



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

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

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

4. semester

Titel på masterprojekt:

Mikrobiel vækst på beton

Projektperiode:

17. august 2020 – 17. december 2020

Vejledere:

Martin Morelli

Birgitte Andersen

Studerende:


Bjarne Pustelnik

Antal normalsider: 48

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 17. december 2020

Resume:

Fugt er involveret i mange byggeskader, enten som den egentlige skadesforvolder eller i forbindelse med følgeskader. Risiko for skimmelsvampevækst på nystøbte betonoverflader anses generelt som lav, eftersom betonens initiale pH-værdi antages at være en betydelig væksthæmmer. Ikke desto mindre kan der registreres skimmelsvampevækst på betonoverflader i en række nybyggerier allerede kort tid efter ibrugtagning.

For at estimere affugtningstiden for typiske betontyper sammenlignes beregningsresultater fra programmerne TorkaS, BYG-ERFA-modellen og WUFI og der ses meget varierende resultater. TorkaS er fundet uegnet til vurdering af affugtningstider under danske forhold. Korte byggeprocesser vil dog kunne udføres fugtmæssigt forsvarligt såfremt der vælges betontyper, som sikrer øget kemisk fugtbinding samt brug af mekanisk affugtning.

I specialet fremføres en adapteret prøvemethode for vurdering af betonoverfladers pH-værdi, som ved feltforsøg har vist betydelig karbonatisering af betonoverfladen, 12 uger efter støbning måles pH-værdi på ~9,5. Med specialet er det sandsynliggjort at flere specifikke skimmelsvampearter kan trives på beton med pH-værdi op til ~10,5. Af casestudiet fra 21 konkrete sager i Danmark kan det konstateres, at betonoverflader favoriserer vækst af skimmelsvampe *Aspergillus versicolor*, *Penicillium spp*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus sydowii*, *Aspergillus ochraceus* og *Chaetomium globosum*.

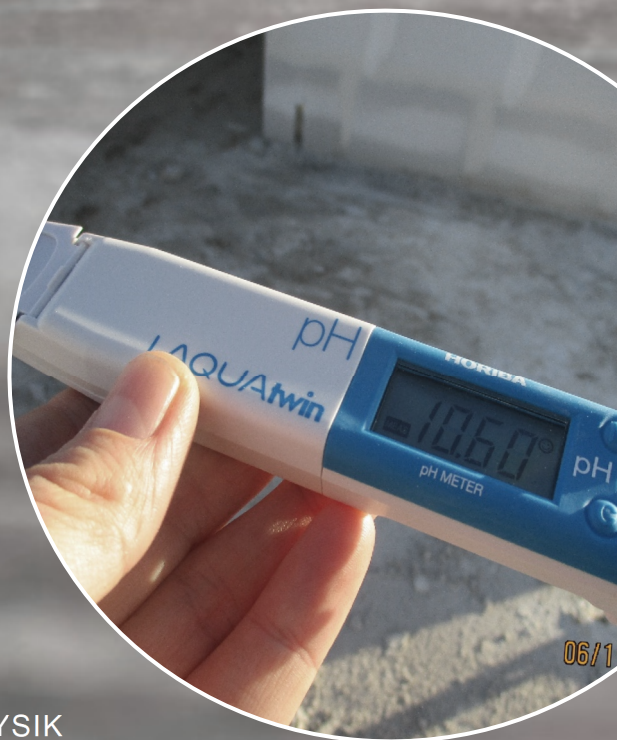
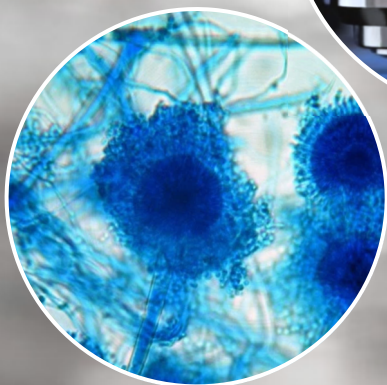
Fjernelse af cementpasta på nystøbte betonoverflader, eksponering for vejrlig og besmudsning (næsten uagtet rengøringsniveauet), vil efterlade et niveau af næringsstoffer, som muliggør mikrobiel aktivitet ved fugtniveauer > 75 % RF. Projektet har ikke entydigt vist hvilke af de bearbejdede problemstillinger som er væsentligst for nyangreb af skimmelsvampe på beton, men sandsynliggjort at besmudsningsgraden og pH-reduktion i betonoverfladen (0,2-0,5 mm) er væsentlige risikofaktorer.



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

MIKROBIEL VÆKST PÅ BETON

FUGTKRITERIER OG ALKALINITET



MASTER I BYGNINGSFYSIK
AAU – Aalborg Universitet, København
December 2020

TITELBLAD

Titel	Mikrobiel vækst på beton
Undertitel	Fugtkriterier og alkalinitet
Afhandling	Masterprojekt
Uddannelse	Master i Bygningsfysik (master)
Oplag	1. udgave
Forfatter	Bjarne Pustelnik
Studienummer	20157037
Studiemail	bpuste15@student.aau.dk
Arbejdsmail	bpu@obh-gruppen.dk
Uddannelsessted	Aalborg Universitet, København A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København
Vejledere	Martin Morelli, Senior Researcher (hovedvejleder) Birgitte Andersen, Associate Professor (bivejleder)
Projektperiode	17-08-2020 – 17-12-2020
Udgivelsesår	2020
Emneord	Skimmelsvampe, fugtkriterier, byggefugt, overskudsfugt, pH-værdi, Uorganiske byggematerialer, Skimmelvækst på beton, Overflade-pH
Forside	Forsidebillede fra getty-image®, mikroskopibillede af <i>Aspergillus versicolor</i> , udsnit af en mikroskoplins og et elektrokemisk pH-meter
Normalsider	48 sider (å 2400 anslag inkl. mellemrum)
Sideantal	70 sider + 24 siders bilag
Generelt	All rights reserved - ingen dele af denne publikation må gengives uden forudgående tilladelse fra forfatteren. Rapporten er udarbejdet som en del af uddannelsen til Master i Bygningsfysik.

RESUMÉ

Fugt er involveret i mange byggeskader, enten som den egentlige skadesforvolder eller i forbindelse med følgeskader. Risiko for skimmelsvampevækst på nystøbte betonoverflader anses generelt som lav, eftersom betonens initiale pH-værdi antages at være en betydelig væksthæmmer. Ikke desto mindre kan der registreres skimmelsvampevækst på betonoverflader i en række nybyggerier allerede kort tid efter ibrugtagning.

For at estimere affugtningstiden for typiske betontyper sammenlignes beregningsresultater fra programmerne TorkaS, BYG-ERFA-modellen og WUFI og der ses meget varierende resultater. TorkaS er fundet uegnet til vurdering af affugtningstider under danske forhold. Korte byggeprocesser vil dog kunne udføres fugtmæssigt forsvarligt såfremt der vælges betontyper, som sikrer øget kemisk fugtbinding samt brug af mekanisk affugtning.

