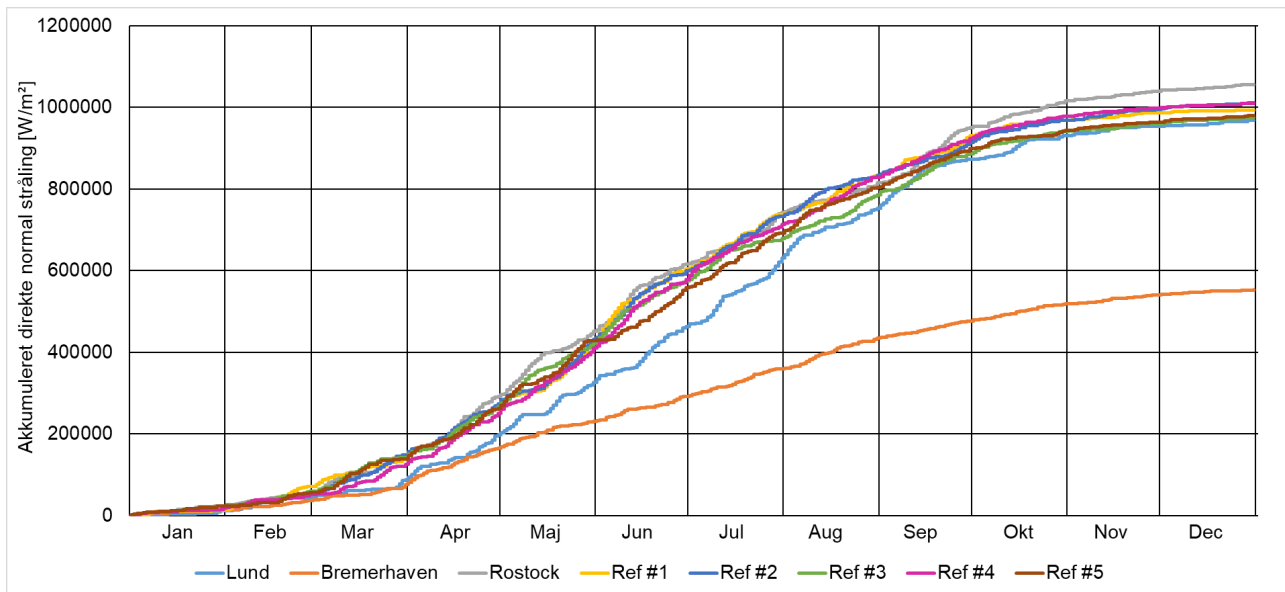
FIGUR 10. Akkumuleret vindhastighed for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



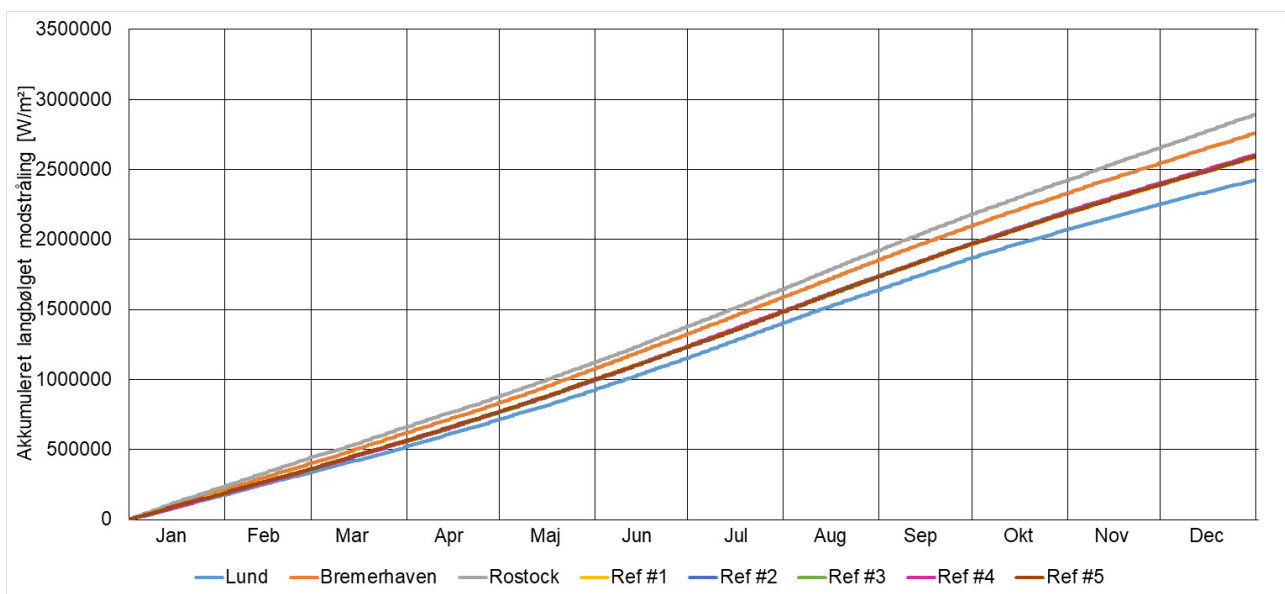
FIGUR 11. Akkumuleret horisontal regn for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



FIGUR 12. Akkumuleret diffus horisontal stråling for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



FIGUR 13. Akkumuleret direkte normal stråling for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.



FIGUR 14. Akkumuleret langbølget modstråling for de fem danske referenceår og de øvrige referenceår.

4.3.3 Sammenligning af referenceår – absolut forskel

Funktionen "ABS" blev anvendt til at bestemme den absolutte forskel mellem hver af de fem danske referenceår og de øvrige referenceår fra de tre nærliggende målestationer på en time-for-time basis for hver klimaparameter. Efterfølgende blev den gennemsnitlige forskel og standardafvigelse bestemt for hver klimaparameter. Ud fra den gennemsnitlige forskel mellem hver af de fem danske referenceår og de øvrige referenceår kunne det bestemmes, hvilken af de danske referenceår der havde den største lighed med referenceårene for Lund, Bremerhaven og Rostock. Dette kunne give en indikation på, hvilket referenceår der vil være mest repræsentativ for Danmark.

Resultaterne for sammenligningen med den absolutte forskelle mellem hver af de fem danske referenceår og de øvrige referenceår er vist i TABEL 9. Fra tabellen fremgår det, at referenceår 4 og 2 er de to referenceår, der har flest tilfælde af lavest absolut forskel til de øvrige referenceår (vist med de grønne markeringer). Det ses, at referenceår 2 har de største ligheder med referenceåret for Lund, mens referenceår 4 har de største ligheder med referenceårene for Bremerhaven og Rostock. Dog er de øvrige forskelle også relativt tæt på de mindste forskelle. Kigger man derimod på summen af de absolutte forskelle for de enkelte klimaparametre, så ses det, at der generelt er meget små forskelle mellem de fem danske referenceår. Udvælges referenceår ud fra summen af de absolutte forskelle for de enkelte klimaparametre (vist med de blå markeringer), så ses det at referenceår 2 overordnet set har de største ligheder med de tre øvrige referenceår fra de nærliggende målestationer.

TABEL 9. Absolut forskel mellem de danske referenceår og referenceår for Lund, Bremerhaven og Rostock, for de enkelte klimaparametre. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og de øvrige referenceår.

		Gns. absolut forskel					SD for absolut forskel				
		Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
Temperatur [°C]	Lund	3.6	3.3	3.4	3.4	3.5	2.7	2.5	2.6	2.8	2.6
	Bremerhaven	3.5	3.5	3.5	3.4	3.7	2.8	2.6	2.7	2.7	2.9
	Rostock	3.7	3.2	3.5	3.4	3.3	2.8	2.5	2.7	3.1	2.7
Sum af absolut forskel		10.8	10.0	10.3	10.2	10.6					
Relativ luftfugtighed [%]	Lund	11.0	10.8	11.2	11.1	11.0	9.6	10.0	9.9	9.8	9.6
	Bremerhaven	12.4	12.2	12.5	12.4	12.3	10.2	10.2	10.2	10.3	10.1
	Rostock	12.5	12.2	12.4	11.9	12.0	9.6	9.8	9.8	9.5	9.6
Sum af absolut forskel		35.9	35.2	36.1	35.4	35.3					
Vind hastighed [m/s]	Lund	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6
	Bremerhaven	2.9	2.8	2.9	2.8	2.8	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
	Rostock	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Sum af absolut forskel		8.1	8.0	8.0	7.9	7.8					
Horisontal regn [mm/h]	Lund	0.17	0.15	0.16	0.15	0.16	0.54	0.53	0.50	0.50	0.53
	Bremerhaven	0.15	0.14	0.15	0.14	0.15	0.51	0.52	0.49	0.48	0.51
	Rostock	0.15	0.14	0.15	0.14	0.15	0.52	0.53	0.50	0.49	0.52
Sum af absolut forskel		0.5	0.4	0.5	0.4	0.5					
Direkte normal stråling [W/m²]	Lund	128	126	122	127	118	222	220	213	222	210
	Bremerhaven	111	110	106	110	105	196	193	186	191	186
	Rostock	126	122	120	119	123	220	212	210	209	214
Sum af absolut forskel		365.8	358.3	347.8	356.4	346.0					
Diffus horisontal stråling [W/m²]	Lund	29	29	29	29	29	51	51	50	52	53
	Bremerhaven	29	28	27	29	28	50	51	48	51	50
	Rostock	28	27	28	27	28	47	46	47	46	47
Sum af absolut forskel		85.2	84.5	83.5	85.1	85.3					
Langbølget modstråling [W/m²]	Lund	31	30	31	32	31	20	20	21	20	20
	Bremerhaven	30	30	30	29	31	22	21	22	22	22
	Rostock	43	42	43	42	42	26	25	25	26	25
Sum af absolut forskel		103.9	102.3	103.4	102.5	104.5					

Grønne markeringer viser hvilken af de fem danske referenceår der har størst lighed med de øvrige referenceår ift. den pågældende klimaparameter. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. de øvrige referenceår.

4.3.4 Delkonklusion

Analysen synes umiddelbart ikke at indikere, at der skulle være afgørende forskelle mellem de fem danske referenceår. De største afvigelser blev observeret for referenceår 1, hvilket havde den største årlige mængde horisontal regn og mere vind fra østlige retninger, set ift. de andre referenceår.

Overordnet set, ved sammenligning af absolutte forskelle for hver klimaparameter, blev det observeret, at referenceår 1 havde de mindste ligheder med de tre øvrige referenceår, mens referenceår 2 havde de største ligheder (se TABEL 9). Det blev ligeledes observeret, at der for flere af de danske referenceår generelt var meget små forskelle ift. værdierne for de gennemsnitlige absolutte forskelle. Yderligere fremgår det, hvis de akkumulerede grafer for klimaparametrene betragtes, at der ligeledes ikke synes at være betydelige forskelle mellem de fem danske referenceår over tid, dog med undtagelse af den samlede mængde regn (se FIGUR 8-14).



5

SIMULERING MED REFERENCEÅR



5 SIMULERING MED REFERENCEÅR

Der udføres simuleringer med de hygrotermiske simuleringssystemer WUFI® Pro og DELPHIN, for at kunne verificere de nyligt oprettede Danske hygrotermiske referenceår. WUFI® Pro og DELPHIN er begge simuleringssystemer, der kan analysere konstruktioner og materialers virke igennem kombinerede varme og fugttransport beregninger. Modellerne opbygges af materialelag med definerede egenskaber, og defineret inde- og udeklima. Simuleringerne udføres med henblik på først at verificere brugbarheden af referenceårenes opsætning i begge simuleringssystemer, og dernæst for at konstatere validiteten ved sammenligning af resultater med tilsvarende simuleringer, opbygget med eksisterende referenceår fra hhv. Lund, Bremerhaven og Rostock – i WUFI® Pro simuleres ydermere med referenceår fra Hamborg. Disse lokationer er valgt ud fra deres beliggenhed, og det er disse referenceår der hidtil er benyttet i simuleringer af konstruktioner i Danmark, pga. manglen på det komplette danske referenceår. I WUFI® Pro simuleres en tung ydervæg, en let ydervæg, og en tagkonstruktion. I DELPHIN simuleres fire massive murstensvægge, isoleret indvendigt med tre forskellige isoleringssystemer. DELPHIN simuleringerne sammenlignes med målinger for maj 2015 til maj 2019, hvilket var inden for perioden der blev anvendt til udarbejdelsen af de fem nye referenceår (2001-2019, fratrukket 2010). Formålet var at validere DELPHIN simuleringerne sammenligning med kendte nærliggende referenceår og med målte data fra et felt forsøg.

5.1 Risiko for skimmelsvampevækst

Til vurdering af risiko for skimmelsvampevækst blev fugt- og temperaturforholdene i væg- og tagkonstruktionerne evalueret med den matematiske VTT skimmelvækst modellen (Hukka & Viitanen, 1999; Ojanen et al., 2010). Skimmelvækst modellen anvendes for at evaluere den kombinerede effekt af fugt- og temperaturforholdene over tid, fremfor kun at kigge på parametrene enkeltvist. Outputet fra model er skimmel indekset (M), der spænder fra 0 til 6, hvor 0 svarer til ingen skimmelsvampevækst og 6 til kraftig vækst (100 % dækning af overfladen). Værdierne 3-6 betyder, at væksten er inden for det visuelle område.

Til evalueringen er det nødvendigt at angive, hvor sensitive materialerne er overfor skimmelsvampevækst.

WUFI resultater: VTT-modellen beregnes i den lette ydervægskonstruktion og i tagkonstruktionen for både risiko med sensitivitetensværdi sat til "medium resistent" (svarende til mineraluld) og "meget følsom" (svarende til træbaserede materialer). Dette skyldes, at der i den lette ydervægskonstruktion og i tagkonstruktionen er steder, hvor mineraluld og træ (lægter) ligger side om side i de områder, der betragtes i simuleringen. For den tunge ydervæg beregnes kun med sensitivitetensværdi sat til "medium resistent" for mineraluld.

DELPHIN resultater: For skillefladen mellem murværk og indvendig isolering (punkt 3, se FIGUR 26-31) blev der anvendt en sensitivitetensværdi sat til "medium resistent" med en reduktionsfaktor sat til "relativt lav". Dette svarer til, at materialerne i skillefladen er cement eller plastik baserede, hvilket er tilfældet for alle fire vægkonstruktioner. For de indlejrede træelementer (punkt 5 og 6, se FIGUR 30) blev der anvendt en sensitivitetensværdi sat til "meget følsom" med en reduktionsfaktor sat til "træ recession", svarende til træbaserede materialer.

5.2 WUFI simuleringer – typiske konstruktioner

WUFI® Pro simuleringerne udføres som 1D simuleringer, og på tre forskellige typiske konstruktioner, hhv. en let ydervæg, en tung ydervæg og en tagkonstruktion. Simuleringerne udføres i to orienteringer, hhv. sydvest (den mest udsatte retning for slagregn i Danmark), og nord (retningen hvor der forekommer mindst udtørring ved solstråling og solopvarmning). Med undtagelse af tagkonstruktionen, fordi denne simuleres som et fladt tag. Konstruktionerne beskrives i afsnit 5.2.1, 5.2.2 og 5.2.3, og herunder beskrives konstruktionernes geometri, materiale, koefficienter og lokationer, der defineres til bestemmelse af temperatur og relativ fugtighed. Alle modellerne simuleres i begge retninger med de konstruerede 5 referenceår for Danmark, samt de omtalte, nærliggende byer hhv. Lund, Bremerhaven, Rostock og Hamborg. Alle modellerne er udført med standard startbetingelser – således 20°C og 80% relativ fugtighed. Alle simuleringerne er udført over 3 år, med påbegyndelse i 01.01.2021 – tagkonstruktionen dog over 4 år. Referenceårene for udeklima dækker et år, og disse gentages cyklisk for hvert simuleringsår. Indeklimaet defineres af ISO13788, i fugtbelastningsklasse 3. Heri tilpasses fugtigheden i indeklimaet efter udeklimaet automatisk, og temperaturen sættes til konstant 20°C.

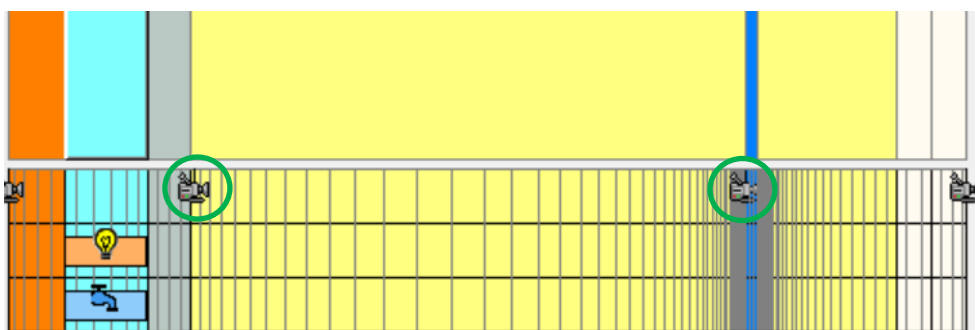
5.2.1 Let vægkonstruktion

Den lette vægkonstruktion er opbygget som beskrevet i TABEL 10. Væggen defineres til at være vertikal, og på en lav bygning (<10m). Væggen er opbygget på traditionel vis som følger (ude fra og ind); en ydre beklædning af træ, en ventileret luftspalte, en fibergipsplade, isolering af mineraluld, dampspærre, isolering af mineraluld og 2 lag gips – dette fremgår også på FIGUR 15.

TABEL 10. Modelopbygning af let ydervæg til WUFI® Pro simulering, og udvalgte materialeparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Materiale id ift. WUFI® Pro materiale database	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Porøsitet, P [m ³ /m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ [-]
Træ	Spruce, radial	0,020	455	0,73	0,09	130
Luft	Air layer, 30mm; without additional moisture capacity	0,030	1,3	0,999	0,18	0,46
Fibergips	FERMACELL Gypsum Fibreboard	0,015	1153	0,52	0,32	16
Mineraluld	ISOVER GW Integra ZSF – 032	0,200	30	0,95	0,032	1
Dampspærre	PE-Membrane (Poly; 0.07 perm)	0,001	130	0,001	2,3	50000
Mineraluld	ISOVER GW Integra ZSF - 032	0,050	30	0,95	0,032	1
Gips	Gypsum Board	0,0250 (2x0,0125)	850	0,65	0,2	8,3

På FIGUR 15. fremstår lagdelingen af den lette ydervæg til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre. De lokationer der er markeret (hhv. yderside af isolering og inder-side af isolering mod dampspærre), er de værdier som sammenlignes for de respektive referenceår (temperatur og relativ fugtighed), og disse lokationer hvorpå der beregnes skimmelindeks for sammenligning.

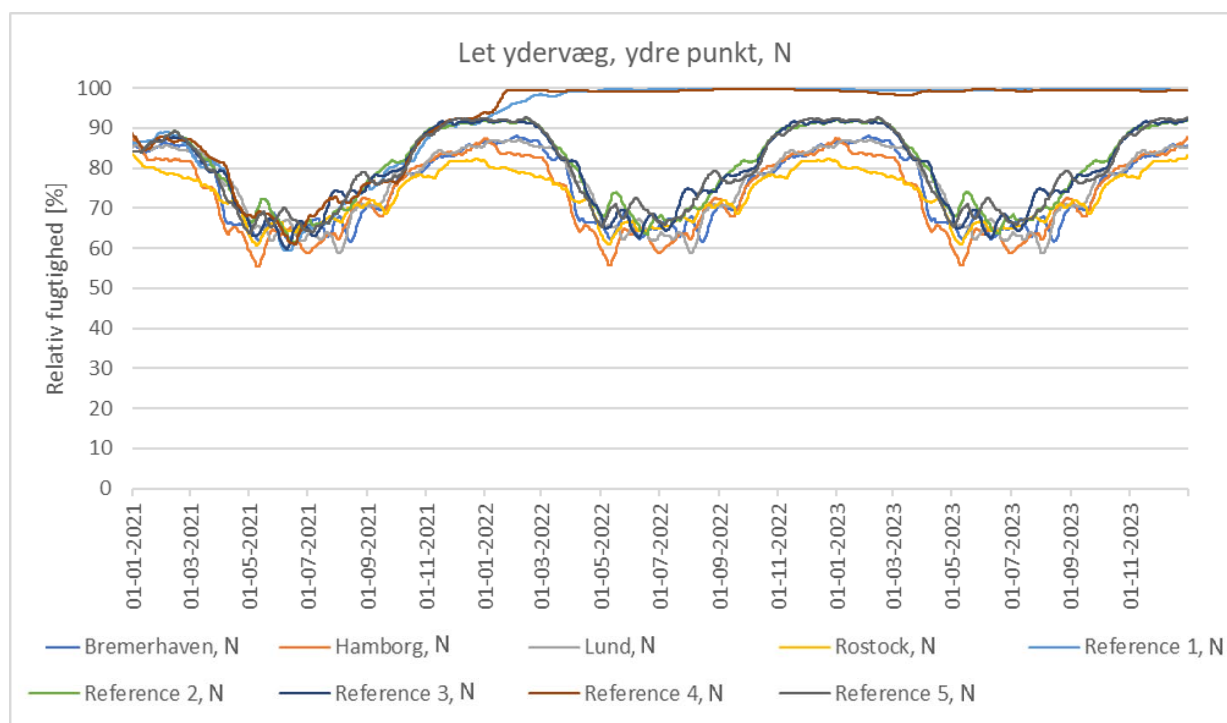


FIGUR 15. Model opbygning af let ydervæg til simulering i WUFI® Pro. Grønne ringe angiver kritiske områder for skimmelvækst.

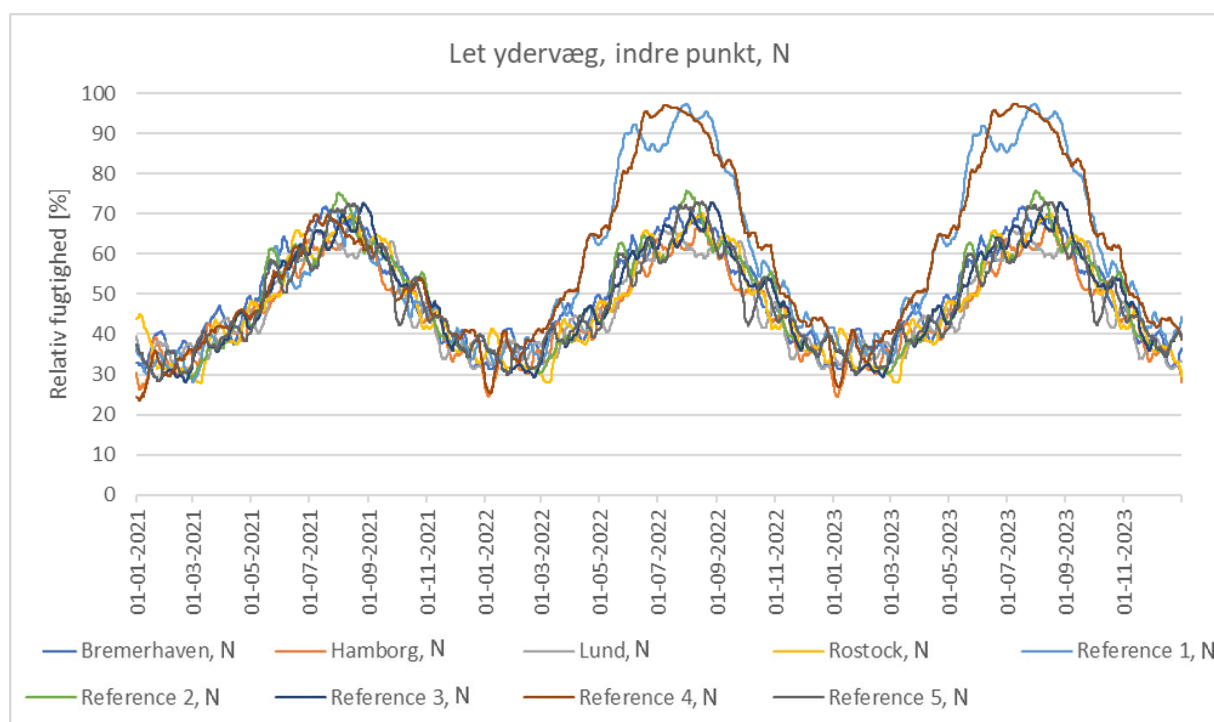
Resultater fra WUFI® simulering af let ydervæg

For den lette ydervægskonstruktion, sammenlignes den relative fugtighed genereret med WUFI® Pro simulering, med de beskrevne klimafile, i de punkter der er markeret i FIGUR 15 – hhv. et ydre og et indre punkt. Resultaterne vises som 14 dages løbende gennemsnit. Alle modellerne viser gode resultater i forhold til konvergens og balance (Zirkelbach et al., 2007), med undtagelse af simulering med klimafile for Referenceår 1 og 4 i nordvendt retning. Der blev ligeledes kigget på vandindholdet i konstruktionen, hvor det blev observeret at modellerne simuleret med referenceår 2, 3 og 5 opnåede periode stationære forhold inden for den simulerede periode. Derimod blev der ikke observeret periode stationære forhold i modellerne simuleret med referenceår 1 og 4. Disse kan derfor negligeres i sammenligning, da modellen af uvisse årsager udviser fejl (modeller er nøjagtig de samme som de sydvestvendte, blot med ændret orientering). Resultaterne fra simulering i nordlig retning præsenteres i FIGUR 16 og FIGUR 17, mens resultaterne fra sydvestlig retning præsenteres i FIGUR 18 og FIGUR 19. Det fremgår af figurerne FIGUR 16 og FIGUR 17, at referenceårene 1 og 4 skiller sig ud – det var disse modeller som gav konvergensfejl ved simulering af den lette ydervæg i nordlig retning. Af de øvrige simuleringsresultater, både i nordlig og sydvestlig retning, fremgår det, at de nye danske referenceår i det ydre punkt, i begge retninger udviser højere relativ fugtighed end hhv. Bremerhaven, Hamborg, Lund og Rostock (5-15%-points) i kolde sæsoner. Den største forskel findes i den nordlige retning mellem Rostock og de danske referenceår, mens det i sydvestlig retning er både Rostock og Bremerhaven, der udviser størst forskel. De danske referenceår ligger meget ens i yderpunkterne, begge retninger, i de kolde sæsoner. For de varme sæsoner, er der større udsving i den relative fugtighed i de ydre punkter for alle de simulerede klimaer, og her findes ikke lige så tydelige forskelle. Dog er nogle udsving modsat rettede, som giver en forskel på op mod 20%-points, men kun i korte perioder/peaks. Tendenserne er de samme, og de relativt små forskelle i klimaparametre, der beskrives i afsnit 4.3, forårsager disse individuelle udsving, som dog ikke er af