I specialet fremføres en adapteret prøvemethode for vurdering af betonoverfladers pH-værdi, som ved feltforsøg har vist betydelig karbonatisering af betonoverfladen, 12 uger efter støbning måles pH-værdi på ~9,5. Med specialet er det sandsynliggjort at flere specifikke skimmelsvampearter kan trives på beton med pH-værdi op til ~10,5. Af casestudiet fra 21 konkrete sager i Danmark kan det konstateres, at beton-overflader favoriserer vækst af skimmelsvampene *Aspergillus versicolor*, *Penicillium spp*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus sydowii*, *Aspergillus ochraceus* og *Chaetomium globosum*.

Fjernelse af cementpasta på nystøbte betonoverflader, eksponering for vejrlig og besmudsning (næsten uagtet rengøringsniveauet), vil efterlade et niveau af næringsstoffer, som muliggør mikrobiel aktivitet ved fugtniveauer > 75 % RF. Projektet har ikke entydigt vist hvilke af de bearbejdede problemstillinger som er væsentligst for nyangreb af skimmelsvampe på beton, men sandsynliggjort at besmudsningsgraden og pH-reduktion i betonoverfladen (0,2-0,5 mm) er væsentlige risikofaktorer.

SUMMARY

Moisture is involved in many building damages, either as the actual cause of damage or in connection with consequential damage. Risk of mold growth on newly cast concrete surfaces is generally considered low, between the initial pH value of the concrete is assumed to be and possible growth inhibitor. Nevertheless, mold growth can be detected on concrete surfaces in several new buildings shortly after commissioning.

To estimate the dehumidification time for typical concrete types, calculation results from programmer TorkaS, BYG-ERFA models and WUFI are compared and very different results are seen. TorkaS has been found unsuitable for assessing dehumidification times under Danish conditions. Short construction processes will be able to be performed in a moisture-safe manner if concrete types are chosen, such as possible increased chemical moisture bonding and the use of mechanical dehumidification.

I thesis presented an adapted test method for assessing the pH value of concrete surfaces, which in field experiments has shown different carbonation of the concrete surface, 12 weeks after casting, the pH value is measured at ~ 9.5. With the thesis, it is probable that several specific mold species can thrive on concrete with a pH value of up to ~ 10.5. From the case study from 21 specific cases in Denmark, it can be stated that concrete surfaces favor the molds *Aspergillus versicolor*, *Penicillium* spp, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus sydowii*, *Aspergillus ochraceus* and *Chaetomium globosum*.

Removal of cement paste on newly cast concrete surfaces, exposure to weather and dirt (almost regardless of the level of cleaning), will leave and level of nutrients, possibly microbial activity at moisture levels > 75% RH. The project has not provided any evidence of the processed issues that are most significant for new mold growth on concrete, but probably done at the degree of soiling and pH reduction in the concrete surface (0.2-0.5 mm) are significant risk factors.

FORORD

Omhandlende masterprojekt er skrevet af Bjarne Pustelnik under vejledning af seniorforsker Martin Morelli og lektor Birgitte Andersen, begge fra Aalborg Universitet.

Informationer i denne rapport er fremkommet på baggrund af det hidtidige undervisningsmateriale- og pensum fra Masteruddannelsen i Bygningsfysik samt fra anvisninger, vejledninger, publikationer, lovtekst, og andre anerkendte tidsskrifter fundet enten via Aalborg Universitetsbibliotek eller ved brug af søgemaskinen Google Scholar. Kildehenvisninger fremgår med forfatter og årstal i teksten og refererer til litteraturliste bagest i rapporten.

Baggrunden for valget af projekt, er at jeg har en stor interesse og erfaring med byggeskader relateret til fugt, særligt i nybyggeri. Qua mit daglige virke med indeklimaundersøgelser og skadesudredning hos OBH Rådgivende Ingeniører A/S har jeg på nærmeste hold set hvilke konsekvenser det har, når der indbygges materialer med forhøjet fugtniveau. En ting er de direkte afledte økonomiske konsekvenser i form af tidsfristforlængelse, renovering, sanering osv., men det kan også have store personlige og helbredsmæssige omkostninger for det enkelte menneske. Følgeskader på grund af indbygget fugt udvikler sig typisk over tid, og hvis der er tale om skjulte skimmelsvampeforekomster kan indeklimasyntomer meget vel være den første ledetråd – og det er ikke unormalt at der går måneder-til-år inden skaderne udvikles og detekteres.

Sundhedsstyrelsen:

”Indeklimaet og luftkvaliteten påvirkes af fugt/skimmel, hvad enten den er synlig eller ej, da skimmelsporer og skimmelprodukter kan trænge gennem tilsyneladende tætte barrierer.”

(Sundhedsstyrelsen, 2015, s. 76)

Indledningsvis har jeg udført et litteraturstudie, hvor jeg undersøger typer og fordeling af byggeskader for nærmere at bedømme omfanget af fugtrelaterede byggeskader. Jeg har desuden indsamlet oplysninger fra 21 casestudier fra konkrete byggesager i Danmark, hvor der på nyere beton er konstateret skimmelsvampevækst. Der er anvendt konkrete sager fra undersøgelser foretaget af OBH Rådgivende Ingeniører A/S. Samtlige sager vil fremgå anonymiseret. For at få konkrete pH-værdier fra betonoverfladen har jeg udført feltmålinger for at bedømme karbonatiseringshastigheden for byggerier udsat for dansk klima, dvs. regn, vind og atmosfærisk luft indeholdende CO₂. Affugtningstider for et traditionel støbt terrændæk er desuden bedømt ved sammenligning af tre beregningsmetoder, to simple overslagsberegninger (en dansk og en svensk) samt en mere detaljeret, dynamisk fugtsimulering.

INDHOLDSFORTEGNELSE

INDLEDNING	6
BAGGRUND	8
TEORI.....	9
Fugt.....	9
Skimmelsvampe	19
Fugtkriterier	23
pH-værdi.....	27
METODER OG MATERIALER	32
Fugtrelaterede byggeskader	32
Beregning af affugtningstider	32
Skimmelsvampe - Casestudie.....	37
pH-værdi - feltforsøg.....	38
RESULTATER	40
Affugtningstider – Beregningsscenario 1 og 2	40
Skimmelsvampevækst på beton - casestudie.....	43
pH-værdi – feltforsøg	51
DISKUSSION	53
Beregning af affugtningstider	53
Casestudie - Skimmelsvampevækst på beton	54
pH værdi.....	56
KONKLUSION	57
PERSPEKTIVERING	60
LITTERATURLISTE.....	62
BILAGSFORTEGNELSE	71

INDLEDNING

Materialer må ikke indbygges med skimmelsvampevækst eller fugtbetingelser som tillader skimmelsvampevækst. Eftersom tilstedeværelsen af fugt i bygninger er bedre korreleret med sundhedssymptomer end den målbare eksponering af svampe, handler det i bund og grund om at sikre tørre bygninger (Wang, et al., 2019, s. 8). Eftersom vi tilbringer op mod 90 % af tiden inden døre, er indeklimaet i boliger og på arbejdspladser afgørende for vores trivsel, indlæringsevne og produktivitet (Grønning, 2011, s. 218) og (Valbjørn, et al., 2000, s. 18). Det giver med andre ord rigtigt god mening at minimere udsættelsen for alle kendte indeklimabelastninger, både samfundsøkonomisk og i forhold til livskvaliteten for det enkelte menneske (Valbjørn, et al., 1993, s. 7-12).

Det gode indeklima skal understøttes af bygningens udformning og indretning samt brugen og driften af bygningen (Valbjørn, et al., 2000, s. 242-276). Foruden den negative påvirkning af helbredet kan der være tale om en række andre fugtinitierede følgeskader pga. eksempelvis øget ældning, korrosion, deformation, forceret afgang mv.

Citat Eva Møller:

"Materialer kan nedbrydes af flere ting men en af de væsentligste nedbrydningsfaktorer er fugt"
(Møller E. , 2013, s. 4)

Fugt og skimmelsvampevækst i bygninger har altså både helbredsmæssige og økonomiske konsekvenser, hvorfor det bør være i alles interesse at fugt i byggeriet tages seriøst, uagtet om man er rådgiver, entreprenør, bygningsejer eller slutbruger.

Beton er verdens mest anvendte byggemateriale (Thrane, Andersen, & Mathiesen, 2019, s. 5), og Danmark er ingen undtagelse eftersom støbt betondæk er en gylden standard som terrændæk, herforuden kommer en udstrakt brug af præfabrikerede væg- og dækelementer. Alene som in-situ-støbt beton produceres der årligt mere end 2,5 mio. m³ beton i Danmark. (Thrane, Andersen, & Mathiesen, 2019, s. 11). Beton er, på linje med eksempelvis porebeton, fundet "medium resistent" i forhold til følsomhed over for skimmelvækst (Ojanen, et al., 2011, s. 870). Generelt set, er ru overflader mere udsat for smuds- og støvsedimentering og derfor særligt udsatte for skimmelsvampeangreb (Thrane, et al., 2020, s. 122) og (Brandt, et al., 2013, s. 97). Risikoen for skimmelsvampevækst på ny-producerede alkaliske byggematerialer med byggefugt kan, fra en rådgivers synspunkt, forekomme undervurderet. Dette udsagn vil jeg i denne rapport underbygge med egne erfaringer fra nybyggeri, hvor der er registreret problemer med indbygget fugt og skjult skimmelsvampevækst på netop betonoverflader. I byggebranchen synes der at være en udbredt opfattelse af, at uorganiske materialer er fugtrobuste og derfor ikke kræver særlig bevågenhed i forhold til forebyggelse af skimmelvækst. Hvorvidt det er vane-tænkning "*buisness as usual*", uvidenhed, eller måske misledende anprisninger i diverse erfaringsblade og anvisninger vides ikke - måske en kombination af disse.

I den udgåede SBI-anvisning 204 (gældende 2003-2020) fremgik det, at nystøbt beton yder stor modstand overfor mikrobiel vækst grundet dets høje pH-værdi¹ (Valbjørn, 2003, s. 73). I SBI Anvisning 224, tabel 9 fremgår det endvidere, at beton har en kritisk relativ fugtighed for skimmelsvampevækst

¹ Nystøbt beton har typisk en pH-værdi på 12,5-13 (Behnood, Tittelboom, & Belie, 2016, s. 177)

ved 20 °C's langtidspåvirkning på 90-95 RF. Under selvsamme tabel 9 anføres dog at; "*For materialer, som er tilsmudsede, f.eks. som følge af tilsmudsning på byggeplads eller smudspartikler i luften, kan det kritiske fugtindhold blive langt lavere*" (Brandt, et al., 2013, s. 94).

Eftersom alle byggematerialer udsættes for støvpartikler, er fugtkriteriet et teoretisk optimum som alene er realistisk i sterile miljøer, såsom laboratorier (Viitanen H. , 2004). Ikke desto mindre bliver der dagligt bygget huse som udnytter dette "maksimalt tilladelige fugtkriterium" uagtet at forudsætninger for at bruge dette fugtkriterium ikke er til stede.

I BYG-ERFA Erfaringsblad fra 2011 fremhæves det, at ældre betonpladen skal affugtes til RF 75 % grundet karbonatisering af betondækket og dermed manglende præventiv alkalisk virkning (Koch & Christensen, 2014, s. 1). Af laboratorieforsøg fra 2014 fremgår det, at pH-værdien for nystøbte betonoverflader falder relativt hurtigt til værdier omkring 9, hvilket øger vækstrisikoen betydeligt (Verdier, et al., 2014, s. 146). Andre forsøg har vist, at betonoverflader kan have en pH-værdi på omkring 8,8 efter blot 30 dages accelereret luft- og vejreksposering (Wiktor, et al., 2009, s. 1063). Ved et dansk feltforsøg som er over forløbet over fire år ses at materialer med pH >12 forhindrer skimmel-svampevækst, mens der på overflader med pH <9,5 forekommer vækst (Jensen, et al., 2020, s. 14).

De fysisk-kemiske interaktioner mellem substrater og mikroorganismer er generelt ikke undersøgt for byggematerialer udsat for indendørs forhold (Verdier, et al., 2014, s. 147), hvorfor der med god grund bør skeles til erfaringer fra felten. Hidtil udført forskning og udvikling af modeller for forudsigelse af skimmelsvamp er hovedsageligt baseret på eksperimentelle undersøgelser i laboratoriet (f.eks. Viitanen (Viitanen & Hukka, 1999), Sedlbauer (Sedlbauer, 2002) og Ojanen (Ojanen & Salonvaara, 2000)). Udvikling af skimmelvækst i felten er komplekse mikrobiologiske processer, hvor ikke alle faktorer er kendte. Derfor er det en udfordring at opnå overensstemmelse mellem den eksperimentelle simulerede skimmelvækstproces under testbetingelser og udviklingen af skimmelvæksten i det faktiske byggede miljø (Vereecken, Vanoirbeek, & Roels, 2015). At det kan være vanskeligt at efterligne virkelige forhold, ses bl.a. af forsøg fra 2017 hvor skimmelsvampevækst helt udebliver på fugttilførte byggematerialer som er podet med rene kulturer (Møller, Andersen, Rode, & Peuhkuri, 2017).

En stor del af risikobedømmelsen for skimmelsvampevækst på beton følger altså en antagelse om, at pH-værdien aftager meget langsomt og derfor har en betydelig væksthæmmende effekt i den tid som der går inden byggefugten forventes at komme i ligevægt med det omgivende miljø. I dette projekt vil jeg forsøge at belyse området nærmere og måske udfordre måden hvorpå vi som standard tillader høje fugtkriterier for nystøbt beton.