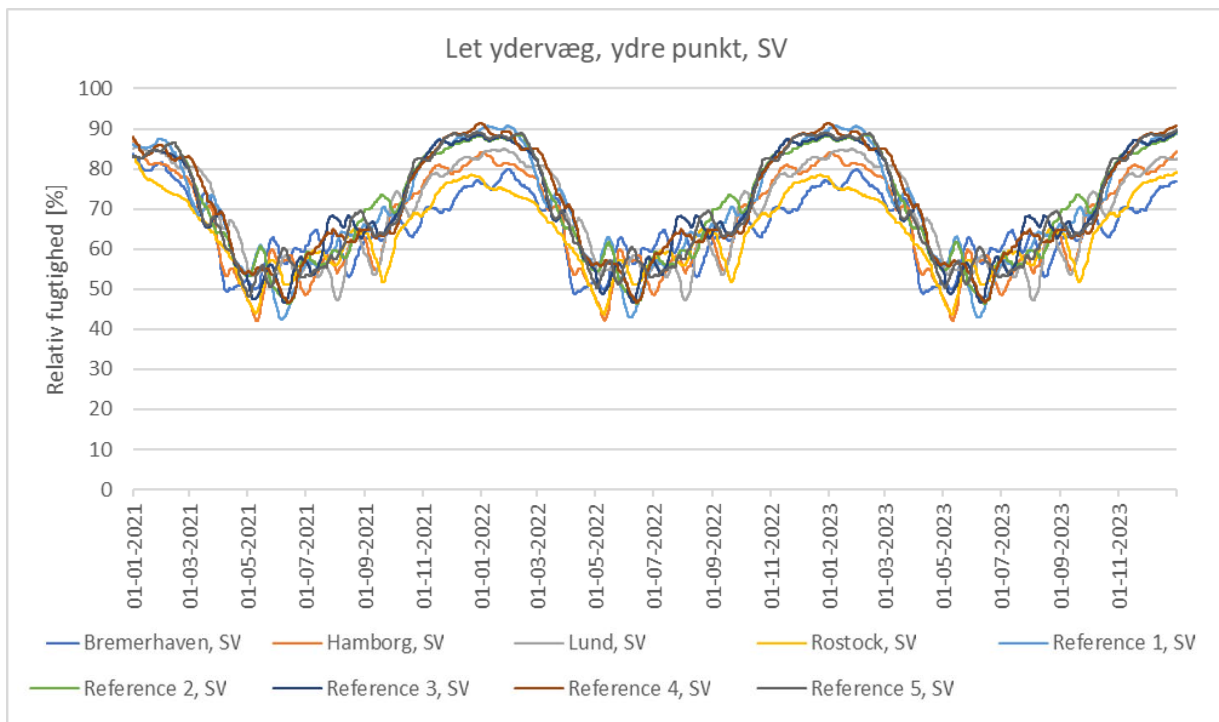
større betydning. I det indre punkt, for begge retninger, ses samme tendenser for alle de anvendte klimaer, og en afvigelse på omkring 10%-points for hele simuleringsperioden.



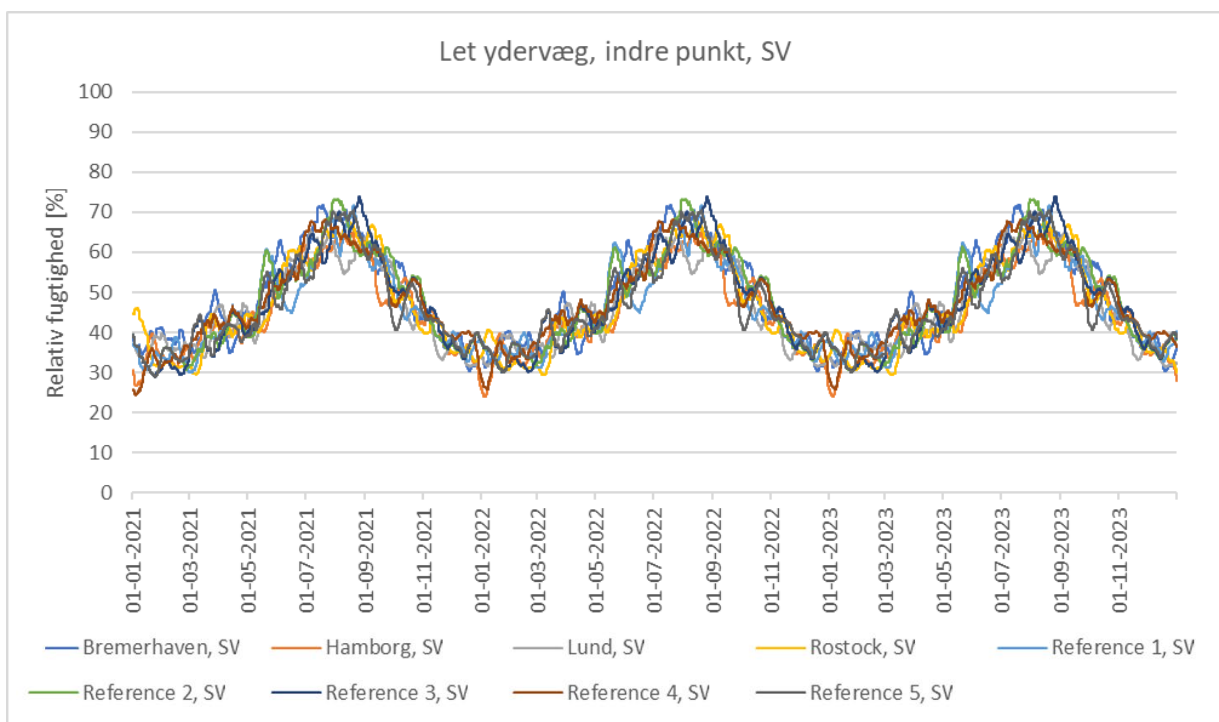
FIGUR 16. Simuleringsresultater af Let ydervæg, i det ydre punkt, nordlig retning.



FIGUR 17. Simuleringsresultater af Let ydervæg, i det indre punkt, nordlig retning.



FIGUR 18. Simuleringsresultater af Let ydervæg, i det ydre punkt, sydvestlig retning.



FIGUR 19. Simuleringsresultater af Let ydervæg, i det indre punkt, sydvestlig retning.

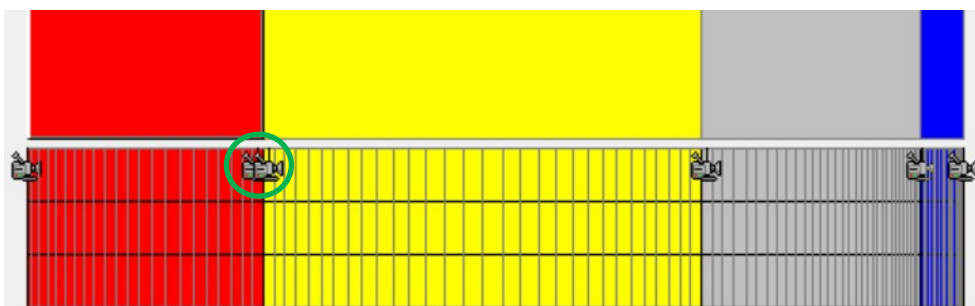
5.2.2 Tung vægkonstruktion

Den tunge vægkonstruktion er opbygget som beskrevet i TABEL 11. Væggen defineres til at være vertikal, og på en lav bygning (<10m). Væggen er opbygget som en hulmur på traditionel vis som følger (ude fra og ind); ½-stens tegl, isolering af mineraluld, porebeton og indvendig puds/mørtel – dette fremgår også på FIGUR 20.

TABEL 11. Modelopbygning af tung ydervæg til WUFI® Pro simulering, og udvalgte materialeparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Materiale id ift. WUFI® Pro materiale database	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Porøsitet, P [m ³ /m ³]	Varmelednings- evne, λ [W/mK]	Vanddamp- diffusionsmod- stands faktor, μ [-]
Tegl	Solid Brick Masonry	0,108	1900	0,24	0,6	10
Mineral- uld	Mineral Wool (heat cond.: 0,04 W/mK)	0,200	60	0,95	0,04	1,3
Pore-be- ton	Aerated Concrete (density: 600 kg/m ³)	0,100	600	0,72	0,14	8,3
Puds	Mortar (historical): Lime + Gypsum	0,020	1571	0,39	0,82	9,6

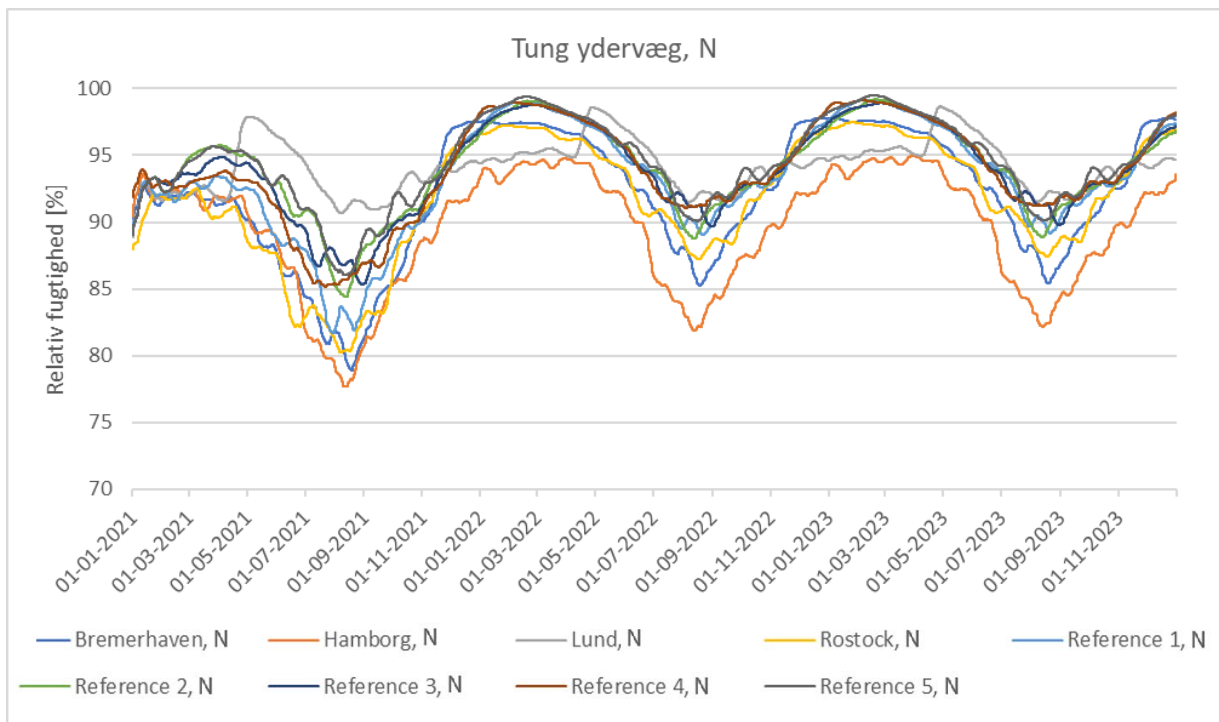
På FIGUR 20 fremstår lagdelingen af den tunge ydervæg til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre. Den lokation der er markeret (yderside af isolering), er de værdier som sammenlignes for de respektive referenceår (temperatur og relativ fugtighed), og den lokation hvorpå der beregnes skimmelindeks for sammenligning.



FIGUR 20. Model opbygning af tung ydervæg til simulering i WUFI® Pro.

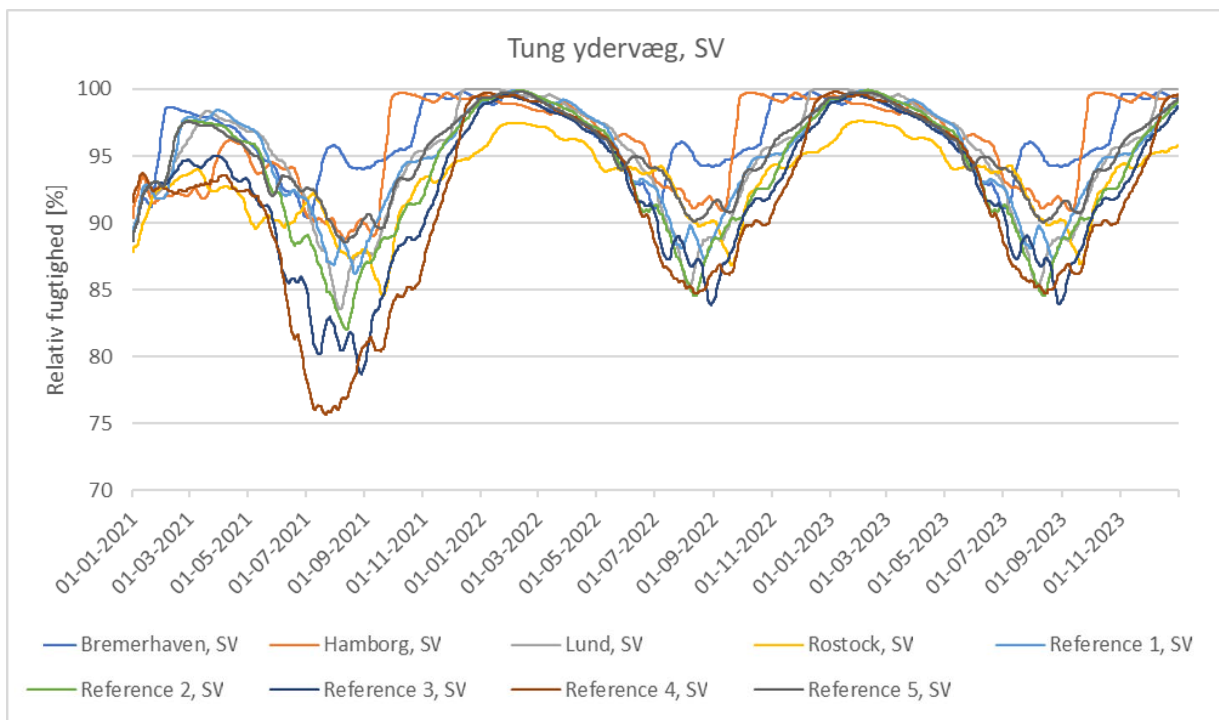
Resultater fra WUFI® Pro simulering af tung ydervæg

For den tunge ydervægskonstruktion, sammenlignes den relative fugtighed genereret med WUFI® Pro simulering, med de beskrevne klimafilere, i det punkt der er markeret i FIGUR 20. Resultaterne vises som 14 dages løbende gennemsnit. Alle modellerne viser gode resultater i forhold til konvergens og balance (Zirkelbach et al., 2007). I den tunge ydervæg, opnås ligevægt efter første års simulering, hvorfor 2. og 3. simuleringsår betragtes. For den tunge ydervæg i nordlig retning, viser resultaterne, præsenteret i FIGUR 21, en generel tendens med lignende sæsonmæssige variationer i alle simuleringer. Hamborg, Bremerhaven og Rostock udviser lavest relativ fugtighed i punktet om sommeren, og Lund det højeste. De danske referenceår ligger således i de varme perioder mellem det svenske (Lund) og de øvrige tyske referenceår (hhv. Hamborg, Bremerhaven og Rostock) – variationen er omkring 10% RF. Om vinteren udviser simuleringerne med de danske referenceår de højeste relative fugtigheder i punktet, op til 99%, hvilket er 5% højere end den lavest opnåede relative fugtighed, fra Hamborg. Om vinteren er forskellen mellem hhv. Bremerhaven og Rostock og de danske klimafilere (som ligger meget ens), kun 2%.



FIGUR 21. Simuleringsresultater af Tung ydervæg, i nordlig retning. Bemærk x-aksen er fra 70-100%.

I sydvestlig retning, se FIGUR 22, findes anderledes tendenser i resultaterne ift. nordlig retning. Her ligger alle simuleringsresultaterne stort set ens (99-100%) i kolde sæsoner, med undtagelse af Rostock som ligger 2-2,5% lavere. Resultaterne viser desuden, at i varme sæsoner udviser Bremerhaven og Hamburg de højeste relative fugtigheder, mens de danske referenceår og Lund ligger inden for samme 5%. Dette er dog undtaget referenceår 5, som udviser lidt højere relativ fugtighed om sommeren.



FIGUR 22. Simuleringsresultater af Tung ydervæg, i sydvestlig retning. Bemærk x-aksen er fra 70-100%.

5.2.3 Tagkonstruktion

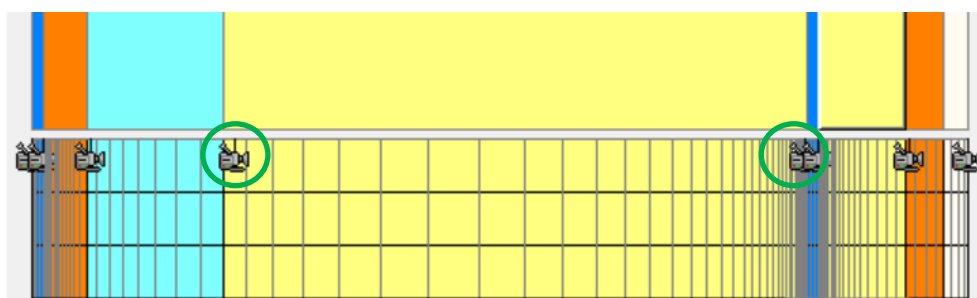
Tagkonstruktionen er opbygget som beskrevet i TABEL 12. Taget er defineret som fladt, med en hældning på 0°. taget er opbygget på traditionel vis som følger (ude fra og ind); tagpap, krydsfiner, luftrum, isolering af mineraluld, en dampspærre, isolering af mineraluld, en ydre beklædning af træ, en ventileret luftspalte, en fibergipsplade, isolering, dampspærre, isolering af mineraluld og 2 lag gips – dette fremgår også på FIGUR 23.

TABEL 12. Modelopbygning af tagkonstruktion til WUFI® Pro simulering, og udvalgte materialeparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Materiale id ift. WUFI® Pro materiale database	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Porøsitet, P [m ³ /m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstands faktor, μ [-]
Tagpap	Roof Membrane V13	0,001	2400	0,001	0,5	100000
Krydsfiner	Plywood Board	0,022	500	0,5	0,1	700
Luft	Air layer 50mm*	0,070	1,3	0,999	0,28	0,32
Mineraluld	ISOVER GW Integra ZKF - 035	0,300	21	0,95	0,035	1
Dampspærre	PE-Membrane (Poly; 0.07 perm)	0,001	130	0,001	2,3	50000
Mineraluld	ISOVER GW Integra ZKF - 035	0,045	21	0,95	0,035	1
Nåletræ	Softwood	0,019	400	0,73	0,09	200
Gips	Gypsum Board	0,013	850	0,65	0,2	8,3

*Manuelt indstillet til 50 mm

På FIGUR 23 fremstår lagdelingen af tagkonstruktionen til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre. De lokationer der er markeret (hvv. yderside af isolering og på udvendig side af dampspærre), er de værdier som sammenlignes for de respektive referenceår (temperatur og relativ fugtighed), og de lokationer hvorpå der beregnes skimmelindeks for sammenligning.

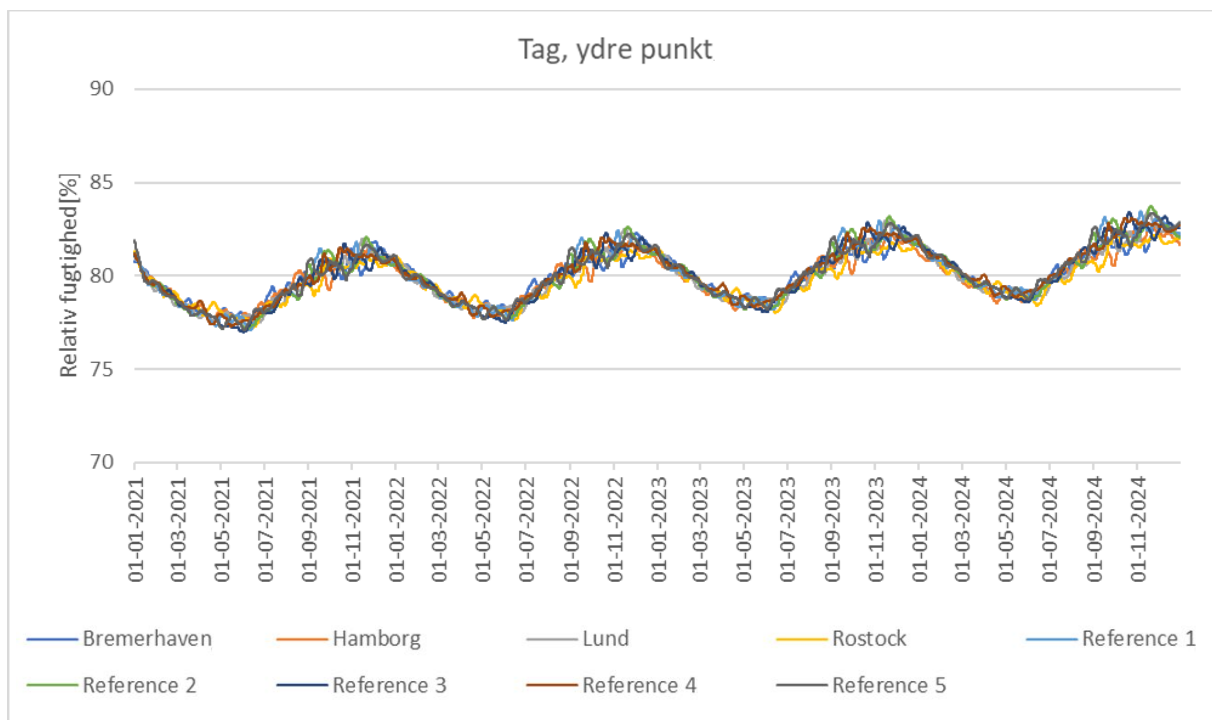


FIGUR 23. Model opbygning af tagkonstruktion til simulering i WUFI® Pro. Venstre side er overside af tagkonstruktion.

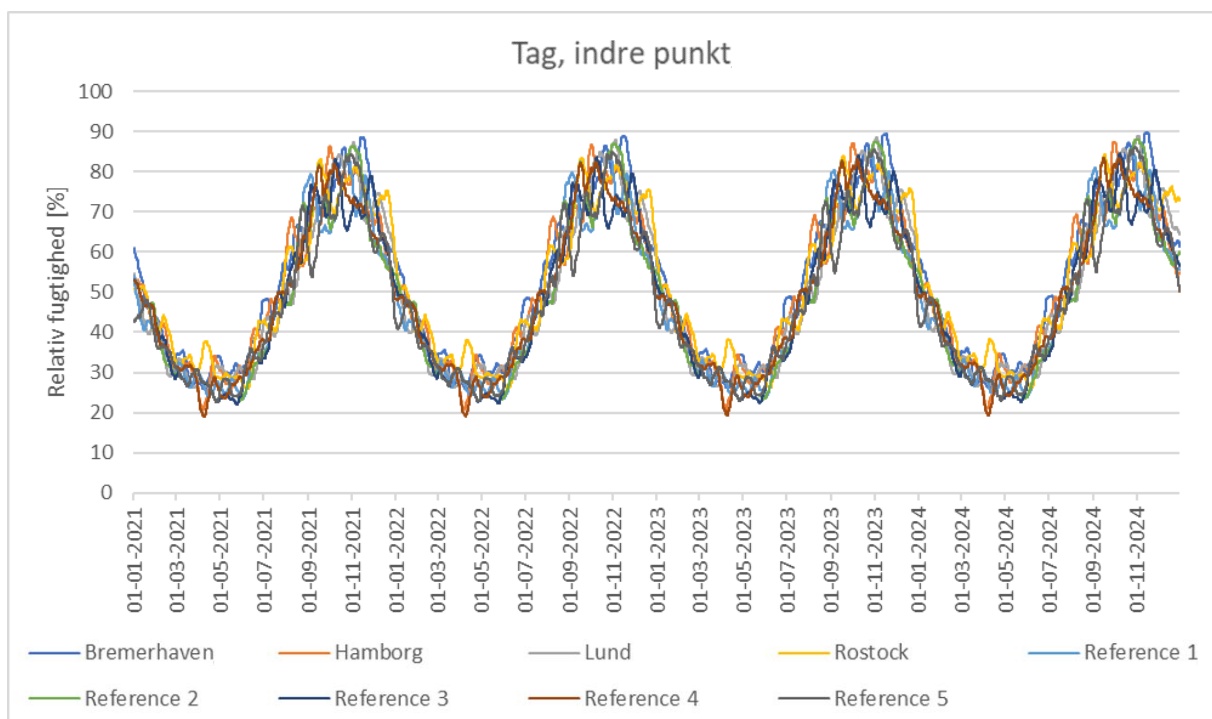
Resultater fra WUFI® Pro simulering af tagkonstruktion

For tagkonstruktionen, sammenlignes den relative fugtighed genereret med WUFI® Pro simulering, med de beskrevne klimafilere, i de punkter der er markeret i FIGUR 23 – hhv. et ydre og et indre punkt. Resultaterne vises som 14 dages løbende gennemsnit. Alle modellerne viser gode resultater i forhold til konvergens og balance (Zirkelbach et al., 2007). For den flade tagkonstruktion, viser FIGUR 24 relativ fugtighed for det ydre punkt, og FIGUR 25 for det indre punkt. I det ydre punkt fluktuerer den relative fugtighed mellem 77%(sommer) og 82% (vinter). Trods de små forskelle, er der størst variation i efterår/vinter, men her med

en forskel på højst 3% mellem referenceår. I det indre punkt observeres sæsonvariationer fra 20% relativ fugtighed (sommer) til 90% relativ fugtighed (vinter). Også her fremgår størst variation i efterår/vinter, hvor der forekommer periodevist op til 20% forskel i relativ fugtighed mellem referenceår – fx referenceår 3 og referenceår 2. Disse forskelle opnås dog kun kortvarigt, da forholdene fluktuerer væsentligt i korte perioder.