BAGGRUND

OPGAVEFORMULERING

På baggrund af resultaterne i denne rapport belyses fugtkriterier for indbygning af beton. Min hypotese er, at betondækkets overflade karboniserer relativt hurtigt, hvorfor den alkaliske beskyttelse mod mikrobiel aktivitet helt eller delvist mangler på tidspunkt for indbygning af fugtmembran og gulvbelægning. I rapporten følges følgende fire spørgsmål:

- Hvor hurtigt falder overfalde-pH på et almindeligt terrændæk udsat for vejrlig?
- Kan høj pH-værdi forhindre skimmelsvampevækst?
- Er et fugtkriterie på 90% RF for lempeligt med hensyn til skimmelvækst?
- Hvis nu "let støvede betonoverflader" var *de-facto*-standard i stedet for rene² betonoverflader, hvad ville det så betyde for fugtkriteriet?

I rapporten har jeg indledningsvis udført et litteraturstudie for - om muligt - at vurdere andelen af direkte fugtrelaterede byggeskader. Jeg har valgt at koncentrere mig om pH-værdiens umiddelbare effekt som væksthæmmer, da det netop er denne faktor der fremhæves som værende den umiddelbare fysisk-kemiske årsag til skimmelprævention. For at få konkrete pH-værdien fra betonoverfladen har jeg udført et *low-scale* feltforsøg for at bedømme karboniseringshastigheden for byggerier udsat for dansk klima - dvs. regn, vind og atmosfærisk luft indeholdende CO₂ (niveauet af kuldioxid er pt. ~410 ppm iht. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020)). Jeg har lavet et casestudie på baggrund af indsamlet oplysninger fra 21 konkrete sager i Danmark, hvor der på nyere beton er konstateret skimmelsvampevækst. Der er tale om konkrete bygningsundersøgelser foretaget af OBH Rådgivende Ingeniører A/S i perioden 2017 til 2020 - samtlige sager vil fremgå anonymiseret. Litterære vækstpræferencer for høj pH-værdi sammenlignes med resultater fra casestudiet i forhold til evt. tendens af monokulturer. Eftersom min hypotese er, at fugtkriteriet for beton er for lempeligt, har jeg også vurderet affugtningstider for et traditionel, støbt terrændæk ved sammenligning af tre forskellige beregningsmetoder.

AFGRÆNSNING

Nærværende rapport omhandler alene fugt og skimmelsvampevækst på beton, altså blot en del af det atmosfæriske indeklima. I rapporten behandles alene beton i passiv miljøklasse (eksponeringsklasse) hvor gulvet er beregnet til efterfølgende gulvbelægning, dvs. indendørs gulve og terrændæk til bolig, kontor, butikker o.l. Beton med lav styrke eller eksponeringsklasse har typisk et lavere cementindhold og dermed øget porøsitet og et større potentiale for karbonatisering, når der sammenlignes med højstyrkebeton (Herholdt, et al., 1985, s. 116-118). pH-værdier for cement- gips- eller anhydritbaseret flydemørtler og afretningslag behandles ikke i denne rapport. I casestudiet har jeg frasorteret sager hvor væksten åbenlyst er initieret af overfladens besmudsning. Der anvendes alene endimensionelle beregninger i rapporten.

² Videnskabelig undersøgelser forholder sig alene til rene uforurenede materialer under laboratoriebetingelser med simuleret vækstproces. Dvs. at vækstemnets næringsindhold og klimabetingelserne kun i meget ringe grad afspejler virkelighedens vækstbetingelser.

TEORI

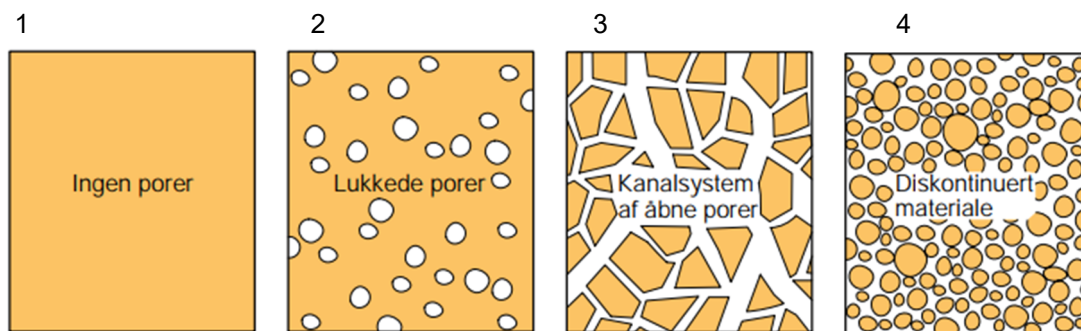
FUGT

FUGT I LUFTEN

Luften er i stand til at optage og afgive fugt, og denne evne er central for næsten alle fugtforhold (Brandt, et al., 2013, s. 14). Det højeste vanddampsindhold i luften benævnes mætningsindholdet, dette stiger i takt med temperaturen, hvorfor varm luft kan indeholde mere fugt end kold luft. Når man beskriver den relative luftfugtighed, er det altså i forhold til mætningsindholdet ved den givne temperatur. Med andre ord er relativ fugt et udtryk for det aktuelle vandindhold ved en given temperatur og tryk, divideret med det maksimale vandindhold ved samme temperatur og tryk. Når den relative luftfugtighed er 100 % kaldes det også for dugpunktstemperaturen. Sammenhæng mellem temperatur og vandindhold i luften/damptryk kan aflæses i henholdsvis et vanddamp- eller et damptryksdiagram (empirisk bestemt). Tilstandsændringer mellem luftfugtighed, temperatur og energi i luften kan desuden aflæses i et ix diagram, det mest anvendte er Mollies (Hyldgård, Funch, & Steen-Thøde, 1997, s. 118).

FUGT I BYGGEMATERIALER

Fugtniveauet i hygroskopiske byggematerialer vil indstille sig i ligevægt med den omgivende luftfugtighed over tid, dette kaldes også for ligevægtpotentialet. Fugt kan desuden optages ved direkte vand-påvirkning (væskeform) via kapillartransport ved kontakt/korrespondance med andre materialer. Ligevægtpotentialet kan derfor opfattes som et referenceniveau når man skal bedømme fugtniveauer indendørs (såsom fugtbelastningsklasser iht. DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013)), mens der i klimaskærmen som helhed oftest er tale om flere konkurrerende fugttilskud, dvs. både ved diffusion, konvektion og/eller kapillærtransport. Ikke alle byggematerialer er vandoptagelige, og nogle er det mere end andre. Det er derfor vigtigt at have en grundlæggende forståelse for materialernes opbygning. Optagelse af fugt afhænger særligt af porestrukturen i det enkelte materiale, dvs. størrelsen og formen på porerne i materialet. Materialer med en høj åben porevolumen kan således indeholde mere vand end et materiale med lav åben porevolumen. Udover optagelsen af fugt i materialet, har porestrukturen stor betydning for hvordan fugten transporteres gennem materialet. Materialers poresystem opdeles almindeligvis i fire kategorier iht. Figur 1: Kategori 1 er materialer uden porer, eksempelvis glas, kategori 2 er materialer med lukkede porer, f.eks. celleplast, kategori 3 er materialer med åbne porer, hvor der er forbindelse gennem porerne fra side til side af materialet, f. eks. teglsten og kategori 4 er såkaldt diskontinuerte materialedele med en stor andel af luft, f.eks. grus, hvor det egentlige materiale kun har stedvis kontakt via mindre dele af dets overflade (gradienten).

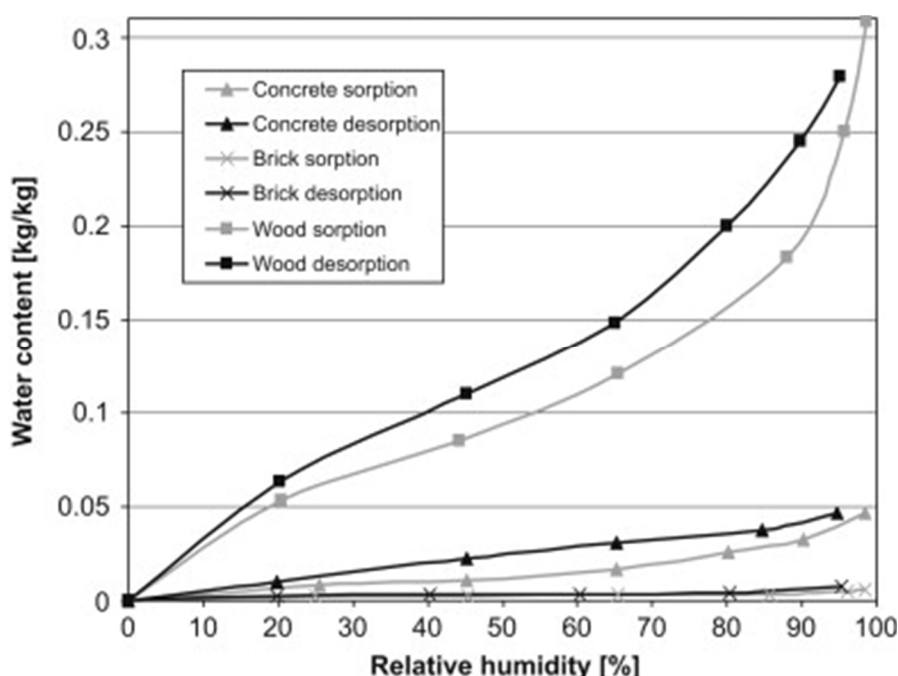


Figur 1, Fire kategorier af poresystemer (Brandt, et al., 2013, s. 16)

SORPTIONSKURVER

Hvert enkelt materiales fugttekniske egenskaber kan udtrykkes ved en sorptionskurve. En sorptionskurve viser vandindholdet i materialet når det er i ligevægt med luft ved forskellige relative fugtigheder. Der findes reelt to kurver for et materiale, én for opfugtning (absorption) og én for fugtafgivelse (desorption). Adsorptionskurven beskriver ligevægten under opfugtning og desorptionskurven under affugtning/udtørring. Når materialets poreradius er stor ($>1\mu\text{m}$)³ kan tyngdekraften ikke altid overvindes af kapillarkræfterne i menisken, hvilket giver en modstand – dette kaldes for hysteresis og forklarer forskellen mellem adsorption- og desorptionskurven (Brandt, et al., 2013, s. 32). Figur 2 illustrerer princippet for de ændrede materialeegenskaber for tre typiske byggematerialer, hhv. beton, mursten og træ.

Formen på kurverne for de enkelte materialer er ens, men desorptionsisotermen har et højere vandindhold end adsorptionsisotermen for den samme værdi af relativ fugtighed. I praksis bruges dog kun en middelkurve for de to scenarier "sorptionsisotermen".



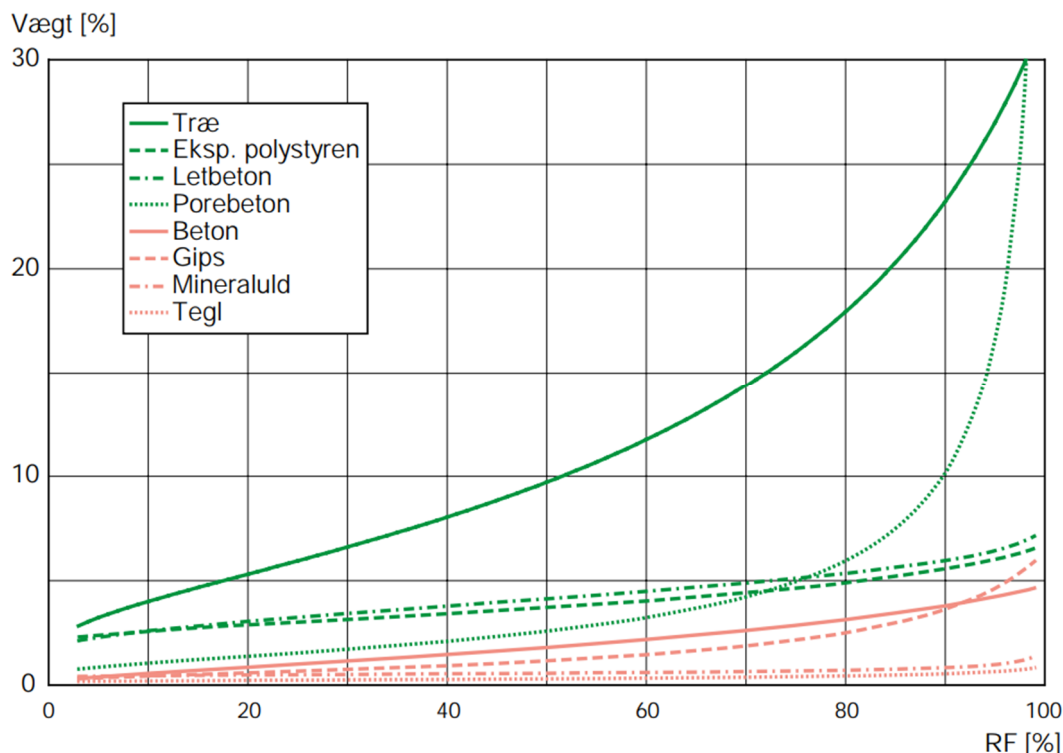
Figur 2, Eksempel på sorption og desorption isotermkurver for forskellige materialer (hysteresis). Under tørring frigøres mindre vand fra materialet end vand fanget under opfugtning. Derfor er desorption og adsorptionskurver ikke identiske. (Kwiatkowski, Wołoszyn, & Roux, 2009, s. 2)

Sorptionskurver forbinder fugtindhold i materialer med relativ fugtighed, men der findes mange forskellige sorptionskurver inden for hver materialetype (Hansen K. K., 1986). Dette forhold er særligt udtalt for beton hvor der findes et utal af recepter med pulverblandinger og additiver. Sorptionskurver er temperatur-afhængige, men opgives normalt ved 20 °C. Den absorberede fugtmængde øges ved faldende temperatur og vice versa.