FIGUR 24. Simuleringsresultater af tagkonstruktionen, ydre punkt. Bemærk x-aksen er fra 70-90%.



FIGUR 25. Simuleringsresultater af tagkonstruktionen, indre punkt.

Generelle observationer

Simuleringerne udviser generelt lignende forhold i de udvalgte punkter for de danske referenceår, og de hhv. tyske og det svenske. De danske referenceår udviser resultater, der viser lignende tendenser og sæsonmæssige variationer. I den lette og tunge ydervæg fremgår det, at de danske referenceår generelt giver anledning til højere fugt end de tyske og svenske klimaer i de simulerede punkter (ydre punkter for den lette ydervæg) i kolde sæsoner. De danske referenceår simuleres relativt ens, men der følger enkelte bemærkning; referenceår 5 skiller sig lidt ud fra de øvrige danske referenceår i den tunge ydervæg mod SV, hvilket indikerer betydningen af vindhastigheden i forhold til slagregn.

Temperatur og relativ fugtighed - absolutte forskelle

TABEL 13 viser de absolutte forskelle mellem simuleringresultaterne (temperatur og relativ fugtighed) mellem de danske referenceår og de tyske- og det svenske referenceår. Fra TABEL 13 fremgår det at for temperaturresultaterne, at der generelt er de mindste forskelle mellem de tyske- og det svenske referenceår og det danske referenceår 4. Hvorimod for relativ fugtighedsresultaterne, blev det observeret at det danske referenceår 5 havde de bedste ligheder med de tyske- og det svenske referenceår. Der var generelt ikke betydelige forskelle mellem de fem danske referenceår ift. temperatur, mens for den relative fugtighed var totalsummen af de absolutte forskelle relativt ens for referenceår 2, 3 og 5.

TABEL 13. Temperatur og relative fugtighed: absolutte forskelle mellem danske referenceår og referenceår fra nærliggende målestationer. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og referenceår fra nærliggende målestationer.

		Temperatur					Relativ fugtighed				
		Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5
Let ydervæg ext, SV	Bremerhaven	4,69	4,56	4,81	4,48	4,76	9,40	9,12	8,80	9,00	9,02
	Hamborg	4,40	4,59	4,27	3,93	4,11	7,12	6,92	6,45	6,98	6,04
	Lund	4,18	4,06	4,18	4,16	4,08	6,44	6,21	6,63	6,34	6,00
	Rostock	4,58	4,06	4,36	4,08	4,12	8,62	8,44	7,89	8,47	7,91
	Sum af ABS forskel	17,85	17,28	17,63	16,65	17,08	31,58	30,69	29,76	30,79	28,97
Let ydervæg ext, N	Bremerhaven	3,51	3,47	3,51	3,36	3,71	17,74	5,49	5,46	17,76	5,47
	Hamborg	3,40	3,43	3,32	2,96	3,28	19,24	7,03	6,80	19,40	6,59
	Lund	3,32	3,06	3,18	3,13	3,31	17,16	5,02	5,16	17,26	5,05
	Rostock	3,53	3,09	3,41	3,10	3,23	19,45	7,23	7,08	19,49	6,91
	Sum af ABS forskel	13,76	13,06	13,42	12,55	13,53	73,59	24,76	24,50	73,91	24,02
Let ydervæg int, SV	Bremerhaven	1,08	1,04	1,10	1,03	1,09	9,26	8,75	9,31	8,52	9,39
	Hamborg	1,00	1,04	0,97	0,91	0,93	8,54	9,03	8,15	7,42	8,18
	Lund	0,95	0,92	0,95	0,95	0,92	8,25	7,98	8,33	8,07	8,83
	Rostock	1,05	0,92	0,99	0,93	0,94	8,40	7,51	7,83	7,83	7,50
	Sum af ABS forskel	4,07	3,93	4,00	3,82	3,88	34,46	33,27	33,62	31,84	33,90
Let ydervæg int, N	Bremerhaven	0,85	0,78	0,78	0,81	0,83	12,26	7,01	7,05	12,32	7,78
	Hamborg	0,81	0,76	0,74	0,71	0,73	13,93	7,36	6,79	13,75	6,92
	Lund	0,80	0,69	0,71	0,76	0,74	13,45	6,72	6,76	13,78	7,63
	Rostock	0,85	0,69	0,76	0,76	0,72	13,28	6,02	6,48	13,78	6,37
	Sum af ABS forskel	3,31	2,91	2,99	3,05	3,02	52,91	27,10	27,09	53,64	28,70
Tag ext	Bremerhaven	3,99	3,92	4,00	3,76	4,16	0,70	0,72	0,75	0,66	0,73
	Hamborg	3,91	4,02	3,79	3,49	3,76	0,70	0,73	0,68	0,57	0,67
	Lund	3,74	3,53	3,61	3,64	3,70	0,67	0,62	0,63	0,63	0,64
	Rostock	4,08	3,63	3,88	3,59	3,75	0,70	0,63	0,69	0,62	0,67
	Sum af ABS forskel	15,73	15,09	15,28	14,48	15,37	2,77	2,70	2,75	2,47	2,71
Tag int	Bremerhaven	0,79	0,76	0,77	0,73	0,80	8,28	8,49	8,73	7,77	8,82
	Hamborg	0,75	0,78	0,72	0,68	0,71	8,34	8,35	7,81	6,61	7,74

	Lund	0,71	0,68	0,68	0,71	0,70	8,11	7,14	7,65	7,04	7,74
	Rostock	0,77	0,69	0,73	0,68	0,71	9,01	7,57	8,63	7,10	7,83
Sum af ABS forskel		3,02	2,90	2,90	2,80	2,92	33,73	31,55	32,83	28,52	32,13
Tung ydervæg N	Bremerhaven	3,33	3,31	3,35	3,19	3,56	1,71	2,49	2,29	2,12	2,76
	Hamborg	3,24	3,27	3,17	2,78	3,14	3,95	4,68	4,55	4,43	5,15
	Lund	3,17	2,93	3,05	2,96	3,18	2,69	2,13	2,18	2,44	2,08
	Rostock	3,42	2,93	3,25	2,95	3,09	1,70	2,36	2,18	2,11	2,75
Sum af ABS forskel		13,16	12,44	12,81	11,87	12,96	10,05	11,65	11,20	11,10	12,74
Tung ydervæg SV	Bremerhaven	4,15	4,03	4,35	3,94	4,26	2,34	3,07	4,13	5,14	1,94
	Hamborg	4,01	4,21	3,86	3,47	3,69	2,29	3,12	3,91	4,69	1,88
	Lund	3,75	3,67	3,81	3,77	3,72	1,05	1,41	2,56	3,34	1,36
	Rostock	4,26	3,68	4,02	3,70	3,74	2,52	2,54	2,49	3,41	2,15
Sum af ABS forskel		16,17	15,59	16,04	14,88	15,40	8,21	10,15	13,09	16,58	7,34
Totalsum		87,06	83,21	85,06	80,09	84,16	247,3	171,86	174,84	248,86	170,51

Grønne markeringer viser hvilken af de fem danske referenceår der har størst lighed med referenceår for de nærliggende målestationer ift. den pågældende klimaparameter. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. de nærliggende målestationer.

VTT skimmelmodel for sammenligning

For yderligere sammenligning, og inklusion af temperatur registreringer, beregnes skimmelrisikoen med VTTs skimmelmodel - således indregnes både temperaturen og den relative fugtighed. VTT-modellen beregnes i den lette ydervægskonstruktion og i tagkonstruktionen for både risiko i mineraluld, og i træ (lægter), da disse har forskellige sensitivitetsskategorier, og begge elementer kan indgå i de områder der betragtes i simuleringen. For den tunge ydervæg beregnes kun skimmelrisiko i mineraluld. Resultaterne af VTT modellen præsenteres i hhv. TABEL 14 (mineraluld) og TABEL 15 (træ). Af TABEL 14 fremgår, at der findes størst skimmelindeks i den lette ydervæg, nordlig retning. Men disse modeller var præget af konvergensfejl. Dermed findes størst skimmelrisiko i den tunge ydervæg, på bagsiden af formuren, hvor der opnås skimmelindeks på nordsiden op til 2,3 (Lund), 2,1 (referenceår 5) og 2,0 (referenceår 4). Skimmelrisikoen er dog størst i den tunge ydervæg mod sydvest, og her opnås skimmelindeks op til hhv. 3,2 (Bremerhaven), 2,6 (Lund), 2,5 (referenceår 5), 2,4 (referenceår 1) og 2,2 (Rostock). Det bør nævnes at den tunge ydervæg er en meget velafprøvet konstruktion i Danmark som ikke typisk giver anledning til fugt problemer.

TABEL 14. Beregnet skimmelindeks for simuleringresultater med alle simulerede referenceår og observationspunkter for mineraluld. Skimmelindekset præsenteres som Gennemsnitsværdi, maksimum værdi, og standardafvigelse.

		Bremerhaven	Lund	Rostock	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5
Gennemsnit VTT skimmel index, \bar{M}_{VTT}	Let ydervæg ext, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg ext, N	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3	0,0
	Let ydervæg int, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg int, N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
	Tag ext	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Tag int	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Tung ydervæg N	0,6	1,2	0,6	0,5	0,8	0,8	0,8	1,0
	Tung ydervæg SV	2,0	1,3	1,1	1,3	0,9	0,5	0,5	1,3
Max VTT skimmel index, M_{VTT}	Let ydervæg ext, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg ext, N	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	3,4	0,0
	Let ydervæg int, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg int, N	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,4	0,0
	Tag ext	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Tag int	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Tung ydervæg N	1,5	2,3	1,5	1,5	1,8	1,8	2,0	2,1
	Tung ydervæg SV	3,2	2,6	2,2	2,4	1,8	1,2	1,3	2,5

Standard afvigelse	Let ydervæg ext, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg ext, N	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3	0,0
	Let ydervæg int, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg int, N	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
	Tag ext	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Tag int	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Tung ydervæg N	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7
	Tung ydervæg SV	1,1	0,8	0,7	0,8	0,6	0,4	0,4	0,8

Røde tal er resultater der er fejlbehæftede ift. konvergensfejl.

I de træbaserede materialer, indgår ikke den tunge ydervæg, da der her ikke indgår træelementer. For den lette ydervæg, og tagkonstruktionen, opnås ikke nævneværdige skimmelindeks, udover for de ugyldige modeller for den lette ydervæg i nordlig retning (referenceår 1 og referenceår 4).

TABEL 15. Beregnet skimmelindeks for simuleringsresultater med alle simulerede referenceår og observationspunkter for træ. Skimmelindekset præsenteres som Gennemsnitsværdi, maksimum værdi, og standardafvigelse.

		Bremerhaven	Lund	Rostock	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5
Gennemsnit VTT skimmel index, M [-]	Let ydervæg ext, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg ext, N	0,0	0,0	0,0	3,4	0,1	0,1	3,6	0,1
	Let ydervæg int, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg int, N	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	2,1	0,0
	Tag ext	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Tag int	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
Max VTT skimmel index, M [-]	Let ydervæg ext, SV	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0
	Let ydervæg ext, N	0,0	0,0	0,0	6,0	0,4	0,5	6,0	0,5
	Let ydervæg int, SV	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Let ydervæg int, N	0,0	0,0	0,0	5,8	0,0	0,0	5,7	0,0
	Tag ext	0,8	0,9	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7
	Tag int	1,3	0,9	0,3	0,4	0,8	0,3	0,6	0,6
Standard afvigelse	Let ydervæg ext, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg ext, N	0,0	0,0	0,0	2,9	0,1	0,1	2,7	0,1
	Let ydervæg int, SV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Let ydervæg int, N	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	2,3	0,0
	Tag ext	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
	Tag int	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1

Røde tal er resultater der er fejlbehæftede ift. konvergensfejl.

For de 5 danske referenceår, sammenlignes det beregnede skimmelindeks med de 4 reference klimaer, hhv. Bremerhaven, Hamborg, Lund og Rostock, og den absolutte forskel på skimmelindeks angives i TABEL 16 (mineraluld) og TABEL 17 (træ). De referenceår der udviser mindst absolut forskel i skimmelindeks ift. de øvrige referenceår, markeres med grøn. For hver konstruktion og referenceår beregnes i øvrigt summen af den absolutte forskel for hvert referenceår, som angives i bunden af tabellen.

Fra TABEL 16 fremgår det, at de absolutte forskelle generelt var relativt små mellem referenceårene ($\Delta M < 1$). Kun i den lette ydervæg og den tunge ydervæg mod nordlig retning, blev der observeret ΔM værdier på over 1. I den lette ydervæg blev dette observeret for referenceår 1 og 4, hvilket var tilfældet ift. sammenhold med de øvrige referenceår. Disse høje

ΔM værdier skyldes som beskrevet ovenfor konvergensfejl i simuleringsmodeller. For den tunge ydervæg blev dette observeret for referenceår 2, 3 og 4, men kun ved sammenhold mod Bremerhaven og Hamborg, mens der var bedre lighed med Lund og Rostock. Overordnet set fremgår det af TABEL 16 at der er de største ligheder mellem de øvrige referenceår og det danske referenceår 5 (vist med blå markering under rækken "Totalsum"), tæt efterfulgt af referenceår 2 og 3.

Som for resultaterne i TABEL 16 fremgår det af TABEL 17 at, de største absolutte forskelle mellem de danske referenceår og de øvrige referenceår i den lette ydervæg mod nordlig retning. Derudover var der generelt relativt små absolutte forskelle mellem de danske referenceår og de øvrige referenceår for de andre konstruktionstyper og retninger.

Overordnet set fremgår det af TABEL 17, at der er de største ligheder mellem de øvrige referenceår og det danske referenceår 2 (vist med blå markering under rækken "Totalsum"), tæt efterfulgt af referenceår 5 og 3. Derved observeres det, at der er forskelle mellem hvilke af de danske referenceår, der har de største ligheder til de øvrige referenceår ift. hvilken sensitivitetsklasse, der anvendes i VTT modellen. Imidlertid er disse forskelle mellem sum og totalrum af de absolutte forskelle mellem referenceår 2, 3 og 5 generelt meget små. Derimod ses de største absolutte forskelle for referenceår 1 og 4, både med sensitivitetsklassen sat til mineraluld og til træ. Men disse heri er inkluderet de fejlbehæftede modeller med konvergensfejl og skimmelindeks op til 6.

Betragtes samlet de absolutte forskelle, og summeres forskellene for hhv. mineraluld og træ, findes den mindste absolutte forskel i referenceår 2 og 5, som derfor kan antages som et par gode udgangspunkter for viderearbejde med disse referenceår.

TABEL 16. Absolut forskel på simuleret skimmelrisiko og skimmelindeks i de betragtede målepunkter i sensitivitetsklasse mineraluld. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og referenceår for de nærliggende målestationer.

		VTT skimmel risiko i Mineral uld				
		Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
Let ydervæg ext, SV	Bremerhaven	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hamborg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Lund	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Rostock	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum af absolut forskel		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Let ydervæg ext, N	Bremerhaven	1,28	0,00	0,00	1,30	0,00
	Hamborg	1,28	0,00	0,00	1,30	0,00
	Lund	1,28	0,00	0,00	1,30	0,00
	Rostock	1,28	0,00	0,00	1,30	0,00
Sum af absolut forskel		5,11	0,00	0,00	5,20	0,00
Let ydervæg int, SV	Bremerhaven	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hamborg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Lund	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Rostock	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum af absolut forskel		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Let ydervæg int, N	Bremerhaven	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00
	Hamborg	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00
	Lund	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00
	Rostock	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00
Sum af absolut forskel		0,20	0,00	0,00	0,33	0,00
Tag ext	Bremerhaven	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hamborg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Lund	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Rostock	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum af absolut forskel		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tag int	Bremerhaven	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hamborg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Lund	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Rostock	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum af absolut forskel		0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Tung ydervæg, SV	Bremerhaven	0,07	0,21	0,22	0,27	0,40
	Hamborg	0,44	0,70	0,71	0,75	0,89
	Lund	0,66	0,40	0,39	0,35	0,21
	Rostock	0,06	0,23	0,24	0,28	0,42
Sum af absolut forskel		1,23	1,54	1,56	1,65	1,93
Tung ydervæg, N	Bremerhaven	0,72	1,13	1,52	1,51	0,66
	Hamborg	0,40	0,79	1,17	1,16	0,33
	Lund	0,08	0,49	0,87	0,86	0,05
	Rostock	0,21	0,23	0,59	0,58	0,28
Sum af absolut forskel		1,42	2,64	4,15	4,11	1,32
Totalsum		7,97	4,18	5,72	11,30	3,26

Grønne markeringer viser hvilken af de fem danske referenceår der har størst lighed med referenceår for de nærliggende målestationer ift. den pågældende klimaparameter. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. de nærliggende målestationer. Røde tal er resultater der er fejlbehæftede ift. konvergensfejl.

TABEL 17. Absolut forskel på simuleret skimmelrisiko og skimmelindeks i de betragtede målepunkter i sensitivitetssklasse træ. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og referenceår for de nærliggende målestationer.

		VTT skimmel risiko i Træ elementer				
		Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
Let ydervæg ext, SV	Bremerhaven	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Hamborg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Lund	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Rostock	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum af absolut forskel		0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
Let ydervæg ext, N	Bremerhaven	3,45	0,07	0,08	3,64	0,08
	Hamborg	3,45	0,07	0,08	3,64	0,08
	Lund	3,45	0,07	0,08	3,64	0,08
	Rostock	3,45	0,07	0,08	3,64	0,08
Sum af absolut forskel		13,79	0,29	0,32	14,54	0,33
Let ydervæg int, SV	Bremerhaven	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	Hamborg	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Lund	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Rostock	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum af absolut forskel		0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Let ydervæg int, N	Bremerhaven	2,12	0,00	0,00	2,12	0,00
	Hamborg	2,12	0,00	0,00	2,12	0,00
	Lund	2,12	0,00	0,00	2,12	0,00
	Rostock	2,12	0,00	0,00	2,12	0,00
Sum af absolut forskel		8,48	0,00	0,00	8,48	0,00
Tag ext	Bremerhaven	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
	Hamborg	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02
	Lund	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
	Rostock	0,05	0,03	0,03	0,03	0,05
Sum af absolut forskel		0,12	0,11	0,11	0,12	0,13
Tag int	Bremerhaven	0,15	0,11	0,18	0,17	0,13
	Hamborg	0,08	0,05	0,09	0,06	0,05
	Lund	0,07	0,04	0,09	0,09	0,05
	Rostock	0,04	0,08	0,03	0,05	0,07
Sum af absolut forskel		0,35	0,28	0,38	0,37	0,30
Totalsum		22,78	0,70	0,83	23,54	0,77

Grønne markeringer viser hvilken af de fem danske referenceår der har størst lighed med referenceår for de nærliggende målestationer ift. den pågældende klimaparameter. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. de nærliggende målestationer. Røde tal er resultater der er fejlbehæftede ift. konvergensfejl.

5.3 DELPHIN simuleringer – sammenligning med måledata

Formålet med denne del af simuleringstudiet er at undersøge pålideligheden af de fem danske referenceår ved at implementere dem i simuleringmodeller, der tidligere er kalibreret op imod måledata. Efterfølgende sammenlignes de nye simuleringer udført med de danske referenceår med måledataene fra det originale feltforsøg. Derudover sammenlignes også med simuleringer udført med to tyske og et svensk referenceår. Der er ligeledes udført teoretisk vurdering af risiko for skimmelsvampevækst, hvor de danske referenceår sammenholdes med måledataene.

Modellerne anvendt til denne del af simuleringstudiet blev opbygget og kalibreret ifm. RIBuild projektet (RIBuild, 2020; Jensen et al., 2020a; Jensen et al., 2020c; Jensen et al., 2021; Jensen, 2021), og blev modificeret til nærværende projekt.

5.3.1 Beskrivelse af DTUs forsøgsopstilling

1-dimensionelle og 2-dimensionelle simuleringer er udført i programmet DELPHIN (Nicolai, Grunewald & Zhang, 2007), og modellerne er kalibreret med måledata fra et stort feltstudie udført af Danmark Tekniske Universitet (DTU) i Kongens Lyngby (55,79°N, 12,53°Ø) (Jensen et al., 2020a; Jensen et al., 2020b; Jensen et al., 2020c; Jensen et al., 2020d; Jensen et al., 2021; Jensen, 2021). Formålet med forsøgsopstilling var at undersøge den hygrotermiske ydeevne af flere forskellige typer af indvendig efterisolering, opsat på massive murede vægge med indlejrede træelementer.

Forsøgsopstillingen bestod af to stk. 40 fods fragtcontainere (LxBxH: 12,2 m x 2,4 m x 2,9 m), hvor der blev lavet en række udskæringer af 1 m x 2 m i facadevæggene, hvori der blev opført massive murede vægge. Testvæggene blev udført som en 3-dimensionel opstilling bestående af en 1½-stens (348 mm) massiv ydervæg med 10 mm indvendigt pudslag, en 108 mm indvendig muret skillevæg med puds på begge sider, og en gulvkonstruktion bestående af en 175 mm x 175 mm bjælkeende af fyrretræ, indlejret 100 mm ind i murværket, som understøttes af en 100 mm x 100 mm indlejret trærem (som vist på FIGUR 30). Gulvkonstruktionen blev lukket med 15 mm OSB-plader. I forsøget blev der lagt 100 mm mineraluld inde i gulvkonstruktionen, for at efterligne det lerindskud der traditionelt blev anvendt mellem bjælkerne. Indeklimaet i test containerne blev holdt på 20 °C og 60% relativ luftfugtighed. Der blev imidlertid ikke udført affugtning eller nedkøling af indeklimaet, hvorfor der kan ses afvigelser i sommerperioderne.

Relativ fugtighed og temperatur blev logget hver 10-min over en periode på fire år (01-05-2015 til 01-05-2019) med digitale måler, der blev installeret og indlejret ni forskellige steder i hver testvæg, samt til måling af inde- og udeklimaet. Klimaparametre for udeklimaet over forsøgsperioden blev indhentet fra DTUs vejrstation, placeret 160 m sydvest for test containerne.

5.3.2 Beskrivelse af DTUs simuleringmodeller og kalibrering

1-dimensionelle og 2-dimensionelle modeller blev opbygget i DELPHIN, hvor der blev taget udgangspunkt i geometri og materialer der blev anvendt i forsøgsopstillingen. For mere detaljeret information og billeder af forsøgsopstillingen og testvægge, henvises læseren til (Jensen et al., 2020a; Jensen et al., 2021; Jensen, 2021). De 1-dimensionelle modeller havde fokus på fugt og varme transport gennem selve væggen (FIGUR 26-29 og TABEL 18-21), hvorimod at de 2-dimensionelle modeller havde fokus på transporten gennem en samling mellem ydervæggen og gulvkonstruktionen (FIGUR 30 og TABEL 22). Materialeparametre for de anvendte materialer blev bestemt af Technische Universität Dresden (TUD) ifm.

RIBuild projektet, og udvalgte materialeparametre fremgår af TABEL 18, TABEL 19, TABEL 20, og TABEL 21.

Alle modellerne simuleres mod sydvestlig retning (237°). For vægge med imprægnering af de udvendige overflader, antages det, at vandabsorptionskoefficient, A_w er reduceret med en faktor 1000 i de yderst 10 mm af murværket, som vist i FIGUR 26, 29 og 30. De resterende vægge simuleres som blankt murværk.

For at opnå pålidelige simuleringsmodeller, der er i stand til at estimere de hygrotermiske forhold i de eksperimentelle testvægge, blev simuleringerne kalibreret op imod måledata fra forsøgsopstilling. Til kalibreringen af modeller blev måledata fra sensorpunkterne vist på FIGUR 26-30 anvendt, samt måledata for inde- og udeklimaet. En række antagelser blev udført ifm. valg af værdier for koefficienterne. Kalibreringen blev udført med et automatiseringscript i Python, hvor simuleringsresultaterne blev sammenholdt med måledataene for sensor punkterne. Kalibreringsprocessen er beskrevet mere i detalje i (Jensen et al., 2020c; Jensen, 2021).

5.3.3 Beskrivelse af simuleringsmodeller til nærværende studie

Simuleringsstudiet blev udført for fire vægkonstruktioner: (1) indvendig efterisolering med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler og med udvendig imprægnering; (2) indvendig efterisolering med kalcium silikat plader, uden udvendig imprægnering; (3) indvendig efterisolering med autoklaveret porebeton plader uden udvendig imprægnering; (4) indvendig efterisolering med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering. Der er udført simuleringer for både væg- og gulvkonstruktions detaljer for alle fire vægkonstruktioner. Konstruktionerne beskrives i afsnit 5.3.3.1, 5.3.3.2, 5.3.3.3 og 5.3.3.4.