Når man ved prøveudtagning ønsker absolutte fugtværdier ved veje-tørre-veje metoden, er der tale om vand som er fordampeligt ved 105 °C - dvs. frit kapillarvand, kapillarbundet vand og gelvand. Det vand som bindes kemisk i hydratiseringsprocessen, vil først fordampe ved højere temperaturer.

³ Grove porer defineres som $\varnothing > 10^{-7}$ (Brandt, et al., 2013, s. 26, figur 10)

Figur 3 viser fugtligevægtskurver (sorptionskurven) for de mest almindelige byggematerialer.

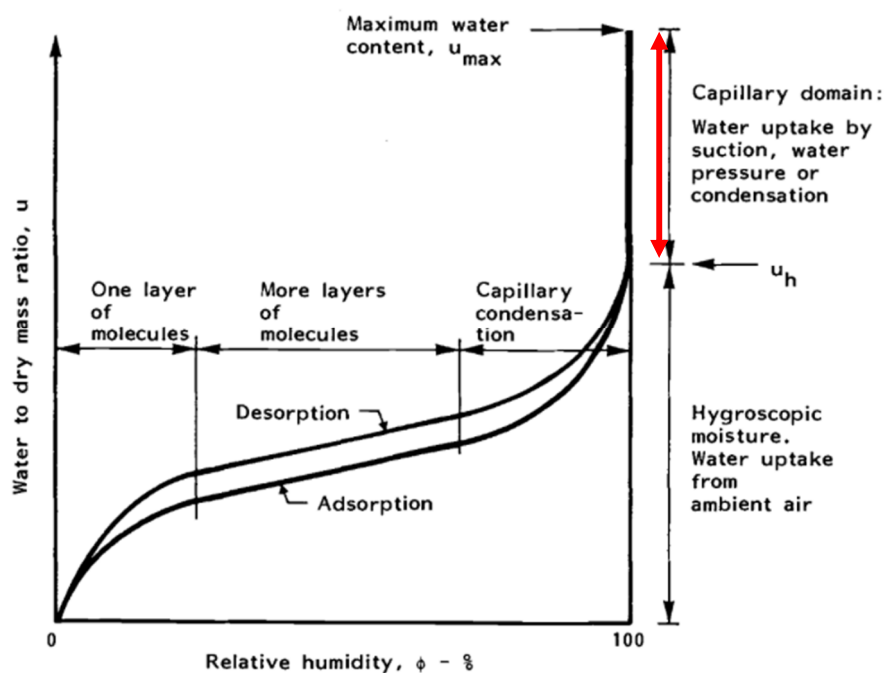


Figur 3, Sorptionskurver/fugtligevægtskurver

Hygroskopiske materialer med grov porestruktur optager vand hurtigere end materialer med fin porestruktur. Til gengæld kan fugt vandre længere op i materialer med fine porer. Forskellen i stighøjde mellem fine og grove materialer betyder, at fugt også kan suges fra grove til finere materialer, f.eks. kan en finkornet puds suge fugt ud af et mere grovkornet underlag (Brandt, et al., 2013, s. 38). Det betyder i praksis, at en facade som er blevet gennemblødt af slagregn, i begyndelsen, kapillært kan suge vandet ud til overfladen gennem det fine pudslag yderst på facaden (Vadstrup, 2018, s. 39)

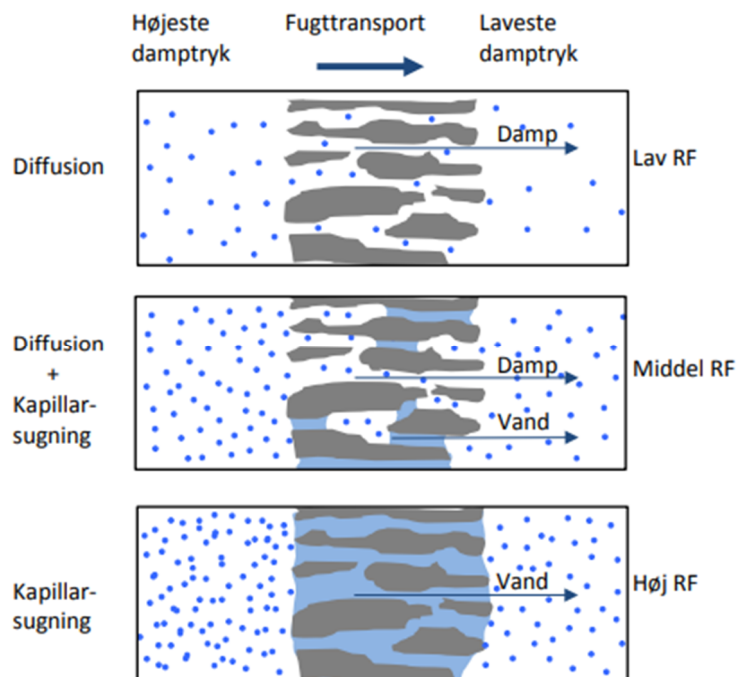
Ved en given relativ luftfugtighed indeholder træ mere vand end f.eks. tegl og beton. Det skyldes, at tegl og beton i overvejende grad har grove porer, medens træ både har mange grove porer i kraft af cellerne i træet og samtidig utallige fine porer i cellernes vægge, hvilket alt i alt giver en meget stor indre overflade, som fugten kan bindes til.

For vandmættede materialer og træ med fugtniveau større end fibermætningspunktet – dvs. flydende vand i træets åre – vil desorption i kapillarfasen sikre hurtig fugttransport til overfladen. Det overhygroskopiske område fremgår af Figur 4 og defineres som $RF > 98\%$ (Trechsel & Bomberg, 1989, s. 29).



Figur 4, Kapillær fugttransport. Overhygroskopisk område/vandmætning er vist med rød pil. (Trechsel & Bomberg, 1989, s. 29).

Fugttransport gennem materialer kan altså ske både i damp- og væskeform, og sker altid pga. en forskel i potentialet på hver side af materialet (Brandt, et al., 2013, s. 40). Siden med det højeste potentiale definerer retningen for fugttransporten, fra højt mod lavt, og størrelsen af forskellen mellem potentialerne definerer, hvor hurtigt og hvor meget fugt der transporteres (Gottfredsen & Nielsen, 1997). Princip for fugttransportformer fremgår af Figur 5.



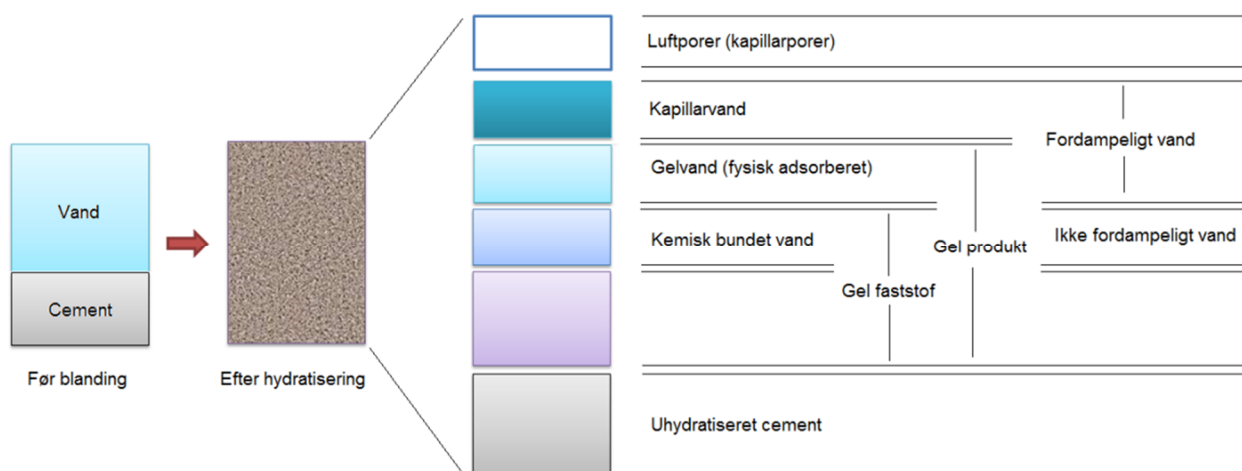
Figur 5, Fugttransport i porøse materialer. Fugttransporten initieres af damptryksforskellen på hver side af materialet (Morelli, et al., 2015, s. 11).

For fugttransport kan potentialet f.eks. være vanddamptryk eller vandtryk. Begge transporttyper kan ske samtidig og endog i hver sin retning, som eksempel kan der være opadrettet kapillartransport i et støbt terrændæk samtidig med at der er et nedadrettet damptryk. Fugttransport i dampform kan ske ved diffusion, konvektion og effusion. Fugttransport i væskeform sker normalt ved kapillarsugning (grundvand, slagregn etc.) eller ved væskeledning som følge af tryk. Diffusion kan beskrives ved Fick's første lov som beskriver sammenhængen mellem partikelstrømmen og koncentrationsgradienten (temperaturafhængig proces).

Tabel 1, Opsummering af fugttransportformer.

Transportformer		Drivkraft
Transport af vanddamp	Diffusion	Forskelle i damptryk
	Konvektion	Forskelle i luftens totaltryk
	Effusion	Termiske forskelle
Transport af væske	Kapillartransport	Forskelle i poretryk

I et hygroskopiske materiale, som beton, vil der under hydratisering bindes en betydelig mængde fugt, såkaldt kemisk bundet fugt. Denne kemisk bundne fugt vil sammen med det adsorberede vand definere fugtkapaciteten for en selvudtørrende beton, for princip se Figur 6.



Figur 6, volumenfordeling af vand/cement før og efter hydratisering, den lille blok viser andelen af fast gelstof uden andel af kemisk bundet vand. (Frederiksen & Munch-Petersen, 2015, s. Kap. 10.4, s 9)

Mængden af frit fordampeligt vand kan eksempelvis udtrykkes som en fugtbrøk af betonens tørdensitet. Som tommelfingerregel vil der i en typisk P20 beton være 4,9 % frit fordampeligt vand og for P40 er det 3,9 % (Nielsen & Olsen, 2006, s. 20). Når man har kendskab til den konkrete beton-recept, kan mængden af fordampeligt vand (W_{fys}) estimeres ved beregning ud fra følgende formel:

$$W_{fys} = W - \left(h \cdot \frac{C}{4} \right) \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Hvor: $W = \text{Vand} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$h = \text{Hydratiseringsgrad}$, hvor 1,0 for P20 og 0,7 for P40 (Nielsen & Olsen, 2006, s. 20).

$$C = \text{Cement} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

VANDAKTIVITET

I stedet for relativ fugtighed (% RF) kan man også bruge begrebet vandaktivitet (a_w). Skalaen går fra 0,00- 1,00 og svarer således fuldstændigt til 0-100 % RF. Ligesom for RF er vandaktiviteten alene et udtryk for det frie vand i et produkt, der er tilgængeligt for mikrobiologisk vækst (dvs. uden andelen af kemisk bundent fugt og salte). Bemærk, at vandaktiviteten i materialeoverfladen kan være højere end materialets generelle vandindhold pga. af mikrolommer ($<<1$ mm) med kondens (Thrane, Olsen, & Ebbehøj, 2019, s. 37).

DYNAMISKE BEREKNINGER

Beregninger med stationære forhold er retvisende i tilfælde, hvor der er et balanceret forhold mellem tilført og fjernet fugt. I praksis er forholdene ikke-stationære (dynamiske), hvorfor der ved beregning af fugtstrømning benyttes numeriske beregningsmetoder.

Der findes en række programmer til vurdering af hygrotermiske forhold samt forskellige risikomodeller for skimmelvækst. Fælles for alle sådanne simuleringer og beregninger er, at man skal forholde sig kritisk til resultaterne. Sammenligning af forskellige skimmelmodeller kan bl.a. ske ved brug af programværktøjet Folos2D (Mundt Petersen, et al., 2012), herved kan beregnede værdier også sammenlignes med målte værdier (Mundt-Petersen & Harderup, 2013).

Dynamiske beregninger kan bruges til at vurdere transiente fugt- og varme-tekniske forhold i en en-, to- eller tredimensionel model. Vurdering af de hygrotermiske forhold sker i forhold til materialedata hentet fra producenten eller materialebiblioteket. For større bygningsflader vurderes fugttransporten alene endimensionelt, hvilket betragtes som en god tilnærmelse. I konstruktioner hvor randbetingelserne er et væsentlig parameter bør fugttransporten vurderes to- eller tredimensionelt.

METODEBESKRIVELSE

Affugtningstider i denne rapport er vurderet ved hjælp af tre forskellige beregningsmetoder:

1) **TorkaS 3.2** (Lunds Universitet, 2020)

TorkaS er et svensk beregningsprogram som bruges til at vurdere udtørningstider for nye betonkonstruktioner. Beregningerne baserer sig på kendte teorier samt et større antal forsøg. Beregningsprogrammet er baseret på empirisk data og data fra svenske forsøg. Programmet indeholder flere forskellige betontyper, opbygninger og vejrdata. For beregninger i denne rapport benyttes vejrdata fra Lund (Sydsverige), hvilket vurderes at være sammenlignelig med Danske vejrforhold.