Modellerne blev simuleret med de kalibrerede værdier for koefficienter og start fugtindhold i modellerne. De fem danske referenceår samt referenceår fra Lund, Bremerhaven og Rostock blev implementeret, mens for indeklimaet blev der anvendt fugtbelastningsklasse 3 og variable inde temperatur iht. udetemperaturen, jf. Annex A i (DS/EN ISO 13788:2013).

Simuleringer er udført over 4 år, og sammenholdes med de 4 år med måledata fra DTUs forsøgsopstilling. Referenceårene for udeklima dækker et år, og disse gentages cyklisk for hvert simuleringsår.

På FIGUR 26-30 optræder desuden røde prikker, som angiver output lokationer for temperatur og relativ fugtighed. Temperatur og relativ fugtighed fra output lokationerne sammenlignes for de respektive referenceår, samt imod måledataene fra DTUs forsøgsopstilling.

De lokationer der er markeret med grønne cirkler, angiver hvor der undersøges for risiko for skimmelsvampevækst ved brug af den teoretiske VTT skimmelvækst model (Hukka & Viitanen, 1999; Ojanen et al., 2010). For vægdetaljerne undersøges punkt 3 fra venstre side (dvs. skillefladen mellem murværket og den indvendige efterisolering), mens for detaljer med indlejret træelementer undersøges punkterne 5 og 6 (dvs. den indlejrede rem og bjælke ende).

5.3.3.1 Vægdetaljer - Polyurethan plader med kalcium silikat kanaler (PUR+H)

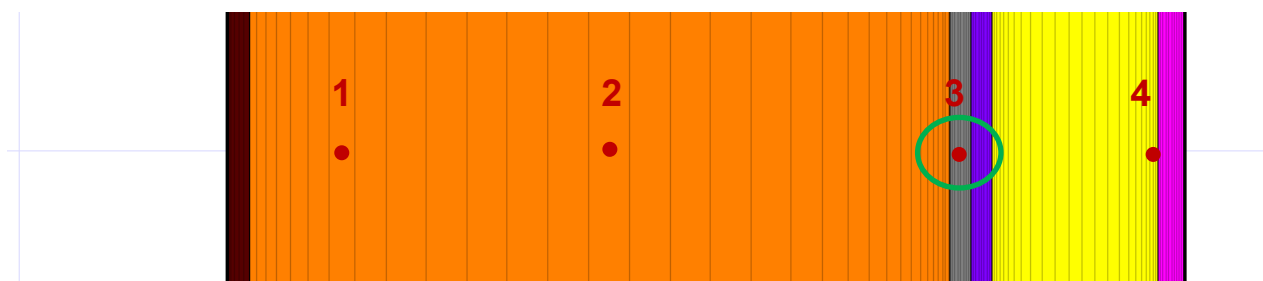
Den første vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af polyurethan plader med kalcium silikat kanaler er opbygget som beskrevet i TABEL 18. Denne vægkonstruktion simuleres med imprægnering af de yderste 10 mm af murværket.

TABEL 18. Modelopbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af polyurethan plader med calcium silikat kanaler til DELPHIN simulering, og udvalgte materialeparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ [-]	Vandabsorptionskoefficient, A_w [kg/(m ² ·s ^{1/2})]
Hellingsø gule mursten, imprægneret	0,010	1643	0,600	16,90	0,000278
Hellingsø gule mursten, ikke imprægneret	0,338	1643	0,600	16,90	0,278
Indvendig puds, luftkalkmørtel 7,7%	0,010	1243	0,440	22,43	0,390
Limmørtel	0,010	1313	0,497	18,75	0,005
Polyurethan plader med calcium silikat kanaler	0,080	49	0,037	27,01	0,013
Indvendig puds (grov)	0,010	225	0,147	11,73	0,107
Indvendig puds (fin)	0,003	1655	0,497	14,00	0,222

Materialeparametre blev bestem ifm. RIBuild projektet (RIBuild, 2020)

På FIGUR 26 fremstår lagdelingen af den imprægnerede vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af polyurethan plader med calcium silikat kanaler til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre.



FIGUR 26. Model opbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af polyurethan plader med calcium silikat kanaler til simulering i DELPHIN®.

5.3.3.2 Vægdetalje – Calcium silikat plader (CaSi)

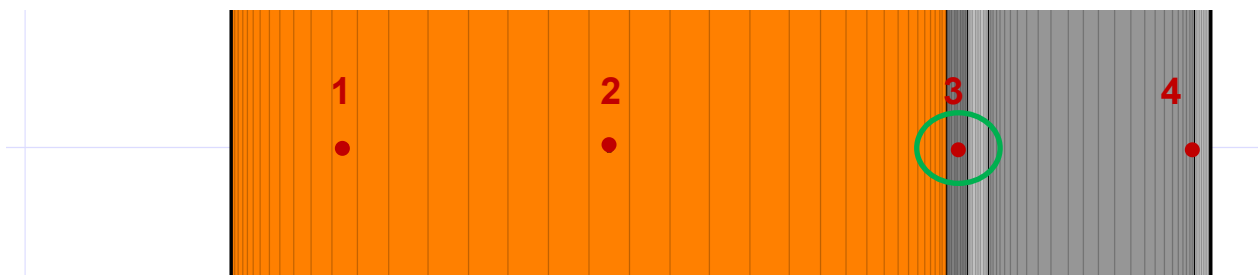
Den anden vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af calcium silikat plader er opbygget som beskrevet i TABEL 19.

TABEL 19. Modelopbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af calcium silikat plader til DELPHIN simulering, og udvalgte materialeparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ [-]	Vandabsorptionskoefficient, A_w [kg/(m ² ·s ^{1/2})]
Hellingsø gule mursten, ikke imprægneret	0,348	1643	0,600	16,90	0,278
Indvendig puds, luftkalkmørtel 7,7%	0,010	1243	0,440	22,43	0,390
Limmørtel	0,010	1655	0,500	6,60	0,600
Kalcium silikat isolering	0,100	225	0,061	4,20	0,726
Limmørtel (som indvendig puds)	0,008	1655	0,500	6,60	0,600

Materialeparametre blev bestem ifm. RIBuild projektet (RIBuild, 2020)

På FIGUR 27 fremstår lagdelingen af den vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af calcium silikat plader til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre.



FIGUR 27. Model opbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af calcium silikat plader til simulering i DELPHIN®.

5.3.3.3 Vægdetalje - Autoklaveret porebeton plader – uden imprægnering (AAC)

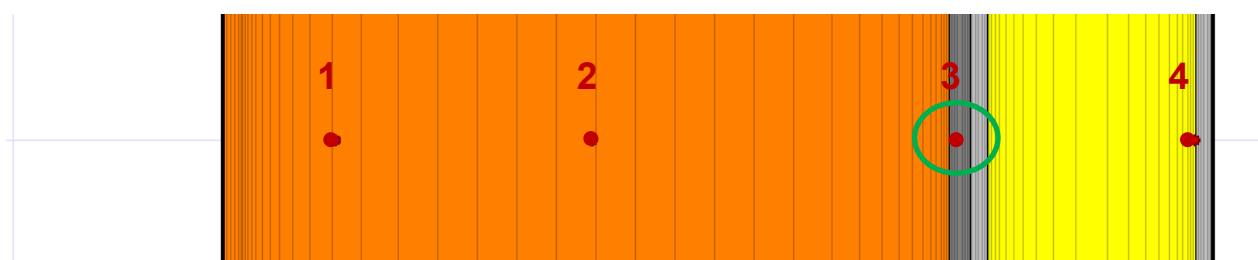
Den tredje vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af autoklaveret porebeton er opbygget som beskrevet i TABEL 20.

TABEL 20. Modelopbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af autoklaveret porebeton plader til DELPHIN simulering, og udvalgte materialemetere for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ [-]	Vandabsorptionskoefficient, A_w [kg/(m ² ·s ^{1/2})]
Hellingsø gule mursten, ikke imprægneret	0,348	1643	0,600	16,90	0,278
Indvendig puds, luftkalkmørtel 7,7%	0,010	1243	0,440	22,43	0,390
Limmørtel	0,010	830	0,155	13,00	0,003
Autoklaveret porebeton isolering	0,100	99	0,044	3,00	0,006
Limmørtel (som indvendig puds)	0,010	830	0,155	13,00	0,003

Materialemetere blev bestem ifm. RIBuild projektet (RIBuild, 2020)

På FIGUR 28 fremstår lagdelingen af den vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af autoklaveret porebeton plader til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre.



FIGUR 28. Model opbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af autoklaveret porebeton plader, uden imprægnering af murværket, til simulering i DELPHIN®.

5.3.3.4 Vægdetalje - Autoklaveret porebeton plader – med imprægnering (AAC+H)

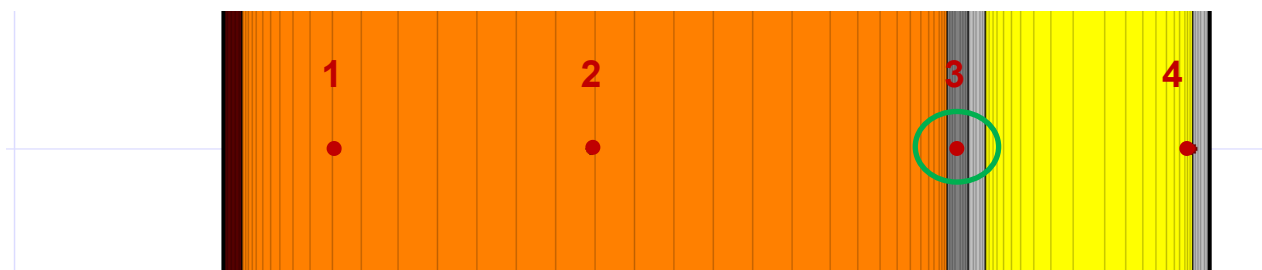
Den fjerde vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af autoklaveret porebeton er opbygget som beskrevet i TABEL 21. Denne vægkonstruktion simuleres med imprægnering af de yderste 10 mm af murværket.

TABEL 21. Modelopbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af autoklaveret porebeton plader til DELPHIN simulering, og udvalgte materialemparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Tykkelse [m]	Densitet, ρ [kg/m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ [-]	Vandabsorptionskoefficient, A_w [kg/(m ² ·s ^{1/2})]
Hellingsø gule mursten, imprægneret	0,010	1643	0,600	16,90	0,000278
Hellingsø gule mursten, ikke imprægneret	0,338	1643	0,600	16,90	0,278
Indvendig puds, luftkalkmørtel 7,7%	0,010	1243	0,440	22,43	0,390
Limmørtel	0,010	830	0,155	13,00	0,003
Autoklaveret porebeton isolering	0,100	99	0,044	3,00	0,006
Limmørtel (som indvendig puds)	0,010	830	0,155	13,00	0,003

Materialeparametre blev bestem ifm. RIBuild projektet (RIBuild, 2020)

På FIGUR 29 fremstår lagdelingen af den imprægnerede vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af autoklaveret porebeton plader til 1D simulering, hvor ydersiden fremstår til venstre.



FIGUR 29. Model opbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af autoklaveret porebeton plader, med imprægnering af murværket, til simulering i DELPHIN®.

5.3.3.5 Detalje med indlejret træelementer

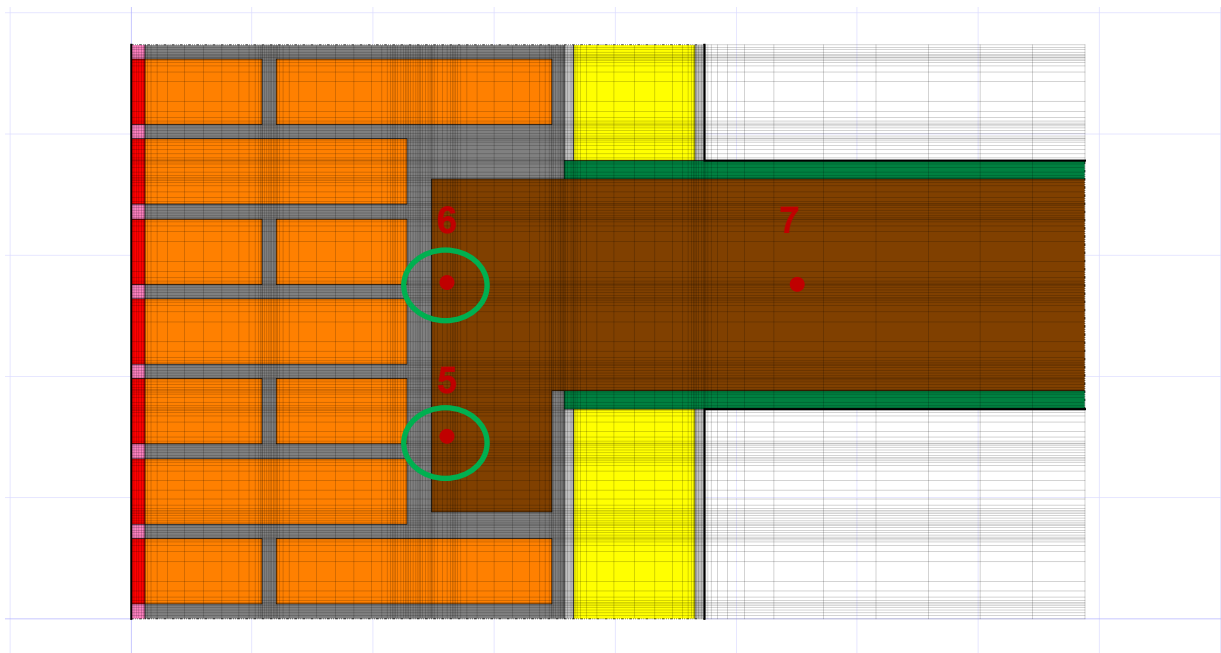
Detaljer med indlejret træelementer blev simuleret med 2-dimensionelle modeller. Som beskrevet ovenfor, blev testvæggene opbygget med en gulvkonstruktion bestående af en 175 mm x 175 mm bjælkeende af fyrretræ, indlejret 100 mm ind i murværket, som understøttes af en 100 mm x 100 mm indlejret træ rem (som vist på FIGUR 30 nedenfor). Gulvkonstruktionen blev lukket med 15 mm OSB-plader. I forsøget blev der lagt 100 mm mineraluld inde i gulvkonstruktionen, for at efterligne det lerindskud der traditionelt blev anvendt mellem bjælkerne. Grundet placering af snittet for simuleringssmodellen, vil dette lag mineraluld ikke simuleret i DELPHIN. Materialerne, der indgår de 2-dimensionelle modeller, er som beskrevet i de forrige afsnit for vægdetaljerne, mens at materialerne, der udgør gulvkonstruktionen, er som vist i TABEL 22.

Ydermere, som beskrevet ovenfor, blev detaljen med indlejret træelementer simuleret for alle fire typer af vægkonstruktioner. Eksemplet viser i FIGUR 30, er for den imprægnerede vægkonstruktion med indvendig efterisolering bestående af autoklaveret porebeton plader.

TABEL 22. Modelopbygning af vægkonstruktion med indvendig efterisolering af autoklaveret porebeton plader til DELPHIN simulering, og udvalgte materialemparametre for de anvendte materialer. Materialerne angives fra ydre til indre overflade.

Materiale	Materiale id iht. DELPHIN materiale database	Densitet, ρ [kg/m ³]	Varmeledningsevne, λ [W/mK]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, μ [-]	Vandabsorptionskoefficient, A_w [kg/(m ² ·s ^{1/2})]
Fyrretræ (rem og bjælke, vist med brun på FIGUR 30)	714	554	0,208	3,60	0,013
OSB-plader (vist med mørk grøn på FIGUR 30)	172	630	0,130	280,00	0,002

På FIGUR 30 fremstår lagdelingen for en 2-dimensionel vægkonstruktion med indvendig efterisolering, med fokus på detaljen med indlejret træelementer, hvor ydersiden fremstår til venstre.



FIGUR 30. Model opbygning af detalje med indlejret træelementer i vægkonstruktion med indvendig efterisolering til simulering i DELPHIN®. Her vist for vægkonstruktionen med indvendig efterisolering bestående af autoklaveret porebeton plader, med imprægnering af murværket.

5.3.4 Resultater – fugtsimuleringer

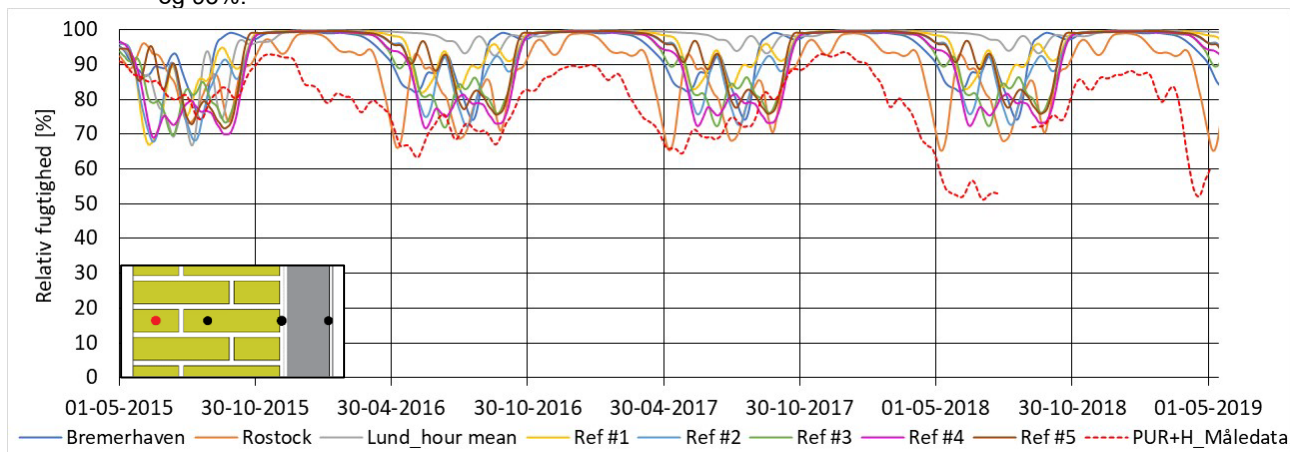
Dette afsnit præsenterer de hygrotermiske resultater fra DELPHIN simuleringerne, hvor de sammenlignes med måledataene fra DTUs forsøgsopstilling, for at opnå en bedre forståelse af hvilket referenceår der har de største ligheder med måledataene.

Der præsenteres repræsentative grafer for målepunkterne i vægkonstruktioner, med undtagelse af punkterne 3, 5 og 6 (se FIGUR 26-30), hvor der præsenteres relativ fugtighed for alle fire vægkonstruktioner. Dette skyldes at, der for disse målepunkter senere præsenteres teoretisk vurdering af risiko for skimmelsvampvækst. Alle grafer er baseret på 14-dages løbende gennemsnit. Flere grafer kan findes i det supplerende materiale (Jensen et al., 2022).

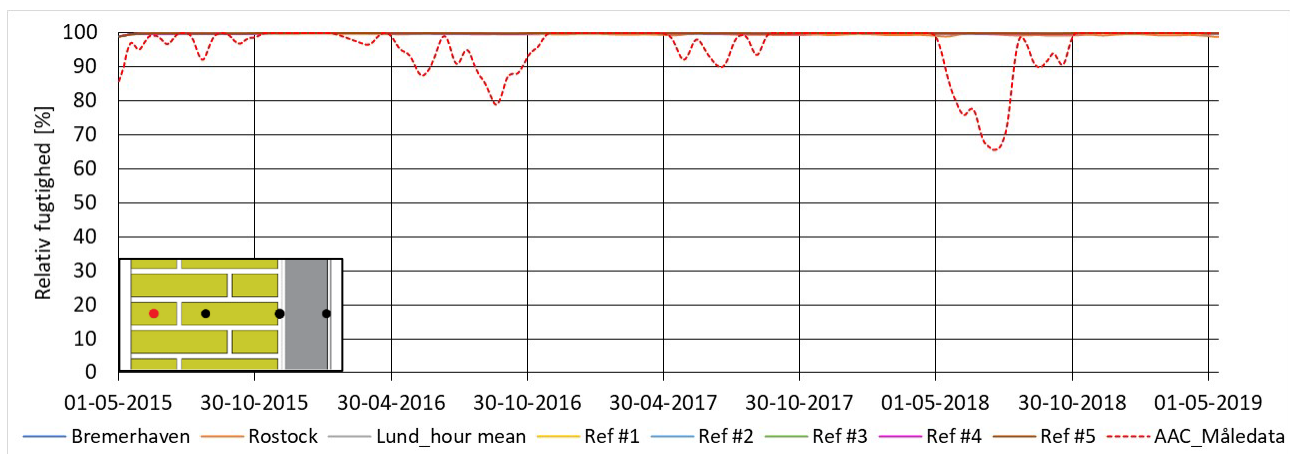
5.3.4.1 Indvendig efterisolering af massivt murværk – ydre del af murværk

For den relative fugtighed i den ydre del af murværket blev det observeret, at der var relativt god lighed mellem simuleringerne med de danske referenceår og måledataene for vægkonstruktioner uden imprægnering (FIGUR 32). Hvor alle modellerne havde nær 100% relative fugtighed, mens der for måledataene var lidt variationer over året, hvilket resulterede i 10-30%-points forskel mellem simuleringer og måledata primært i sommerperioderne. Disse fald i den relative fugtighed i sommerperioderne var ikke synligt for modellerne. For vægkonstruktioner med imprægnering (FIGUR 31), blev det observeret at modeller generelt havde en tendens til at overestimere den relative fugtighed en smule, hvilket var gældende for alle referenceår inklusiv de tyske og svenske referenceår. Alle modellerne viste høj relativ fugtighed (nær 100%) i vinterperioderne med begrænset variationer mellem modellerne, mens der var betydeligt større variationer mellem resultaterne i sommerperioderne. Generelt lå

resultaterne mellem 70 og 100% relativ fugtighed, mens måledataene typisk lå mellem 60 og 93%.



FIGUR 31. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 1: ydre del af murværk. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.

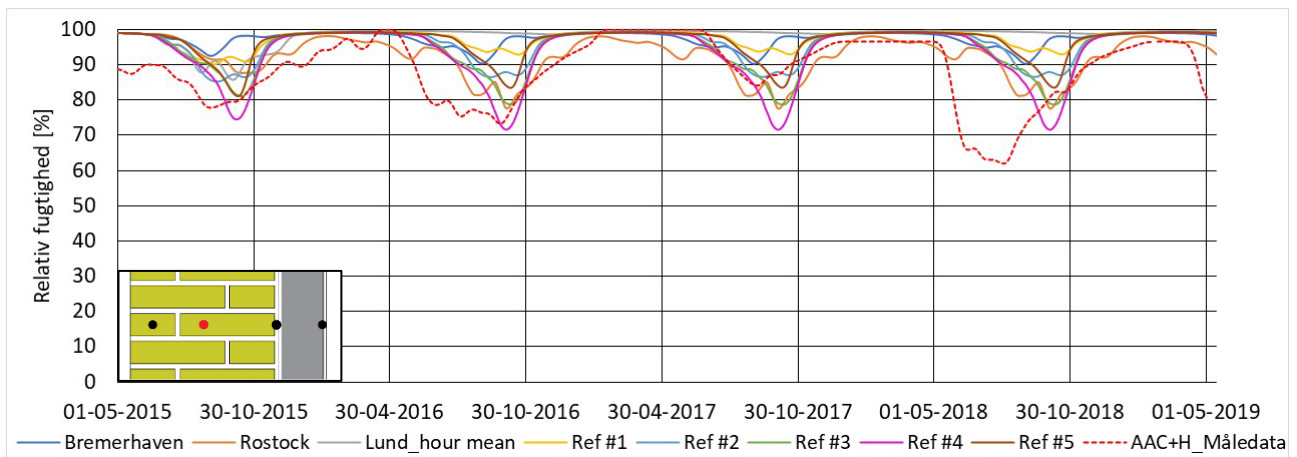


FIGUR 32. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 1: ydre del af murværk. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.

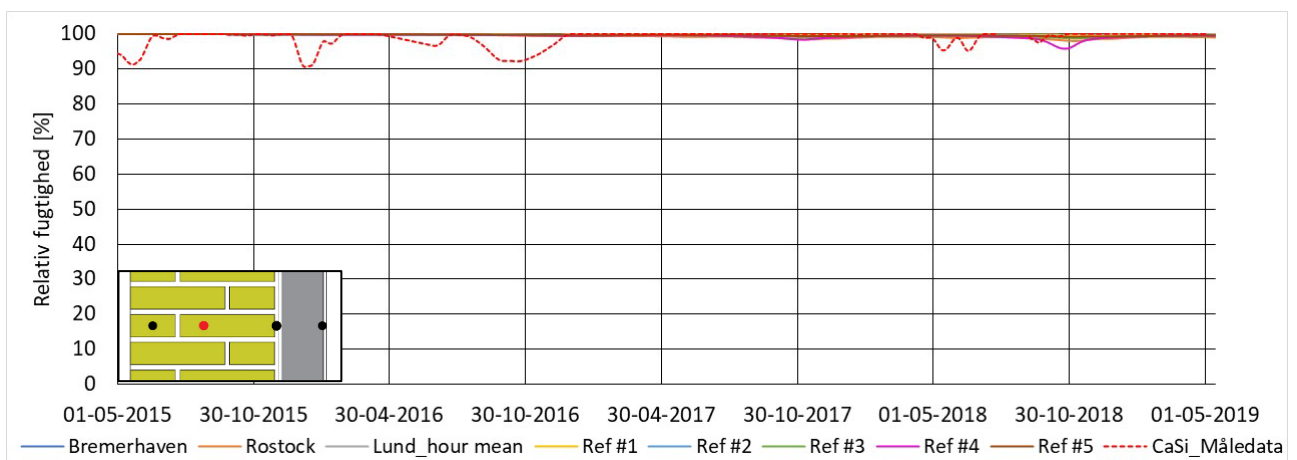
5.3.4.2 Indvendig efterisolering af massivt murværk – midten af murværket

For den relative fugtighed i den midterste del af murværket blev der som i den ydre del af murværket, observeret relativt god lighed mellem simuleringerne med de danske referenceår og måledataene for vægkonstruktioner uden imprægnering (FIGUR 34). Mens modellerne overvurderede den relative fugtighed en smule for vægkonstruktioner med imprægnering (FIGUR 33). Disse tendenser synes ligeledes at være gældende for alle referenceår inklusiv de tyske og svenske referenceår. Som i den ydre del af murværket, blev der observeret mindst variation mellem modellerne i vinterperioderne (nær 100% relativ fugtighed), mens der var større variationer mellem modellerne i sommerperioderne. Ligeledes lå resultaterne generelt mellem 70 og 100% relativ fugtighed, hvilket måledataene generelt også gjorde.

Nogle af de største gennemsnitlige værdier for relative fugtighed ses for hhv. Lund og referenceår 1 i de to yderste målepunkter i murværket, hvilket kunne skyldes, at disse to referenceår har de største årlige mængder nedbør.



FIGUR 33. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 2: midten af murværket. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.



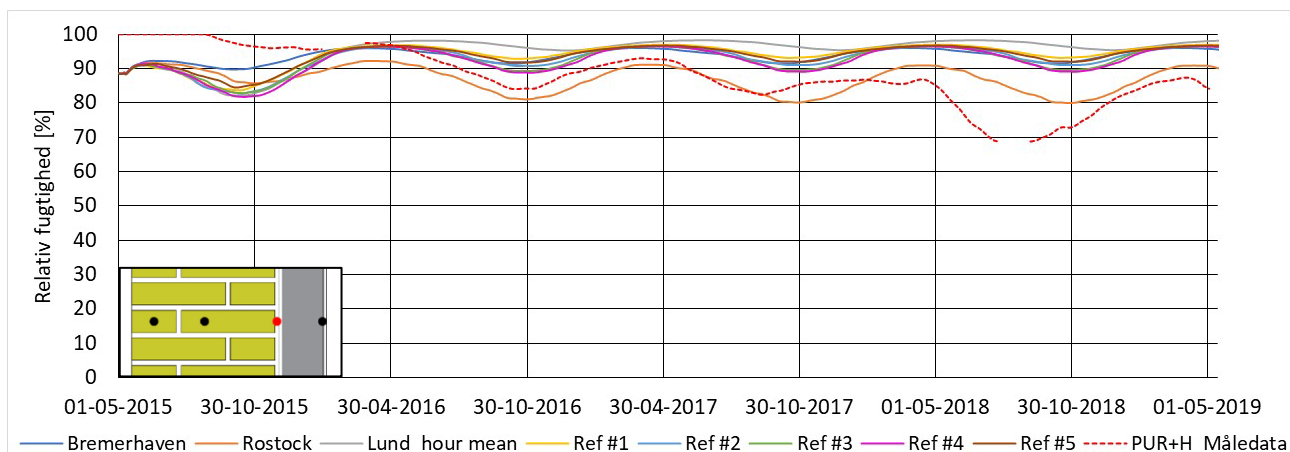
FIGUR 34. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 2: midten af murværket. Her vist vægkonstruktion isoleret med calcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.

5.3.4.3 Indvendig efterisolering af massivt murværk – skillefladen mellem væg og isolering

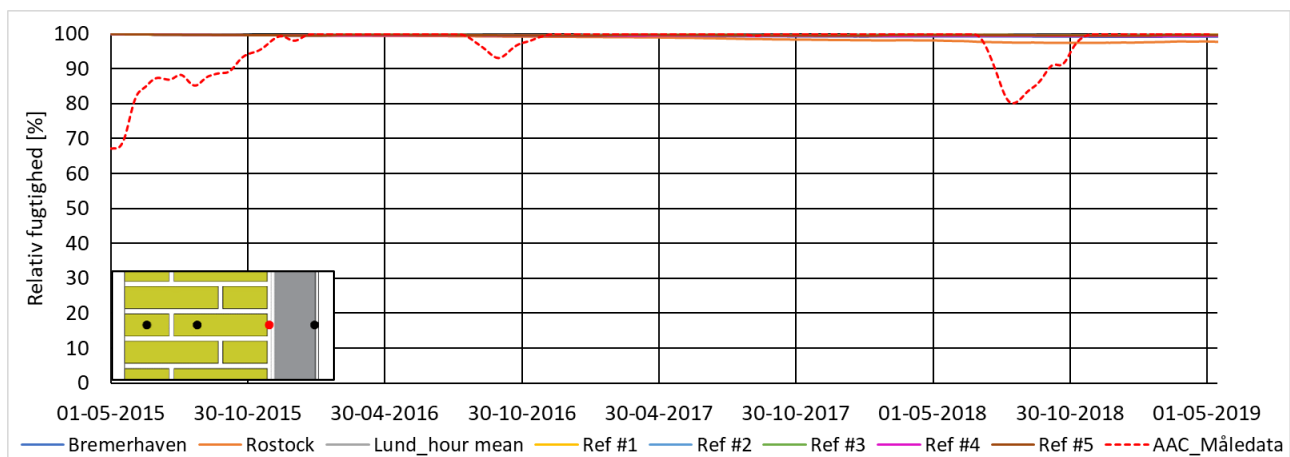
For den relative fugtighed i skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering blev der observeret relativt god lighed mellem simuleringerne med de danske referenceår og måledataene. Den eneste undtagelse var den imprægnerede vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader, hvor simuleringerne overvurderede den relative fugtighed (FIGUR 35).

Denne tendens blev derimod ikke på samme måde observeret for den imprægnerede vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton (FIGUR 37). For den imprægnerede væg med autoklaveret porebeton blev der observeret en del sæsonvariationer fra år til år i måledataene, hvorimod simuleringerne med de danske referenceår generelt lå mellem år med store og små variationer. Der blev også observeret for de imprægnerede vægge, at referenceåret for Lund havde tendens til at overestimere den relative fugtighed mere end de øvrige referenceår, selvom Lund ligger geografisk nærmest DTUs test område i Kongens Lyngby. Modellerne for vægge uden imprægnering lå generelt mellem 90 og 100% relative fugtighed, mens modellerne for den imprægnerede væg med autoklaveret porebeton lå mellem 70 og 95%. Modellerne for den imprægnerede væg med polyurethan plader lå generelt mellem 90 og 97% relativ fugtighed, med undtagelse af modellen for Rostock, der 80 og 92%. Dette

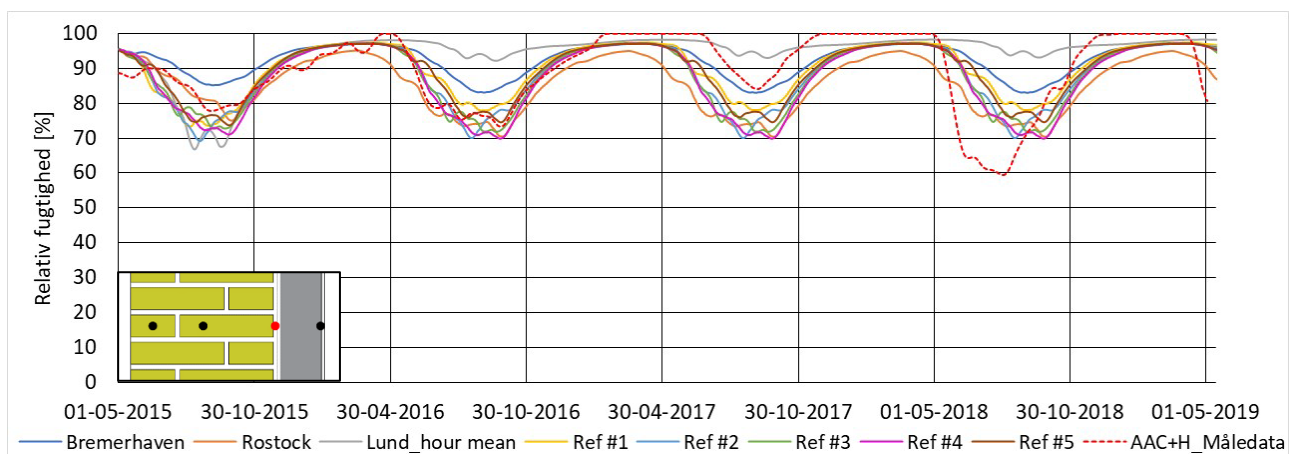
kunne muligvis skyldes at Rostock har den lavest akkumulerede relativ fugtighed over året, samt den anden laveste totale mængde nedbør.



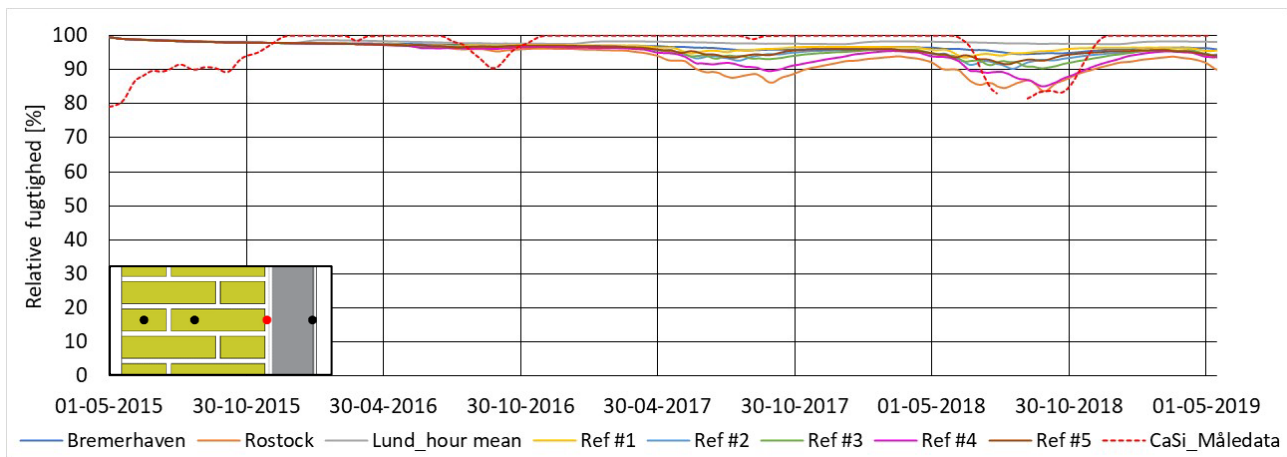
FIGUR 35. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 3: skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med calcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



FIGUR 36. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 3: skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



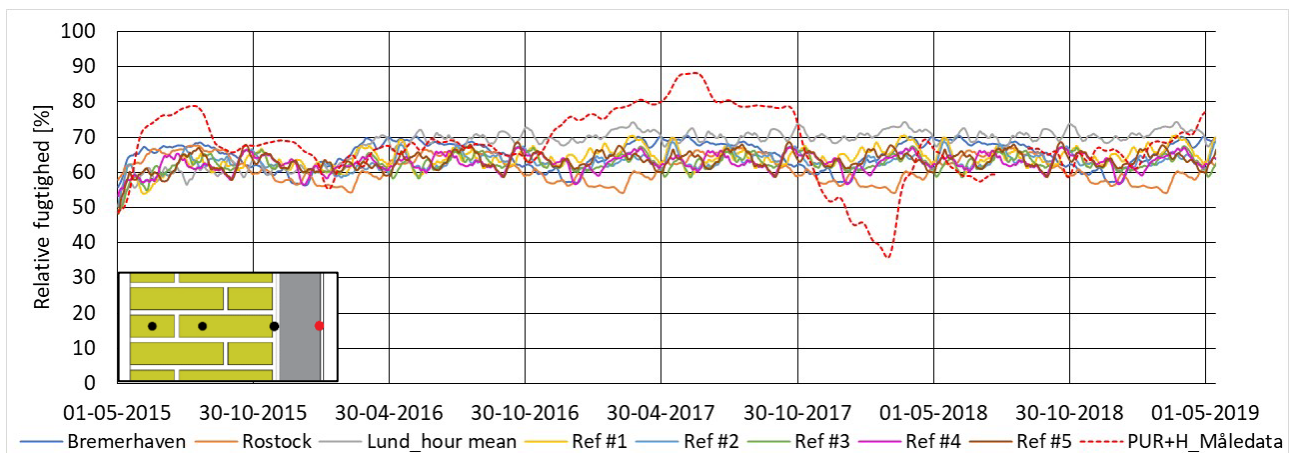
FIGUR 37. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 3: skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.



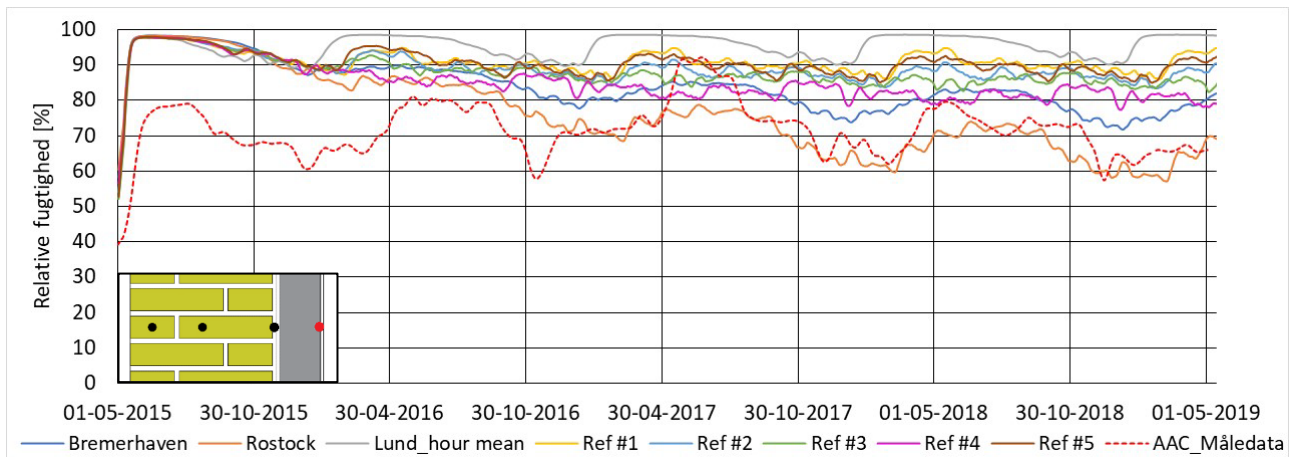
FIGUR 38. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 3: skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med kalcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.

5.3.4.4 Indvendig efterisolering af massivt murværk – indvendige overflade

For den relative fugtighed nær den indvendige overflade (ca. 10 mm inde i vægkonstruktionen) blev der observeret relativt god lighed mellem simuleringerne med de danske referenceår og måledataene, for de imprægnerede vægkonstruktioner (FIGUR 39). Det ses, at simuleringerne ligger i området 55-75%, hvilket synes at være meget passende set mod den gennemsnitlige relative fugtighed i dette målepunkt. Simuleringerne som er baseret på repræsentative år med et indeklima der følger udeklimaet jf. EN ISO 13788 vil naturligvis ikke kunne fange perioder med meget høj relativ fugtighed i de mere våde år, eller den meget tørre periode som i måledataene skyldes et nedbrud af befugtningsudstyret. For vægkonstruktioner uden imprægnering blev det derimod observeret at simuleringerne havde en tendens til at overvurdere den relative fugtighed betydeligt (FIGUR 40). Dette synes at være tilfældet for alle referenceår, med undtagelse af Rostock, som efter de første 1½ år faldt ind på niveau med måledataene. Alle modellerne med danske referenceår lå generelt mellem 80 og 95% relativ fugtighed, mens Lund lå mellem 90 og 98%. Rostock og Bremerhaven lå begge højt i begyndelsen og faldt år efter år, og umiddelbart ser der ikke ud til at modellerne endnu har nået kvasi steady-state (fugtbalance) indenfor den 4-årige simuleringsperiode. Det sidste år af simuleringerne lå Rostock 60 og 75% relativ fugtighed, mens Bremerhaven lå mellem 75 og 85%.



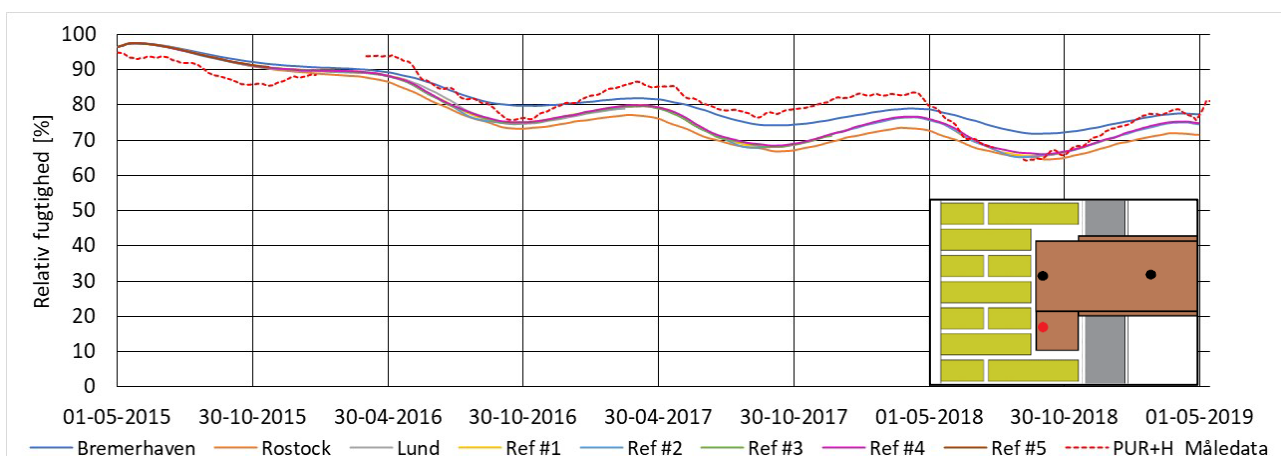
FIGUR 39. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 4: indvendige overflade. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



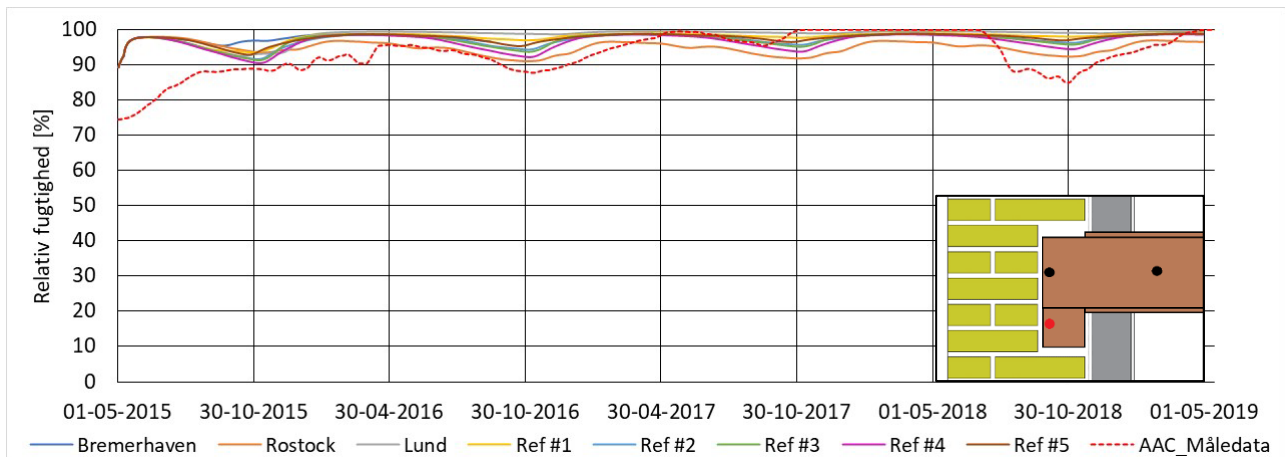
FIGUR 40. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 4: indvendige overflade. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.

5.3.4.5 Indvendig efterisolering af massivt murværk – indlejrede rem

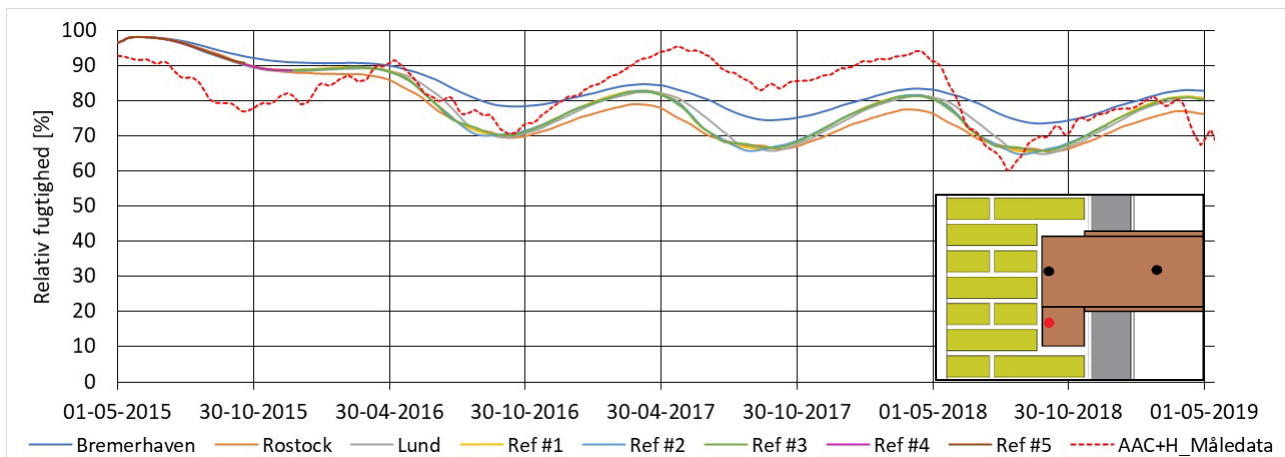
For den relative fugtighed i den indlejrede rem blev det observeret relativt god lighed mellem simuleringer og måledataene. Hvilket synes at være tilfældet for alle fire vægkonstruktioner. De største afvigelser mellem simuleringer og måledata blev observeret for den imprægnerede vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton isolering (FIGUR 43) i forårs-/sommerperioderne i 2017 og 2018, hvor måledataene udviste højere relativ fugtighed. Derimod er der relativt god lighed mellem simuleringer og måledata i 2015, 2016 og 2019. For vægge uden imprægnering (FIGUR 42 og FIGUR 44) blev der observeret høj relativ fugtighed (90% til 100%) i modellerne, og ligeledes høj relativ fugtighed i måledataene, men med lidt større sæsonvariationer. Modellerne udviste de største variationer i sommerperioderne, mens næsten alle lå nær 100% relativ fugtighed i vinterperioderne. For vægge med imprægnering (FIGUR 41 og FIGUR 43) blev der observeret høj relativ fugtighed i begyndelsen af simuleringsperioden, og fugtigheden faldt år efter år, og umiddelbart ser det ikke ud til at modellerne endnu har nået kvasi steady-state (fugtbalance) indenfor den 4-årige simuleringsperiode. For væggen isoleret med polyurethan plader lå den relative fugtighed mellem 65 og 80% for modellerne det sidste år af simuleringerne, mens for væggen isoleret med autoklaveret porebeton plader lå den relative fugtighed mellem 65 og 82-83%.



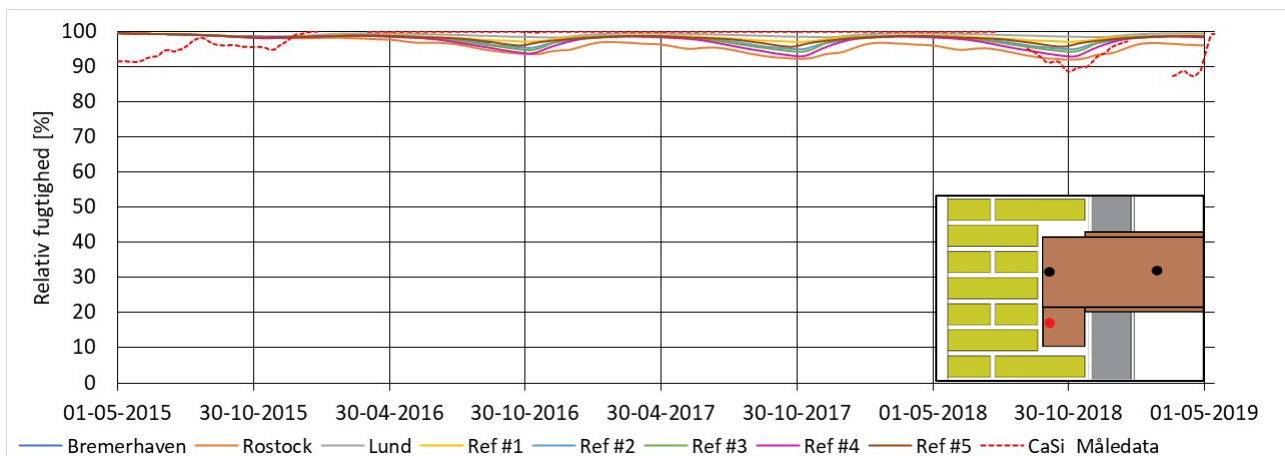
FIGUR 41. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 5: indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



FIGUR 42. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 5: indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



FIGUR 43. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 5: indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.

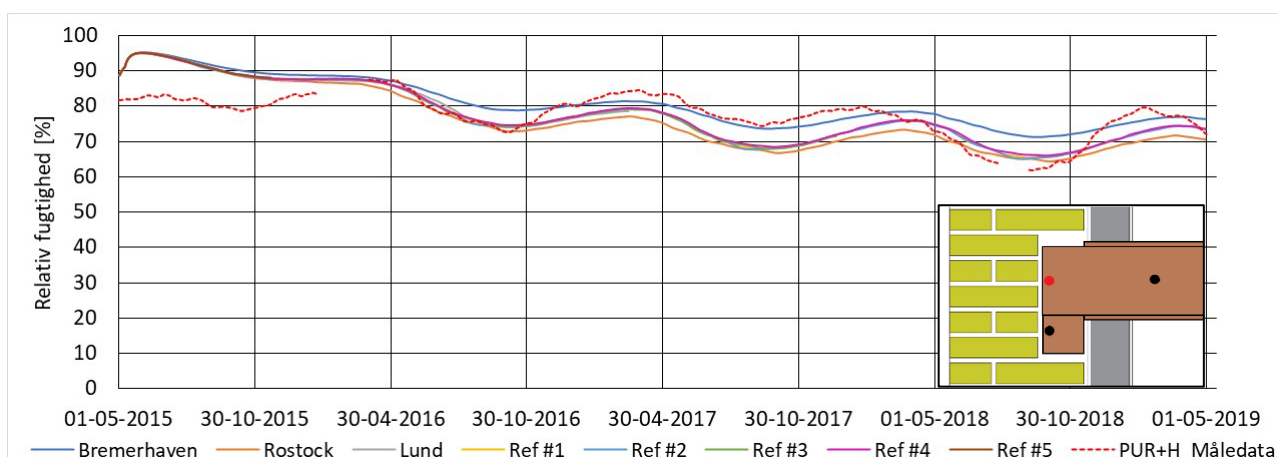


FIGUR 44. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 5: indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med kalcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.

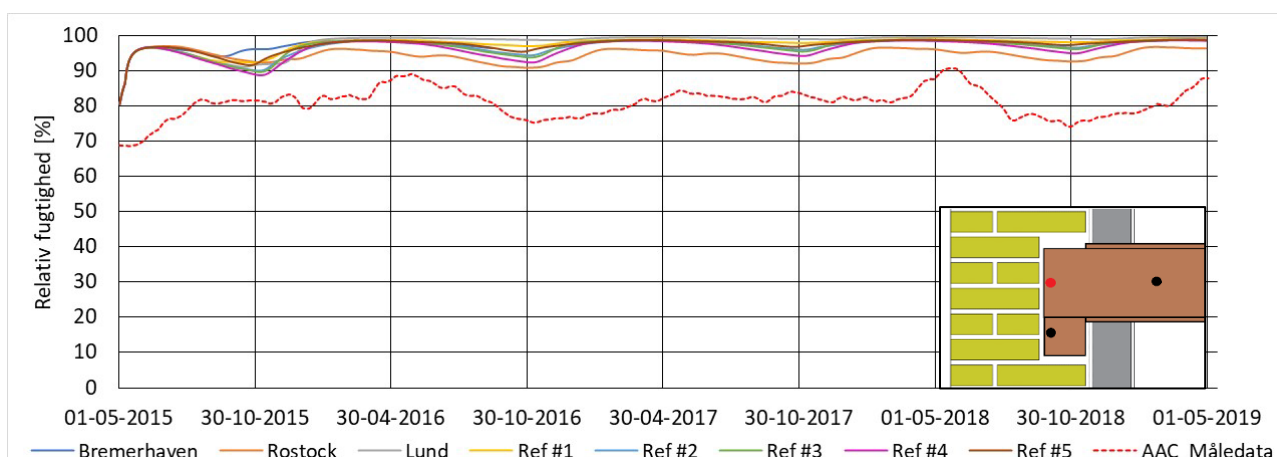
5.3.4.6 Indvendig efterisolering af massivt murværk – indlejret bjælke end

For den relative fugtighed i den indlejrede bjælkeende blev det observeret, at der var relativt god lighed mellem simuleringer og måledata for vægkonstruktioner med imprægnering (FIGUR 45 og 47). Det blev observeret, at bjælkeender ligesom remmen ikke ser ud til at have opnået kvasi steady-state (fugtbalance) indenfor den 4-årige simuleringsperiode. Det sidste år lå modellerne for væggen isoleret med polyurethan plader mellem 65 og 79% relativ fugtighed, mens modellerne for væggen isoleret med autoklaveret porebeton lå mellem 65 og 92%.

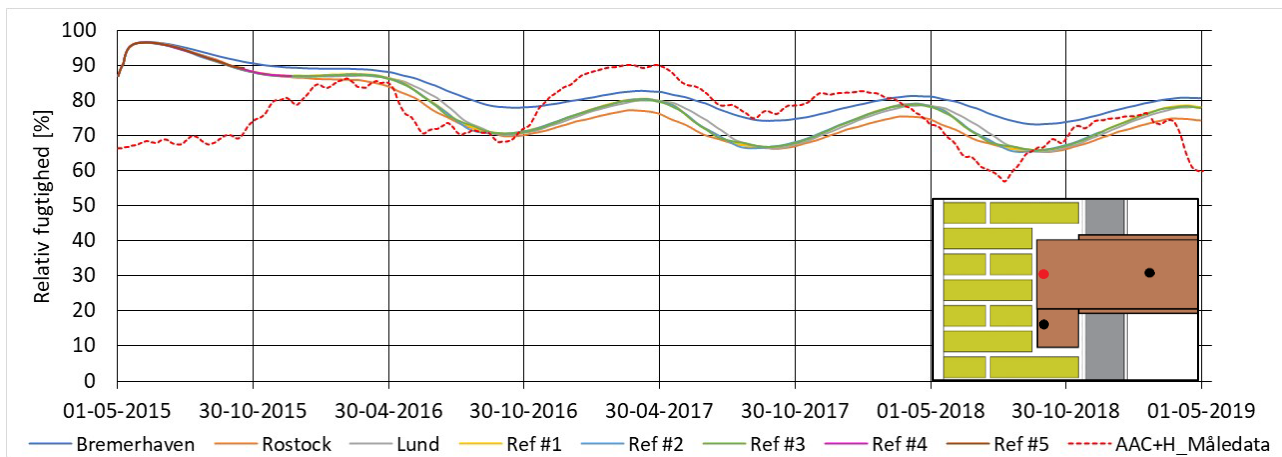
Derimod blev det også observeret, at for vægkonstruktioner uden imprægnering (FIGUR 46 og 48) havde simuleringerne en tendens til at overvurdere den relative fugtighed. Specielt for den ikke-imprægnerede vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, ses i nogle perioder op mod 20% forskel mellem nogle simuleringer og måledataene. Modellerne for vægge uden imprægnering lå generelt mellem 90 og 100%, mens måledataene for væggen med autoklaveret porebeton lå mellem 75 og 90%, og væggen med kalcium silikat lå mellem 75 og 95%.



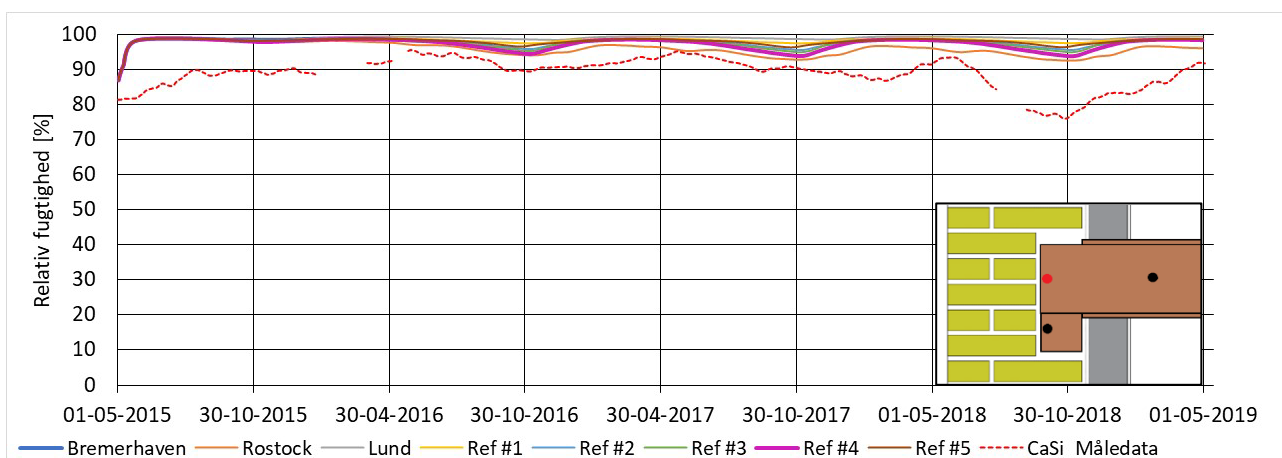
FIGUR 45. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 6: indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



FIGUR 46. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 6: indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



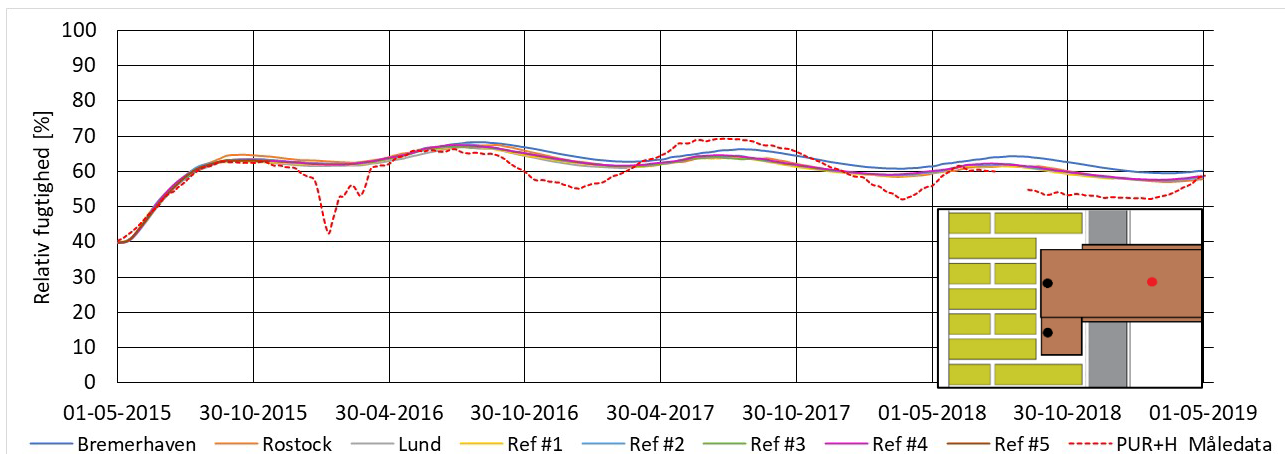
FIGUR 47. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 6: indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.



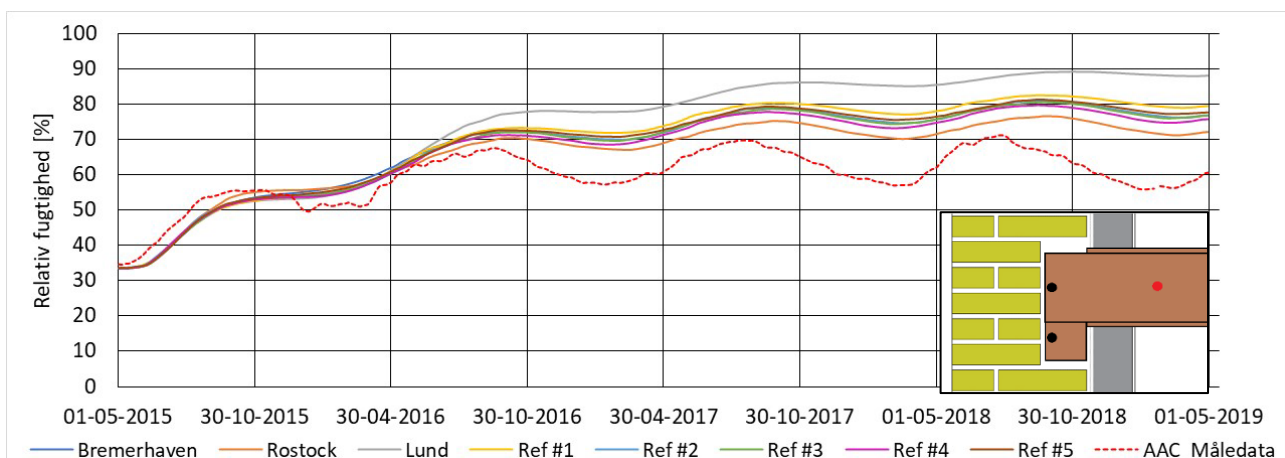
FIGUR 48. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 6 indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med kalcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.

5.3.4.7 Indvendig efterisolering af massivt murværk – midten af bjælke

For den relative fugtighed i midten af bjælken blev det observeret relativt god lighed mellem simuleringerne og måledataene for vægkonstruktion med imprægnering (FIGUR 49). Model-lerne lå generelt mellem 58 og 70% relativ fugtighed, mens der var lidt større sæsonvaria-tioner for måledataene, der typisk lå mellem 50 og 70%. For vægkonstruktioner uden impræg-nering blev det derimod observeret, at simuleringerne havde en tendens til at overvurdere den relative fugtighed betydeligt (FIGUR 50). Måledataene lå generelt mellem 55 og 70% relativ fugtighed, mens modellerne i de sidste 2-2½ år af simuleringsperioden generelt lå mellem 70 og 82-83%. Den eneste undtagelse var modellen for Lund, der var oppe omkring 85 til 90%.



FIGUR 49. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 7: midten af indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med calcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



FIGUR 50. Sammenligning af relativ fugtighed i punkt 7: midten af indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.

5.3.4.8 Opsamling ift. sammenligning af relativ fugtighed

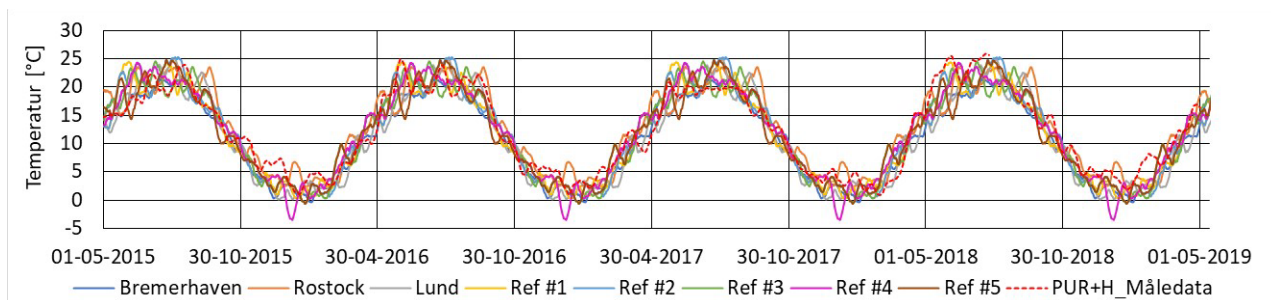
Generelt blev det observeret for sammenligningen mellem simuleringer og måldata ift. relativ fugtighed at, de danske referenceår var meget ens, og at de alle typisk lå mellem simuleringerne udført med de tyske og svenske referenceår. For de simuleringer hvor der blev observeret større forskelle mellem simuleringer og måldata, var dette typisk tilfældet for størstedelen af referenceårene, inklusiv alle de øvrige referenceår.

Det bør også nævnes at måldataene også har nogle usikkerheder forbundet med sig, f.eks. har de digitale målere, der er anvendt i DTUs forsøgsopstilling en usikkerhed på ca. 2% relativ fugtighed i spændet 0-80%, mens at usikkerheden stiger i spændet 80-100% relativ fugtighed. Dette kan betyde, at forskellene mellem simuleringer og måldataene i nogle tilfælde med meget høj fugtighed kunne være større eller mindre end præsenteret i nærværende rapport. Dette kunne være en mulig forklaring på de forskelle der f.eks. ses i FIGUR 35, FIGUR 46, og FIGUR 48.

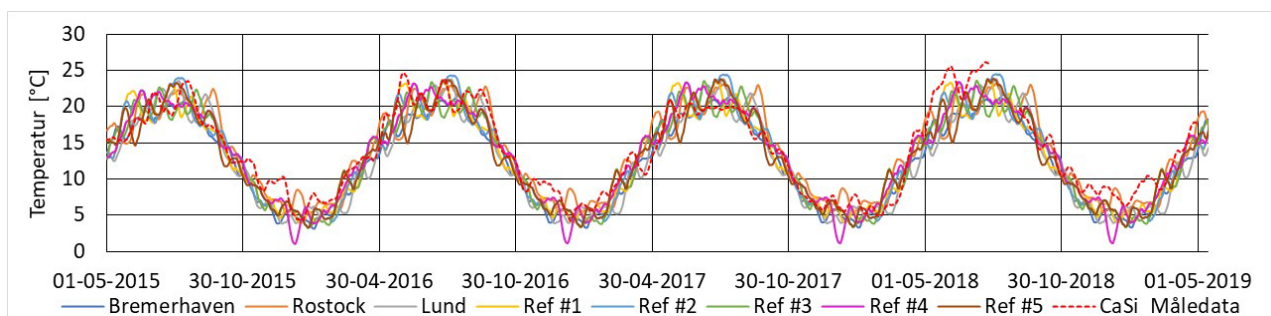
5.3.4.9 Temperatur

Ift. temperatur, blev der generelt observeret god lighed mellem DELPHIN simuleringerne og måldata fra DTUs forsøgsopstilling i de fleste målepunkter. Dette var generelt gældende for alle 4 vægkonstruktioner. Der blev observeret de største variationer mellem modellerne i sommerperioderne på op til 7-10 °C, mens der i vinterperioderne var variationer på omkring

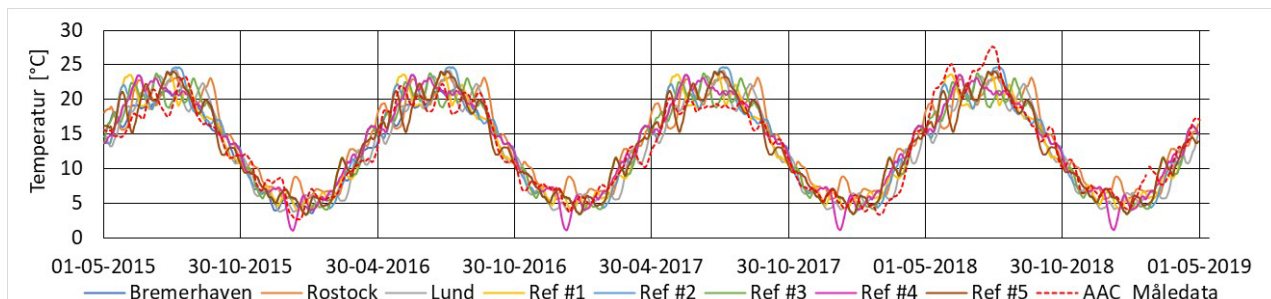
5 °C. Et par eksempler er vist i FIGUR 51-54 nedenfor. De største forskelle mellem DEL-PHIN simuleringer og måledataene var i punkt 7 (midten af bjælken), hvor simuleringer konsekvent overvurderede temperaturerne med 3-5 °C. Et eksempel på dette er vist i FIGUR 54 for væggen isoleret med autoklaveret porebeton, uden udvendig imprægnering.



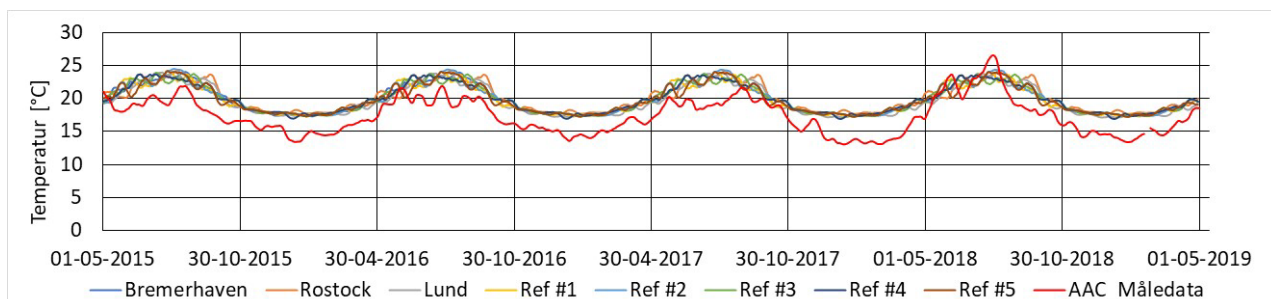
FIGUR 51. Sammenligning af temperatur i punkt 1: ydre del af murværket. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



FIGUR 52. Sammenligning af temperatur i punkt 3: skillefladen mellem murværket og den indvendig isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med kalcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.



FIGUR 53. Sammenligning af temperatur i punkt 5: indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



FIGUR 54. Sammenligning af temperatur i punkt 6: indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.

5.3.5 Resultater – absolut forskel mellem referenceår og måledata

TABEL 23 og 24 viser de absolutte forskelle mellem måledataene fra DTUs forsøgsopstilling og referenceårene i alle 7 målepunkter i de 4 vægkonstruktioner, for hhv. temperatur og relativ fugtighed. Fra TABEL 23, fremgår det, at den gennemsnitlige absolutte forskel mellem temperaturer i DTUs forsøgsopstilling og referenceårene overordnet er mindst for referenceår 1, efterfulgt af referenceår 4. Ift. forskel mellem de danske referenceår med den mindste og den største samlede absolutte forskel, var forskellen mellem referenceår 1 og referenceår 5 på ca. 8,2%. Ser man derimod på de øvrige referenceår, ses det, at Bremerhaven havde den mindste gennemsnitlige absolutte forskel til måledataene, og var mere lig måledataene end de fem danske referenceår.

TABEL 23. Temperatur: absolutte forskelle mellem referenceår og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling.

	Væg	Bremerhaven	Rostock	Lund	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5
Punkt 1 ydre del af murværk	PUR+H	3,3	3,9	3,8	3,7	3,9	3,8	3,8	3,9
	AAC	4,9	4,9	4,4	5,1	4,9	4,9	4,8	5,0
	AAC+H	3,4	4,0	3,7	3,8	3,9	3,9	3,9	4,0
	CaSi	2,7	3,1	3,0	3,0	3,2	3,1	3,0	3,1
Sum af absolut forskel		14,2	15,8	14,8	15,6	15,8	15,8	15,5	16,1
Punkt 2 midten af murværk	PUR+H	2,5	3,0	2,9	2,7	2,9	3,0	2,8	3,0
	AAC	4,4	4,4	3,9	4,6	4,4	4,4	4,4	4,6
	AAC+H	3,0	3,5	3,0	3,2	3,3	3,3	3,2	3,3
	CaSi	2,6	2,9	2,8	2,7	2,8	2,9	2,7	2,8
Sum af absolut forskel		12,6	13,8	12,7	13,2	13,4	13,6	13,1	13,7
Punkt 3 skilleflade murværk/ isolering	PUR+H	2,4	2,7	2,7	2,4	2,6	2,6	2,5	2,7
	AAC	3,8	3,8	3,4	4,0	3,8	3,8	3,8	4,0
	AAC+H	2,4	2,8	2,7	2,5	2,7	2,7	2,6	2,7
	CaSi	2,5	2,7	2,5	2,4	2,5	2,6	2,4	2,6
Sum af absolut forskel		11,0	12,1	11,3	11,3	11,6	11,8	11,4	11,9
Punkt 4 indvendig overflade	PUR+H	1,6	1,7	1,7	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
	AAC	1,6	2,2	1,5	1,8	1,8	1,7	1,6	1,8
	AAC+H	1,4	1,4	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4
	CaSi	1,9	2,4	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9
Sum af absolut forskel		6,5	7,6	6,6	6,6	6,7	6,6	6,4	6,7
Punkt 5 indlejrede rem	PUR+H	2,2	2,7	3,0	2,3	2,5	2,6	2,6	3,0
	AAC	2,1	2,5	2,8	2,3	2,5	2,6	2,5	2,6
	AAC+H	2,1	2,5	2,9	2,3	2,5	2,5	2,6	3,2
	CaSi	2,2	2,8	3,0	2,5	2,7	2,7	2,7	2,8
Sum af absolut forskel		8,6	10,6	11,7	9,4	10,3	10,5	10,4	11,5
Punkt 6 indlejret bjælkeend	PUR+H	2,1	2,5	2,6	2,1	2,4	2,5	2,4	2,8
	AAC	2,1	2,6	2,6	2,3	2,5	2,6	2,5	2,6
	AAC+H	2,1	2,5	2,6	2,3	2,5	2,5	2,6	3,0
	CaSi	2,2	2,5	2,6	2,2	2,4	2,5	2,4	2,5
Sum af absolut forskel		8,4	10,2	10,4	9,0	9,8	10,0	9,8	10,9
Punkt 7 midten af bjælke	PUR+H	2,4	2,5	2,8	2,4	2,5	2,7	2,5	2,6
	AAC	2,8	2,6	3,0	2,6	2,8	2,8	2,8	2,7
	AAC+H	2,7	2,7	2,9	2,6	2,7	2,8	2,7	2,8
	CaSi	2,1	2,3	2,7	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4
Sum af absolut forskel		10,0	10,0	11,4	9,9	10,4	10,6	10,4	10,4
Totalsum		71,3	80,0	78,9	75,0	78,0	79,0	77,0	81,2

Grønne markeringer viser hvilken af de fem danske referenceår (og de øvrige referenceår) der har størst lighed med måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. måledataene. Rød tekst er simuleringer der blev stoppet grundet konvergensfejl (beregnings fejl). Værdier er derfor bestemt ud fra tilgængelig dataserie før simuleringerne blev stoppet.

Fra TABEL 24, fremgår det at den gennemsnitlige absolutte forskel mellem relativ fugtighed i DTUs forsøgsopstilling og referenceårerne overordnet er mindst for det danske referenceår 3, efterfulgt af referenceår 2. Ift. forskel mellem det referenceår med den mindste og den største samlede absolutte forskel, var forskellen mellem referenceår 3 og referenceår 5 på ca. 14,4%.

Ser man derimod på de øvrige referenceår, så ses det at Lund havde den mindste gennemsnitlige absolutte forskel til måledataene, og at både Lund og Bremerhaven var mere lig måledataene end de fem danske referenceår.

TABEL 24. Relativ fugtighed: absolutte forskelle mellem referenceår og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling.

Væg		Bremerhaven	Rostock	Lund	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5
Punkt 1 ydre del af murværk	PUR+H	15,4	19,0	11,2	16,9	15,4	14,1	13,6	15,8
	AAC	4,1	4,2	4,3	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
	AAC+H	19,8	22,2	15,6	20,6	18,4	17,4	16,4	19,0
	CaSi	1,4	1,4	1,7	1,4	1,5	1,5	1,8	1,5
Sum af absolut forskel		40,8	46,7	32,8	43,0	39,4	37,1	35,9	40,3
Punkt 2 midten af murværk	PUR+H	15,5	17,7	11,0	16,7	16,0	15,5	15,4	16,2
	AAC	1,7	1,7	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
	AAC+H	9,0	9,8	5,9	8,8	7,2	6,7	6,6	7,9
	CaSi	1,4	1,3	1,7	1,4	1,5	1,5	1,6	1,4
Sum af absolut forskel		27,6	30,4	20,4	28,5	26,3	25,4	25,3	27,2
Punkt 3 skilleflade murværk/ isolering	PUR+H	7,8	10,6	4,9	9,2	8,5	8,0	8,0	8,7
	AAC	3,6	3,3	3,9	3,4	3,5	3,5	3,5	3,4
	AAC+H	6,0	7,3	6,9	5,5	5,6	5,8	6,1	5,5
	CaSi	4,3	3,7	6,0	4,4	4,8	4,7	5,1	4,6
Sum af absolut forskel		21,7	24,9	21,6	22,6	22,4	22,0	22,7	22,2
Punkt 4 indvendig overflade	PUR+H	7,8	8,4	9,3	8,7	8,8	8,7	8,9	8,9
	AAC	12,8	23,3	9,8	19,2	17,5	16,6	14,2	18,7
	AAC+H	7,9	7,8	10,2	9,6	9,6	9,8	9,8	9,6
	CaSi	13,7	21,2	12,2	14,0	13,0	12,8	12,6	13,4
Sum af absolut forskel		42,2	60,6	41,4	51,5	48,9	47,9	45,6	50,6
Punkt 5 indlejrede rem	PUR+H	3,1	3,4	5,7	4,4	4,4	4,8	4,2	4,2
	AAC	8,1	5,5	4,5	5,3	4,8	4,8	4,5	5,1
	AAC+H	7,1	7,9	9,1	7,8	8,3	7,9	9,3	9,3
	CaSi	2,5	2,0	3,7	2,4	2,7	2,7	2,9	2,5
Sum af absolut forskel		20,8	18,8	23,0	19,8	20,1	20,2	20,9	21,1
Punkt 6 indlejret bjælkeend	PUR+H	4,1	4,7	5,2	4,4	4,4	5,1	4,3	10,5
	AAC	15,4	17,2	13,4	16,6	15,8	15,8	15,2	16,3
	AAC+H	8,9	8,8	8,9	8,5	8,8	8,5	21,0	25,1
	CaSi	7,0	9,0	6,2	8,4	7,9	7,8	7,4	8,1
Sum af absolut forskel		35,4	39,6	33,7	38,0	36,9	37,3	48,0	60,1
Punkt 7 midten af bjælke	PUR+H	4,0	2,8	3,6	3,2	3,4	3,3	3,4	0,7
	AAC	4,0	15,5	7,1	11,1	9,8	9,6	8,9	10,2
	AAC+H	6,5	4,6	5,4	4,8	4,9	5,0	6,2	6,4
	CaSi	6,4	14,3	8,3	11,2	10,2	10,0	9,5	10,6
Sum af absolut forskel		20,8	37,2	24,4	30,4	28,3	28,0	28,0	27,8
Totalsum		209,3	258,3	197,4	233,8	222,3	217,9	226,5	249,3

Grønne markeringer viser hvilken af de fem danske referenceår (og de øvrige referenceår) der har størst lighed med måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. måledatene. Rød tekst er simuleringer der blev stoppet grundet konvergensfejl (beregnings fejl). Værdier er derfor bestemt ud fra tilgængelig dataserie før simuleringerne blev stoppet.

5.3.6 Risiko for skimmelsvampevækst

Dette afsnit sammenligner risikoen for skimmelsvampevækst i de 4 vægkonstruktioner mellem de fem danske referenceår, de øvrige referenceår, og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. De grafiske visninger af risiko for skimmelsvampevækst er baseret på time værdier.

FIGUR 55-58 viser risikoen for skimmelsvampevækst i punkt 3 – skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering, FIGUR 59-62 viser risikoen i punkt 5 – den indlejrede rem, og FIGUR 63-66 viser risikoen i punkt 6 – den indlejrede bjælkeende. TABEL 25-27 nedenfor viser gennemsnitsværdier, maksimale værdier og standard afvigelse for den teoretiske risiko for skimmelvækst i de 3 måle punkter.

Punkt 3 - *skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering:*

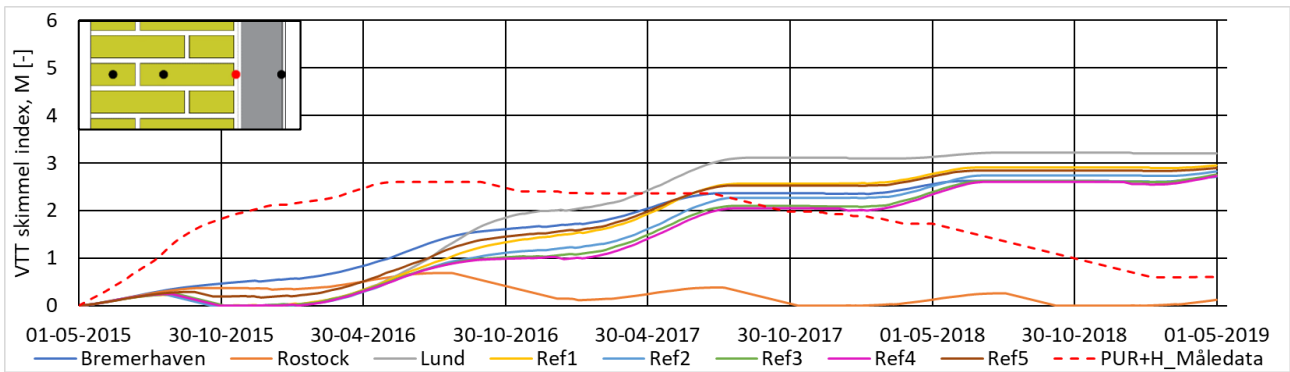
Forskellene mellem de danske referenceår og måledataene er betydeligt forskellige for vægkonstruktioner med og uden imprægnering. For væggen uden imprægnering er risikoen for skimmelsvampevækst relativt ens over perioden (FIGUR 56 og 58), med undtagelse af de første 1½ år af måleperioden. Imidlertid er der betydelige forskelle mellem simuleringerne og måledataene for vægkonstruktioner med imprægnering (FIGUR 55 og 57). For væggen isoleret med polyurethan plader og med imprægnering (FIGUR 55) er der relativt dårlig lighed mellem måledataene og alle referenceår. For væggen isoleret med autoklaveret porebeton (FIGUR 57) ligger måledataene mellem simuleringerne med Bremerhaven og Lund, men der er relativt dårlig lighed med de resterende referenceår.

Punkt 5 – *indlejrede rem:*

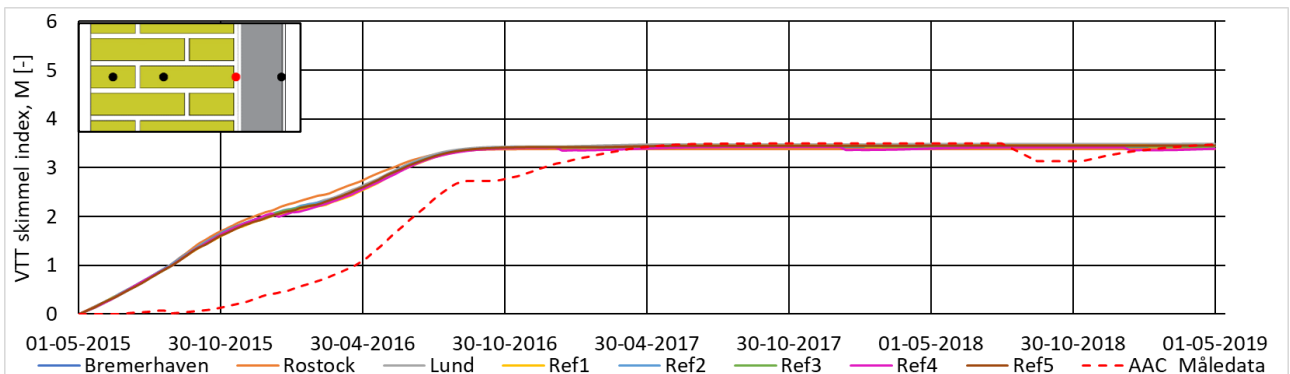
For den indlejrede rem er der relativt god lighed mellem de danske referenceår og måledataene for risikoen for skimmelsvampevækst over tid, med undtagelse af den imprægnerede vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton (FIGUR 61). Som for skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering, er der større forskelle mellem simuleringerne og måledataene i begyndelsen af måleperioden, men forskellene bliver mindre over tid og ender på et relativt ens niveau. For den imprægnerede vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton, ses der derimod at simuleringer oplever høj skimmel risiko i begyndelsen og derefter faldt, mens måledataene har lav risiko i begyndelsen og derefter stiger.

Punkt 6 – *indlejrede bjælkeende:*

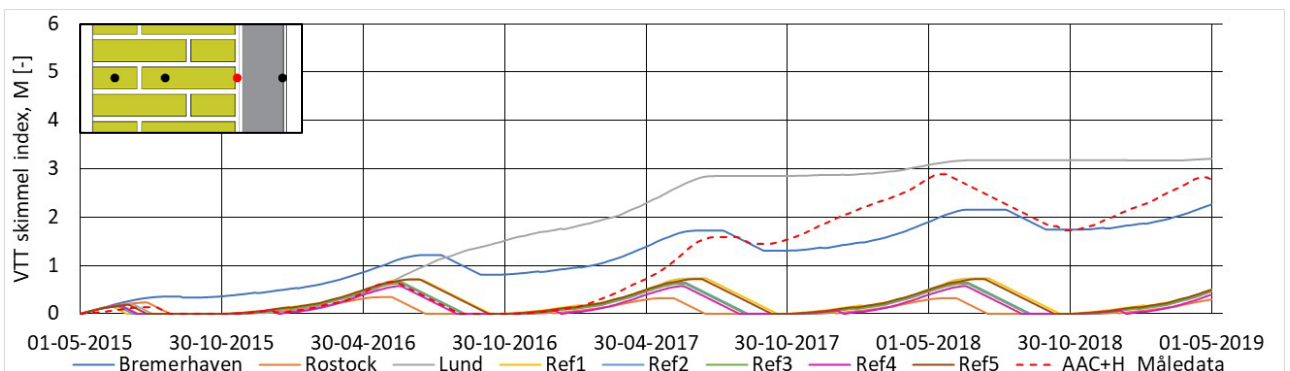
Modsat den indlejrede rem er der relativt dårlig lighed mellem de konstruerede referenceår og måledataene vedr. risikoen for skimmelsvampevækst over tid i den indlejrede bjælkeende. For væggene isoleret med polyurethan plader (FIGUR 63) eller autoklaveret porebeton plader (FIGUR 64-65) var forskellene generelt store ($\Delta M > 1$). For væggen isoleret med kalciumsilikat plader (FIGUR 66) svingede forskellen hen over måleperioden, med store forskelle ($\Delta M > 1$) i begyndelsen og slutningen af måleperioden, mens der i midten af perioden var en bedre lighed mellem simuleringer og måledata. Den dårligste lighed blev observeret mellem den ikke imprægnerede væg isoleret med autoklaveret porebeton plader (FIGUR 65), hvor alle simuleringerne resulterede i betydelig større skimmel risiko ($\Delta M > 3$) ift. måledataene over det meste af simuleringsperioden.



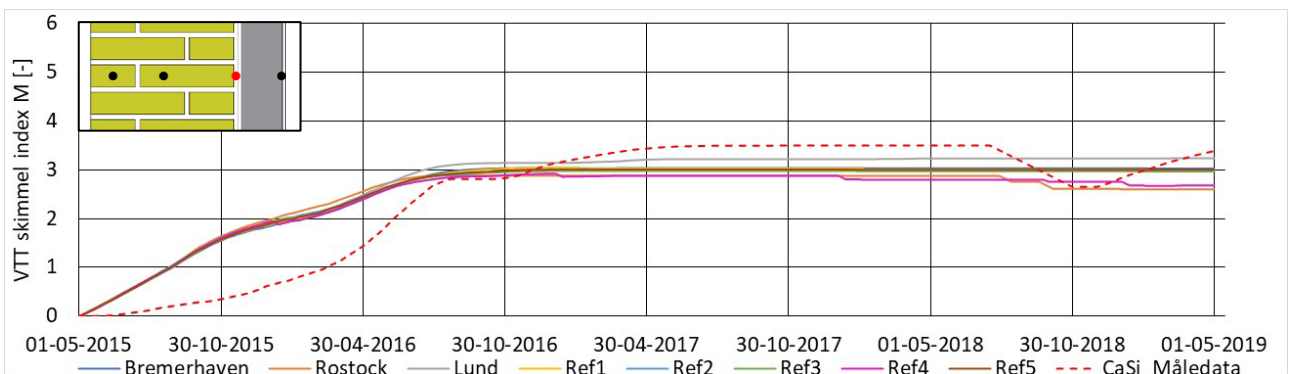
FIGUR 55. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 3 – skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med calcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



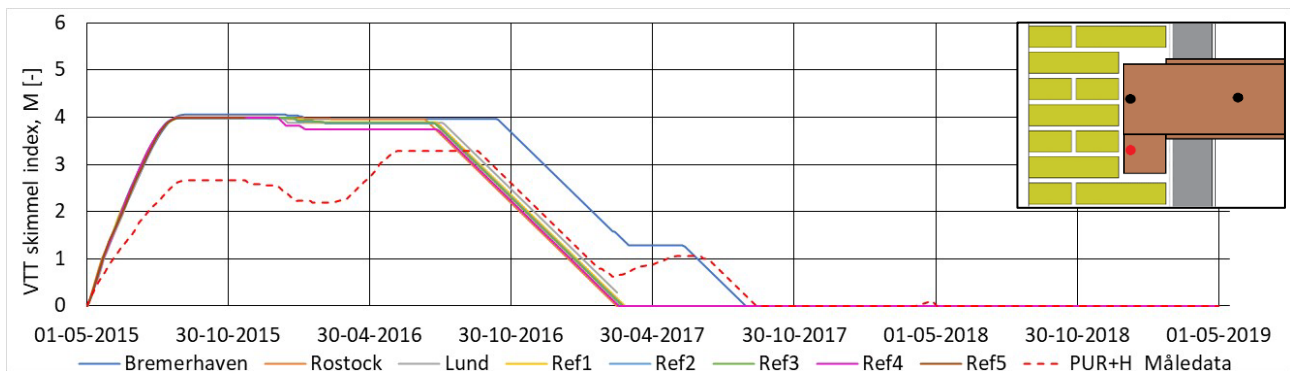
FIGUR 56. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 3 – skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



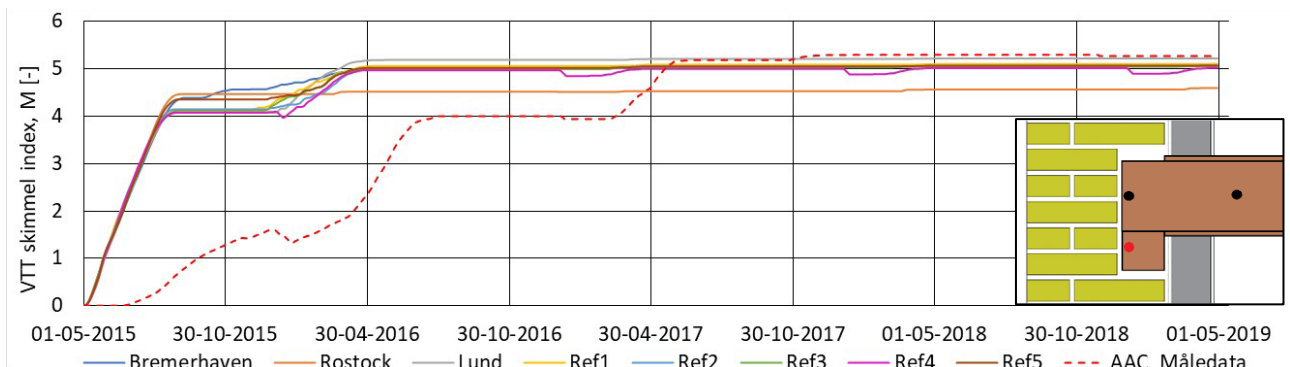
FIGUR 57. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 3 – skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.



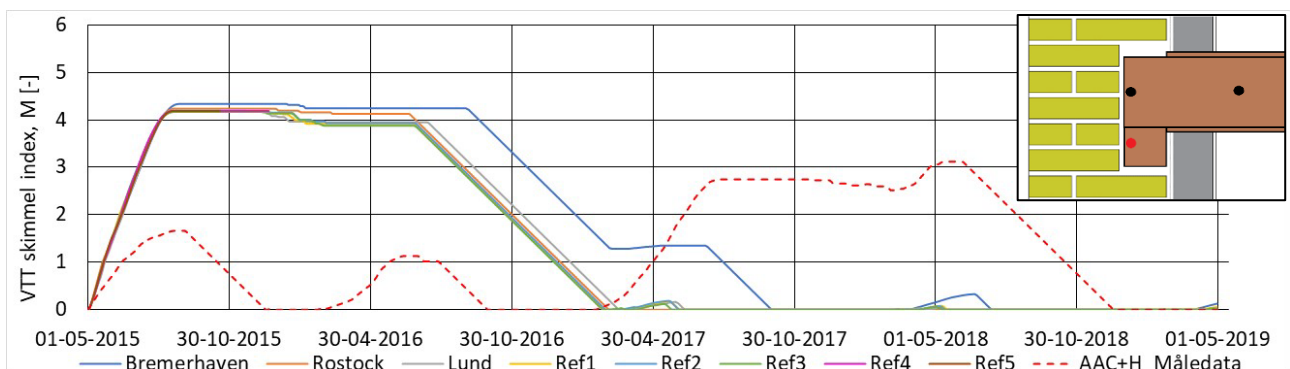
FIGUR 58. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 3 – skillefladen mellem murværket og den indvendige isolering. Her vist vægkonstruktion isoleret calcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.



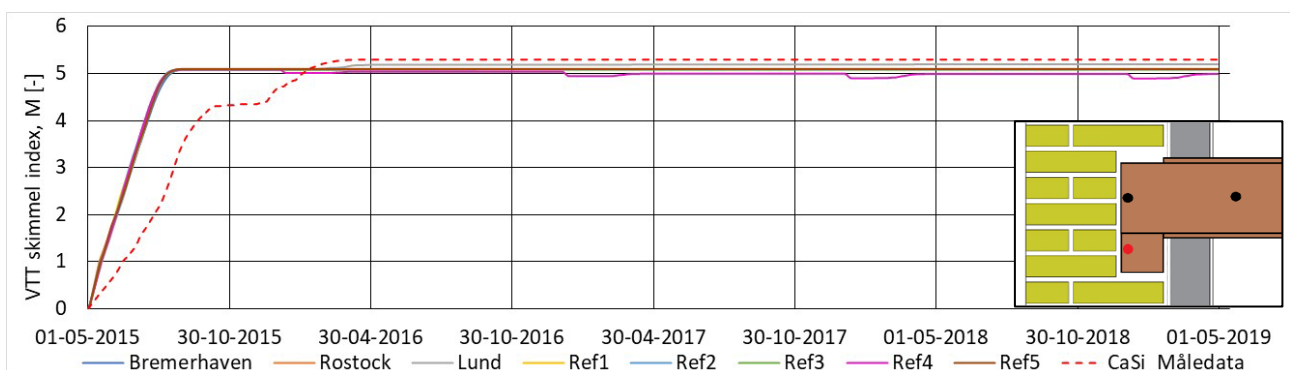
FIGUR 59. Teoretisk risiko for skimmelsvampbevækst i punkt 5 – indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med kalcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



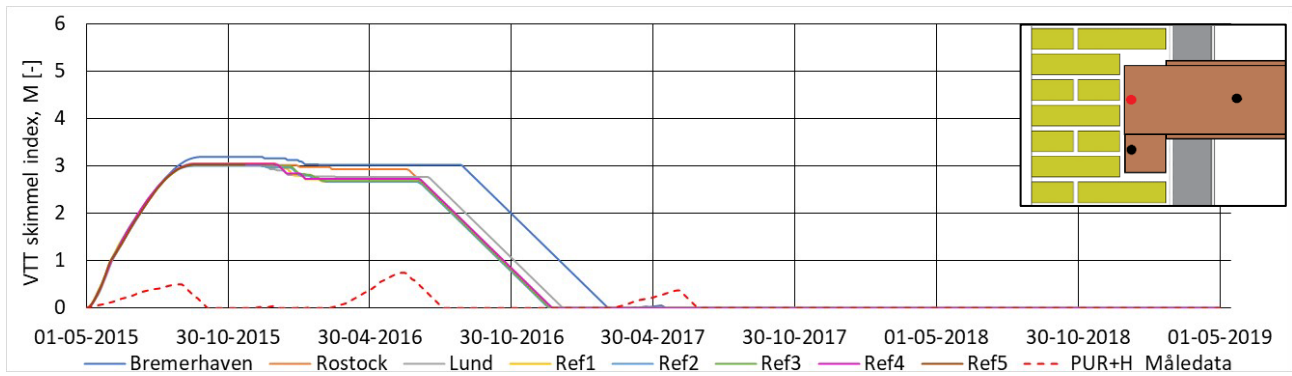
FIGUR 60. Teoretisk risiko for skimmelsvampbevækst i punkt 5 – indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



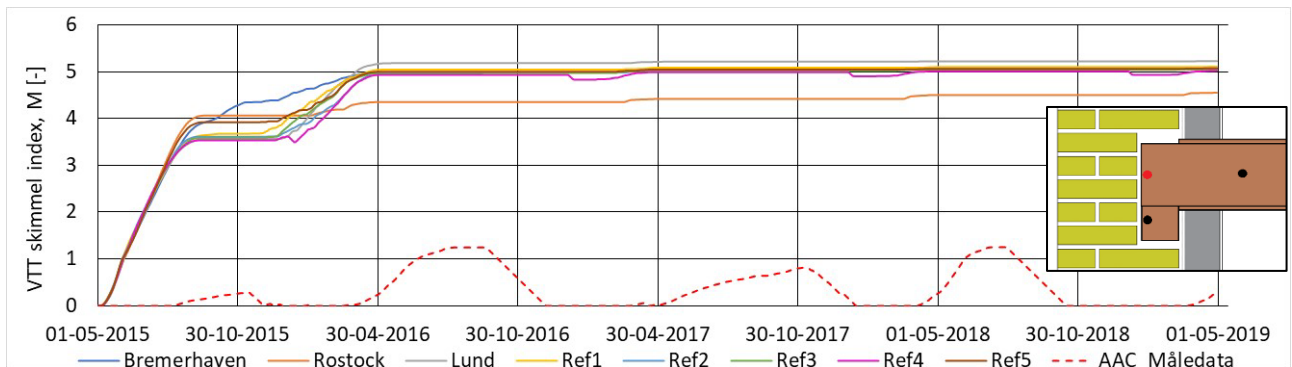
FIGUR 61. Teoretisk risiko for skimmelsvampbevækst i punkt 5 – indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.



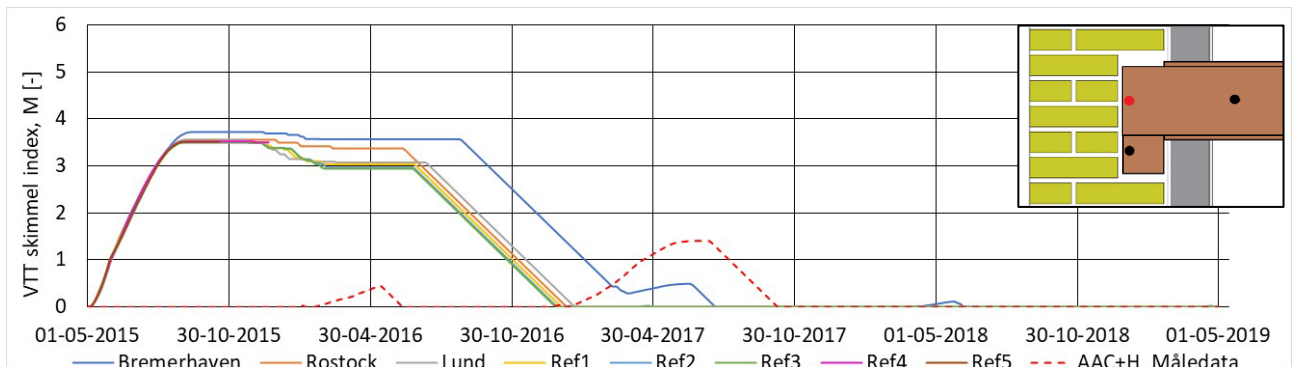
FIGUR 62. Teoretisk risiko for skimmelsvampbevækst i punkt 5 – indlejrede rem. Her vist vægkonstruktion isoleret med kalcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.



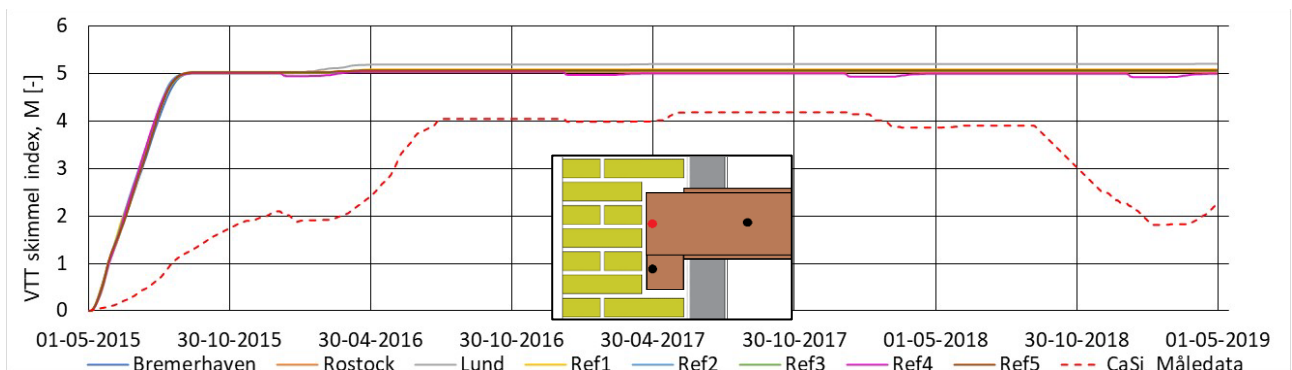
FIGUR 63. Teoretisk risiko for skimmelsvampvækst i punkt 6 – indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med polyurethan plader med calcium silikat kanaler, med udvendig imprægnering.



FIGUR 64. Teoretisk risiko for skimmelsvampvækst i punkt 6 – indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, uden udvendig imprægnering.



FIGUR 65. Teoretisk risiko for skimmelsvampvækst i punkt 6 – indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med autoklaveret porebeton plader, med udvendig imprægnering.



FIGUR 66. Teoretisk risiko for skimmelsvampvækst i punkt 6 – indlejrede bjælkeende. Her vist vægkonstruktion isoleret med calcium silikat plader, uden udvendig imprægnering.

Fra TABEL 25-27, kan man derimod se, at gennemsnitsværdier for risikoen for skimmelsvampevækst over tid generelt ikke er betydeligt forskellige mellem de danske referenceår og måledataene. Typisk er $\Delta M < 1$ mellem de danske referenceår og måledataene, når man kigger på de gennemsnitlige skimmelindeks værdier. Større forskelle blev observeret mere i træelementerne i nogle vægkonstruktioner.

TABEL 25. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 3 – skillefladen mellem murværk og indvendig efterisolering.

	Væg	Bremerhaven	Rostock	Lund	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Måledata
Gns. VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	1,73	0,24	1,98	1,68	1,51	1,43	1,39	1,72	1,78
	AAC	2,89	2,89	2,94	2,90	2,91	2,90	2,87	2,91	2,45
	AAC+H	1,23	0,10	1,88	0,26	0,20	0,19	0,15	0,26	1,10
	CaSi	2,59	2,47	2,73	2,59	2,57	2,56	2,45	2,58	2,47
Max VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	2,71	0,68	3,22	2,95	2,82	2,76	2,73	2,89	2,60
	AAC	3,41	3,38	3,49	3,45	3,45	3,44	3,43	3,45	3,50
	AAC+H	2,26	0,35	3,21	0,73	0,65	0,63	0,57	0,72	2,89
	CaSi	3,04	2,88	3,24	3,05	2,99	2,98	2,92	3,01	3,50
SD for VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	0,88	0,19	1,29	1,13	1,05	0,98	0,97	1,05	0,69
	AAC	0,91	0,90	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,94	1,33
	AAC+H	0,60	0,11	1,25	0,24	0,20	0,20	0,18	0,23	1,01
	CaSi	0,80	0,71	0,86	0,78	0,76	0,76	0,71	0,78	1,24

TABEL 26. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 5 – indlejrede rem.

	Væg	Bremerhaven	Rostock	Lund	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Måledata
Gns. VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	1,72	1,40	3,05	1,54	1,41	2,13	1,38	3,06	1,18
	AAC	4,19	4,36	4,83	4,75	4,71	4,70	4,65	4,74	3,85
	AAC+H	1,81	1,43	1,43	1,38	1,53	1,37	3,38	3,06	1,19
	CaSi	4,60	4,94	5,00	4,93	4,93	4,92	4,85	4,93	4,87
Max VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	4,06	4,00	3,99	3,98	3,98	3,99	3,99	3,99	3,29
	AAC	4,99	4,60	5,22	5,11	5,07	5,06	5,02	5,07	5,30
	AAC+H	4,33	4,23	4,20	4,17	4,18	4,16	4,18	4,19	3,12
	CaSi	5,09	5,10	5,20	5,09	5,09	5,08	5,08	5,10	5,30
SD for VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	1,76	1,73	1,18	1,74	1,71	1,71	1,69	1,21	1,22
	AAC	1,25	0,71	0,92	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	1,77
	AAC+H	1,82	1,79	1,76	1,74	1,77	1,74	1,24	1,33	1,10
	CaSi	1,16	0,71	0,74	0,71	0,71	0,71	0,70	0,71	1,11

Rød tekst er simuleringer der blev stoppet grundet konvergensfej (beregnings fejl). Værdier er derfor bestemt ud fra tilgængelig dataserie før simuleringerne blev stoppet.

TABEL 27. Teoretisk risiko for skimmelsvampevækst i punkt 6 – indlejrede bjælkeende.

	Væg	Bremerhaven	Rostock	Lund	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Måledata
Gns. VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	1,10	0,93	1,99	0,98	0,89	1,36	0,91	2,23	0,08
	AAC	3,99	4,18	4,73	4,66	4,59	4,59	4,53	4,65	0,33
	AAC+H	1,37	1,09	1,07	1,04	1,12	1,01	2,74	2,42	0,16
	CaSi	4,44	4,83	4,96	4,88	4,86	4,85	4,80	4,86	3,08
Max VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	3,20	3,06	3,05	3,02	3,00	3,03	3,04	3,03	0,75
	AAC	4,97	4,55	5,22	5,11	5,06	5,05	5,02	5,07	1,25
	AAC+H	3,72	3,56	3,56	3,50	3,50	3,51	3,52	3,51	1,40
	CaSi	5,04	5,03	5,20	5,08	5,06	5,05	5,03	5,07	4,18
SD for VTT skimmel index, M [-]	PUR+H	1,36	1,27	1,10	1,25	1,22	1,29	1,24	0,97	0,17
	AAC	1,35	0,76	1,05	0,97	0,97	0,97	0,96	0,94	0,41
	AAC+H	1,58	1,47	1,42	1,40	1,42	1,38	1,12	1,18	0,37
	CaSi	1,30	0,81	0,85	0,81	0,80	0,80	0,79	0,81	1,22

Rød tekst er simuleringer der blev stoppet grundet konvergensfejl (beregnings fejl). Værdier er derfor bestemt ud fra tilgængelig dataserie før simuleringerne blev stoppet.

TABEL 28 viser de absolutte forskelle mellem VTT skimmel resultater baseret på simuleringer med de danske referenceår og på måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. Fra TABEL 28, ses det at den gennemsnitlige absolutte forskel er overordnet mindst for det danske referenceår 1, efterfulgt af referenceår 2, og at begge disse har bedre lighed med måledataene end de øvrige referenceår fra de nærliggende målestationer. Det ses også at referenceår 5 overordnet har mindst lighed med måledataene af alle otte referenceår der blev simuleret.

Ift. lighed mellem simuleringer og måledata i de forskellige målelokationer ses det at, der er størst lighed med måledataene for skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering (punkt 3), efterfulgt af den indlejrede rem (punkt 5). Imidlertid er der mindst lighed med måledataene for den indlejrede bjælkeende (punkt 6), hvor de absolutte forskelle generelt er 5-6 gange større end set for skillefladen mellem murværk og den indvendige isolering.

TABEL 28. VTT skimmel indeks: absolutte forskelle mellem referenceår og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling. Små værdier betyder bedre lighed mellem de danske referenceår og måledataene fra DTUs forsøgsopstilling.

	Væg	Bremerhaven	Rostock	Lund	Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3	Ref. 4	Ref. 5
Punkt 3 - skilleflade murværk/ isolering	PUR+H	1,00	1,54	1,37	1,27	1,24	1,21	1,21	1,19
	AAC	0,50	0,52	0,50	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49
	AAC+H	0,47	1,01	0,79	0,89	0,92	0,92	0,95	0,90
	CaSi	0,48	0,59	0,45	0,49	0,51	0,51	0,57	0,50
Sum af absolut forskel		2,45	3,67	3,11	3,13	3,16	3,14	3,22	3,07
Punkt 5 - indlejret rem	PUR+H	0,57	0,53	0,83	0,55	0,51	0,78	0,50	1,08
	AAC	2,47	1,21	1,04	1,07	1,06	1,07	1,06	1,09
	AAC+H	2,24	2,12	2,11	2,07	2,28	2,06	2,40	1,88
	CaSi	0,71	0,38	0,30	0,38	0,39	0,39	0,46	0,38
Sum af absolut forskel		5,98	4,24	4,27	4,06	4,23	4,29	4,42	4,43
Punkt 6 - indlejrede bjælkeende	PUR+H	1,05	0,88	1,85	0,92	0,84	1,28	0,86	2,02
	AAC	3,68	3,85	4,41	4,33	4,27	4,27	4,20	4,32
	AAC+H	1,41	1,22	1,20	1,17	1,26	1,14	2,74	2,42
	CaSi	2,47	1,76	1,88	1,80	1,78	1,77	1,72	1,78
Sum af absolut forskel		8,61	7,70	9,34	8,22	8,15	8,46	9,52	10,55
Totalsum		17,04	15,61	16,72	15,41	15,54	15,89	17,17	18,04

Rød tekst er simuleringer der blev stoppet grundet konvergensfejl (beregnings fejl). Værdier er derfor bestemt ud fra tilgængelig dataserie før simuleringerne blev stoppet. Blå markeringer viser hvilket referenceår har den samlede laveste absolutte forskel ift. de nærliggende målestationer.

KONKLUSION

6 KONKLUSION

Denne rapport omhandler udarbejdelse af et referenceår til anvendelse ved varme- og fugt-simuleringer (hygrotermiske simuleringer). Referenceåret er udarbejdet på baggrund af historiske data for perioden 2001-2019 for DMI målestation 6188 (Sjælsmark), eksklusive data for 2010. Suppleret med data fra 6156 (Holbæk flyveplads), Hillerød SØ (30180) [nedbør], Store Hareskov (30230) [nedbør] og Gørløse (30140) [nedbør]. Referenceåret er udarbejdet på baggrund af beskrivelsen i afsnit 4, *Behandling af klimadata*. Repræsentative måneder er udvalgt til referenceåret ved statistisk analyse, og det nye referenceår består af 8760 timer af hver udvalgt parameter i klimadatasættet. Der blev konstrueret og testet fem nye referenceår, og resultaterne blev holdt op imod referenceår fra nærliggende tyske og svenske målestationer, samt imod måledata fra et dansk feltforsøg udført i perioden maj 2015 til maj 2019. Sammenligning med måledataene er relevant, da feltforsøget blev udført inden for samme periode, som blev anvendt til de nye danske referenceår, hvorimod de udenlandske referenceår muligvis er fra andre perioder.

Sammenligning af klimaparametre viste, at der var meget lighed mellem de fem danske referenceår for mange af parametrene, og at der mest af alt var forskelle i den totale mængde årlig nedbør og lidt variationer ift. vindretning. Ift. de øvrige referenceår for nærliggende målestationer (Bremerhaven, Hamborg, Rostock og Lund), har de danske referenceår lidt højere gennemsnitlig relativ luftfugtighed og flere timer med regn i løbet af året. Derimod har de øvrige referenceår mere årlig slagregn og flere tilfælde hen over året med meget nedbør på kort tid.

Fra WUFI® Pro simuleringerne blev det observeret, at der generelt var god lighed mellem de fem danske referenceår og de øvrige referenceår for de tre typiske bygningsdele (fladt tag, let og tung ydervæg) – dette synliggjort både ved grafer for relativ fugtighed fx bag vindspærreplade i lette vægge, samt de absolutte forskelle i hhv. relativ fugtighed og det beregnede skimmelindeks. Der blev imidlertid observeret nogle konvergensfejl i enkelte simuleringer kørt med referenceår 1 og 4 (let ydervæg, nordlig retning), som førte til de store afvigelser i absolutte værdier.

Ifølge DELPHIN simuleringerne udført på indvendige efterisoleringsløsninger blev der ligeledes observeret, at der generelt ikke var de store forskelle mellem de fem danske referenceår ift. temperatur, relativ fugtighed, og VTT skimmel risiko. For mange simuleringer var der god lighed med måledataene, og det blev ofte observeret, at de fem danske referenceår typisk lå mellem de tyske og svenske referenceår ift. temperatur og relative fugtighed. Dette synes at indikere, at det vil være muligt fremadrettet at anvende de danske referenceår til fugtsimuleringer for danske projekter.

Holdes resultaterne for sammenligningen af ligheden mellem de enkelte klimaparametre, samt WUFI® Pro og DELPHIN resultaterne op imod hinanden, så peger dette på, at **referenceår 2** samlet set vil være det mest repræsentative og mest pålidelige som nyt dansk referenceår til fugtsimuleringer. Udvalgte måneder fra tidsperioden 2001-2019 til det nye danske referenceår er vist i TABEL 29. Som beskrevet i afsnit 4.1 TABEL 3, er Referenceår 2 sammensat med hhv. temperatur, relativ fugtighed og nedbør som de primære udvælgelsesparametre, og stråling som den sekundære udvælgelsesparameter. Prioriteringen af parametre i Referenceår 2 blev udvalgt for at få størst påvirkning fra slagregn på f.eks. sugende ydervægsmaterialer. For konstruktioner hvor regn ikke er af stor betydning, er det derimod den relative luftfugtighed, der er vigtig, hvor det blev observeret, at de fem nye danske referenceår var meget ens. Som beskrevet i afsnit 4.3.

TABEL 29. Udvalgte måneder til repræsentation af fugtreferenceåret.

Måned	År
Januar	2019
Februar	2004
Marts	2011
April	2004
Maj	2014
Juni	2006
Juli	2019
August	2004
September	2011
Oktober	2013
November	2017
December	2017

Tabelnote

REFERENCER

7 REFERENCER

Ali Mohamed, F. & Hens H. (1992) Outdoor Climate: Reference Years. Equivalent Temperature for Condensation, International Energy Agency. Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 24 Heat-Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE). Report T2-B-92/03, 1992.

Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(13), 1079-1130. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.06.003>

Blümel, K., Hollan, E., Kähler, M. & Peter, R. (1986). Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland, DWD, Offenbach.

BUILD, Aalborg Universitet. (2022) BSIM <https://build.dk/bsim/Pages/Start.aspx>

Cornick, S., & Dalgliesh, W.A. (2003). A moisture index approach to characterizing climate for moisture management of building envelopes, In proceedings: *9th Conference on Building Science Technology*, Februar 01, p. 383-398, Vancouver, British Columbia, Canada.

Cornick, S., Djebbar, R., & Dalgliesh, W. A. (2003). Selecting moisture reference years using a moisture index approach. *Building and Environment*, 38(12), 1367-1379. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00139-2)

Das, S., & Sarkar, K. (2020). Wetting and drying patterns in a wet Moisture Reference Year identified using the Weinert's index: Station versus gridded data. In *Hygrothermal Behaviour and Building Pathologies* (pp. 1-15). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50998-9_1

DS/EN ISO 13788 (2013). Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. Dansk Standard.

DS/EN 15026 (2007). Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. Dansk Standard.

DS/EN ISO 15927-4 (2006). Hygrothermal performance of buildings – Calculation and presentation of climatic data – Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling. Dansk Standard.

Finkenstein, C., Häupl, P. (2008, June). Atmospheric longwave radiation under cloudy skies for HAM simulation programs. 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries (nsb2008), June 15. DOI: 10.4122/1.1000000952 <https://bwk.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/TUD%20Oct%202007%20BGinf%20A41-T3-D-07-1.pdf>

Fraunhofer IBP. (2021). WUFI® Pro <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>

Gaur, A., Lu, H., Armstrong, M., & Lacasse, M. (2020, January). Historical and Projected Future Changes in Potential Moisture Damage in Building Envelopes across Canada. In *100th American Meteorological Society Annual Meeting*. AMS.

Geving, S. (1997). Moisture Design of Building Constructions: Hygrothermal Analysis Using Simulation Models – Part I and II, Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering.

Hagentoft, C.-E. & Harderup, E. (1996). Climatic Influences on the Building Envelope Using the Π Factor, Environmental Conditions. Closing seminar. IEA-Annex 24 HAMTIE Task 2.

Hens, H. 2002. Heat, Air and Moisture Transfer In Highly Insulated Envelopes (HAMTIE), Technical Synthesis Report, IEA ECBCS Annex 24.

- Hukka, A. & Viitanen, H. A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, vol. 33, issue 6, p. 475-485. DOI: 10.1007/s002260050131. <http://link.springer.com/10.1007/s002260050131>
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Odgaard, T. R., Andersen, B., Rode, C., & Møller, E. B. (2020a). Hygrothermal assessment of diffusion open insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls. *Building & Environment*, vol. 182, p. 107011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107011>
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Odgaard, T. R., Andersen, B., Rode, C., & Møller, E. B. (2020b). Supplementary data for "Hygrothermal assessment of diffusion open insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls". <https://doi.org/10.11583/DTU.11907402>
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., & Møller, E. B. (2020c). Hygrothermal assessment of four insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls through calibrated numerical simulations. *Building & Environment*, vol. 180, p. 107031. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107031>
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., & Møller, E. B. (2020d). Supplementary data for "Hygrothermal assessment of four insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls through calibrated numerical simulations". DOI: 10.11583/DTU.12033735
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., Andersen, B., & Møller, E. B. (2021). Hygrothermal performance of six insulation systems for internal retrofitting solid masonry walls. *Journal of Building Physics*, vol. 44, issue 6. <https://doi.org/10.1177/174425912098>
- Jensen, N. F. (2021). Robust solutions for internal retrofitting solid masonry walls in historic buildings with regards to hygrothermal performance. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/270624466/Phd_thesis_Nickolaj.pdf
- Jensen, N. F., Morelli, M., Hansen, T. K., Svane, A. M. & Waagepetersen, R. (2022). BUILD RAPPORT 2023:11 Klimadata til fugtsimuleringer Referenceår [Datasæt], VBN. DOI: 10.5278/2a54ca3c-7a1c-4d6c-9933-4c75b7b5435d
- Kalamees, T., & Vinha, J. (2004). Estonian climate analysis for selecting moisture reference years for hygrothermal calculations. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27(3), 199-220. <https://doi.org/10.1177/1097196304038839>
- Kočí, J., Maděra, J., & Černý, R. (2014). Generation of a critical weather year for hygrothermal simulations using partial weather data sets. *Building and Environment*, 76, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.006>
- Kočí, J., Maděra, J., & Černý, R. (2015). Determination of the positive weather year for application in hygrothermal simulations. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 59, 97-107. 6th Nordic Building Physics Symposium 2002, Trondheim, Norway, pp. 651-658.
- Kumaran, M. K., Mukhopadhyaya P., Cornick S. M., Lacasse, M. A., Maref W., Rousseau M., Nofal M., Quirt J. D. & Dalglish W. A. (2002). A methodology to develop moisture management strategies for wood-frame walls in North America: application to stucco-clad walls.
- Künzel, H. M. (1995) Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components – One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 1995 (ISBN 3-8167-4103-7) https://wufi.de/en/wp-content/uploads/sites/11/Kuenzel_Diss_1994_EN.pdf
- Libralato, M., Murano, G., & De Angelis, A. Generation of Moisture Reference Years for Interstitial Condensation Risk Assessment: Influence of the Meteorological Record Length. In *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210832>

- Libralato, M., Murano, G., Saro, O., De Angelis, A., & Corrado, V. (2018). Hygrothermal modelling of building enclosures: Reference year design for moisture accumulation and condensation risk assessment. <https://doi.org/10.14305/ibpc.2018.ps19>
- Maxwell, E. L. (1987). A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation. Technical Report No. SERI/TR-215-3087, Golden, CO: Solar Energy Research Institute.
- Mukhopadhyaya, P., Goudreau, P., Kumaran, M. K. & van Reenen, D. (2002). Influence of material properties on the hygrothermal response of an ideal stucco wall - Results from hygrothermal simulations. 6th Nordic Building Physics Symposium 2002, Trondheim, Norway, pp. 611-618.
- Nicolai, A., Grunewald, J., & Zhang, J. J. (2007) Recent improvements in HAM simulation tools : DELPHIN 5 / CHAMPS-BES. Proceedings of 12th Symposium of Building Physics, March 29-31 2007, Dresden, Germany, p. 866-876.
- Nik, V.M. (2016). Making energy simulation easier for future climate - synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs). *Appl. Energy* 177, p. 204–226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.107>
- Nik, V.M. (2017). Application of typical and extreme weather data sets in the hygrothermal simulation of building components for future climate – a case study for a wooden frame wall. *Energy Build.* 154 (2017) 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.042>
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2010). Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, clearwater, Florida, USA, 2010. DOI: 10.1081/E-EEEE2-120046011. http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/2010_B11_papers/104_Ojanen.pdf
- Perez, R., Ineichen, P., Maxwell, E., Seals, R., & Zelenka, A. (1992). Dynamic Global-to-Direct Irradiance Conversion Models. ASHRAE Transactions-Research Series, pp. 354-369
- Pvlib. (2022). pvlib.irradiance.dirint. <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.irradiance.dirint.html>
- RIBuild. (2020). About RIBuild. <https://www.ribuild.eu/about-ribuild>
- Rode, C. (1993). Reference years for moisture calculations, Denmark. Report T2-DK-93/02, IEA Annex 24, HAMTIE.
- Sahyoun, S., Ge, H., Aggarwal, C., Defo, M., & Moore, T. (2020). Effect of Selected Moisture Reference Year on the Durability Assessment of Wall Assemblies under Future Climates. In *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)*.
- Salonvaara, M., Sedlbauer, K., Holm, A., & Pazera, M. (2010). Effect of selected weather year for hygrothermal analyses. *Proceedings of thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- Sanders, C. (1996) Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts: Environmental Conditions. International Energy Agency, Leuven (1996), p. 24, Annex 24 Final report, volume 2 Acco.
- Schöner, T., & Zirkelbach, D. (2016). Development of hygrothermal reference years for Germany. In *Proceedings of Central European Symposium on Buildings Physics (CESBP)*.
- Tukey, J. (1977). Exploratory data analysis.
- UCL – BRE https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/976006/wic-appendix-d.pdf
- U.S. Department of Energy. (2022a) Weather Data by Location – All Regions – Europe (WMO Region 6) – Denmark – Weather Data Download – Copenhagen 061800 (IWEC)

https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/DNK/DNK_Copenhagen.061800_IWEC

U.S. Department of Energy. (2022b) EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation Auxiliary Programs https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/AuxiliaryPrograms.pdf

Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., & Van Den Bossche, N. (2019). Freeze-thaw risk in solid masonry: are moisture reference years able to represent real climate conditions? In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 282, p. 02034). EDP Sciences. DOI: 10.1051/matec-conf/201928202034

Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., & Van Den Bossche, N. (2022). Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations. *Building and Environment*, 2018, 109080. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109080>

Wang, L., Defo, M., Gaur, A., & Lacasse, M. A. (2021, November). Development of moisture reference years for assessing long-term mould growth risk of wood-frame building envelopes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2069, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2069/1/012015.

Wang, P. R. (2013). Teknisk Rapport 13-08 Referenceværdier: Månedso- og årsværdier for stationer 2001-2010, Danmark for temperatur, relativ luftfugtighed, vindhastighed, globalstråling og nedbør. Danmarks Meteorologiske Institut.

WindRose.xyz (2022). <https://windrose.xyz/> [Website: accessed 24-11-2022]

Zhou, X., Derome, D., & Carmeliet, J. (2016a). A new procedure for selecting moisture reference years for hygrothermal simulations. *Bauphysik*, 38(6), 361-365. <https://doi.org/10.1002/bapi.201610042>

Zhou, X., Derome, D., & Carmeliet, J. (2016b). Robust moisture reference year methodology for hygrothermal simulations. *Building and Environment*, 110, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.021>

Zirkebach, D., Schmidt, T., Kehrer, M., & Künzle, H. M. (2007). WUFI Pro - Manual (p. 43). Fraunhofer Institute.

Klimadata til fugtsimuleringer Referenceår

Denne rapport omhandler udarbejdelse af et referen-ceår til anvendelse ved varme- og fugtsimuleringer (hygrotermiske simuleringer). Referenceåret er udarbejdet på baggrund af historiske data for perioden 2001-2019 for Sjælsmark, suppleret med nedbørs data fra Holbæk flyveplads, Hillerød SØ, Store Hareskov og Gørløse for perioden 2001-2010. Rapporten er udformet så den dokumenterer grundlaget for referenceåret. Det er hensigten at referenceåret kan anvendes af projekterende og udførende til at gennemføre fugtsimuleringer og bedømme konstruktioner ud fra danske klimadata.