For P20-30MPa betoner i Danmark anvendes typisk et vandindhold på 170 liter/m³, for 25-35MPa 150 liter/m³ og for ≥ 35 MPa 130 liter/m³. TorkaS tillader imidlertid ikke et vandindhold lavere end 160 kg/m³, hvorfor dette har været minimumsniveauet i flere af beregningerne. Beregningsresultater fra TorkaS er således ikke direkte adapterbare til danske forhold. Branche-organisationen Dansk Beton, Fabriksbetongruppen vurderer i et erfaringsblad fra 2013 at *"Der er ikke under praktiske forhold udført systematisk kontrol af simuleringer foretaget med TorkaS på danske cement- og betontyper, men der findes indikationer på, at simuleringer foretaget med TorkaS giver resultater på den sikre side"* (Dansk Beton, Fabriksbetongruppen, 2013, s. 6).

TorkaS anbefaler desuden, at man indregner måleusikkerheden i ens fugtkriterium. I den forbindelse henvises til fugtmålehandbogen fra RBK⁴ som angiver en standardafvigelse på $\pm 1\%$ som en dækningsfaktor for 67% af målingerne, $\pm 2\%$ dækker 95% af målinger, mens $\pm 3\%$ vil være dækkende for 99% af målingerne (RBK - Rådet för ByggKompetens, 2019, s. kap. 12, s.12). For at kunne sammenligne beregningsværdier på tværs af beregningsprogrammer er der IKKE indregnet måleusikkerhed ved fastsættelse af de angivne fugtkriterier. TorkaS er desuden begrænset i forhold til, at der ikke kan anvendes pulverblandingsbetoner, vælges støbetemperatur lavere end 10 °C anvendelse og cementindhold større end 500 kg/m³.

2) **BYG-ERFA-modellen** (BYG ERFA, 2020)

BYG-ERFA har udarbejdet en forenklet web-baseret beregningsmetode til at anslå udtørringstider, denne betitles "Udtørring af byggematerialer". Modellen anvender en del forsimplinger i forhold til de virkelige forhold, hvorfor metoden kun egner sig til simple endimensionelle betragtninger. Den matematiske beregningsmodel regner udelukkende med diffusion og statiske temperaturforhold (Hjorslev Hansen & Hansen, 2010). For *in-situ* støbt terrændæk kan der vælges mellem fire betontyper, uden yderligere mulighed for at ændre materialeparametre (Nielsen & Olsen, 2006, s. 15). Det er ikke muligt af definere isoleringslagets tykkelse, justere v/c-tal eller vælge klimadata. Metoden ser desuden bort fra cement-baserede materials selvudtørring (Hjorslev Hansen & Hansen, 2010).

3) **WUFI® Pro 6.5** (WUFI, Fraunhofer IBP, 2020)

WUFI er et beregningsprogrammet som kan bruges til vurdering af transiente fugt- og varmetekniske forhold i en endimensionel model. Vurdering af hygrotermiske forhold sker i forhold til programmets materialebibliotek, men der kan også anvendes materialedata direkte fra producenten. WUFI regner med dynamiske klimabetingelser, og det tager højde for fugttransport både ved diffusion og kapillartransport.

Ved anvendelse af simuleringsprogrammet er der desuden mulighed for at materialernes sorptionskurve tilrettes, således at der samtidig tages hensyn den hysteres der ofte forekommer når materialeegenskaberne ændres i takt med fugtoptaget. Når de forskellige komponenter er defineret i lagdeling, vælges orientering og hældning, en række overfladekoefficienter og -faktorer defineres, og sluttelig angives begyndelsesbetingelserne (materialernes fugtindhold ved indbygning). Herefter defineres den ønskede beregningsperiode og -profil samt det ønskede klimadatasæt. Alle inddata kontrolleres inden beregningerne udføres. Overordnet set egner WUFI sig til vurdering af; byggefugt og udtørringstider, kondensrisiko i bygningskonstruktioner, slagregnsbelastning af facader samt overordnet vurdering fugt- og varmetransport.

MATERIALERS FUGTMODSTAND

Til beregning og fugtteknisk vurdering af materialer med fast tykkelse anvendes normalt en vanddampdiffusionsmodstand mens vanddamppermeabiliteten $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ definerer den vandstrøm som går gennem en fladeenhed ved en given gradient. Vanddampdiffusionsmodstanden opgives enten som Z-værdi, PAM-værdi⁵, S_d -værdi⁶ eller en dampdiffusions-modstandsfaktor (μ). Bemærk at dampdiffusionsmodstandsfaktoren er en dimensionsløs faktor som angiver modstanden i et materiale i

⁴ Svensk brancheorganisation (RBK = "Rådet för ByggKompetens")

⁵ PAM er en forkortelse for "power against moisture" (magt mod fugt)

⁶ S_d er en forkortelse for "stromdichte" (gennemstrømningstæthed)

forhold til modstanden i luft. Fælles for disse fire enheder er at der er tale om en modstand, så desto højere værdi/faktor desto mindre vanddamp kan der diffundere gennem materialet. Omregning mellem enhederne fremgår bl.a. af tabel 22 i SBI-anvisning 224 og Figur 7 på næste side. Vanddamp-permeabiliteten er definition på et materialets gennemtrængelighed over for vanddamp.

δ_p er vanddamppermeabiliteten $\left[\frac{kg}{(m \cdot s \cdot Pa)} \text{ eller } \frac{m^2}{s} \right]$

Z er dampdiffusionsmodstanden som z-værdi $\left[\frac{GPa \cdot s \cdot m^2}{kg} \right]$

μ er dampdiffusionsmodstandsfaktor [-]

D_p er vanddampens diffusionskoefficient i luft baseret på damptryk $\left[\frac{kg}{(m^2 \cdot s)} \right]$

D_p er ved normalt lufttryk og 20°C $\sim 0,19 \cdot 10^{-9} \left[\frac{kg}{(m^2 \cdot s)} \right]$ iht. (Brandt, et al., 2013, s. 43)

D_p er ved 23°C $\sim 0,195 \cdot 10^{-9} \left[\frac{kg}{(m^2 \cdot s)} \right]$ iht. (Gottfredsen & Nielsen, 1997)

Eksempel 1

Producentoplysning om en trinlydsfolie:

- 1) $\mu = 2250$
- 2) Tykkelse (d) = 4,0mm

Z-værdi ønskes:

$$\delta_p = \frac{D_p}{\mu} \left[\frac{kg}{(m \cdot s \cdot Pa)} \right]$$

$$\delta_p = \frac{0,19 \cdot 10^{-9} \frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}}{2250}$$

$$\delta_p = 84,44 \cdot 10^{-15} \frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}$$

$$Z = \frac{d}{\delta_p}$$

$$Z = \frac{0,004 \text{ m}}{84,44 \cdot 10^{-15} \frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa}}$$

$$Z = 47,37 \frac{GPa \cdot s \cdot m^2}{kg}$$

Eksempel 2

Producentoplysning om en banevare:

- 1) S_d værdi (m) = 20
- 2) Tykkelse (d) = 0,2mm

Z-værdi ønskes:

$$Z = \frac{S_d}{0,176} \left[\frac{GPa \cdot s \cdot m^2}{kg} \right]$$

$$Z = \frac{20 \text{ m}}{0,176}$$

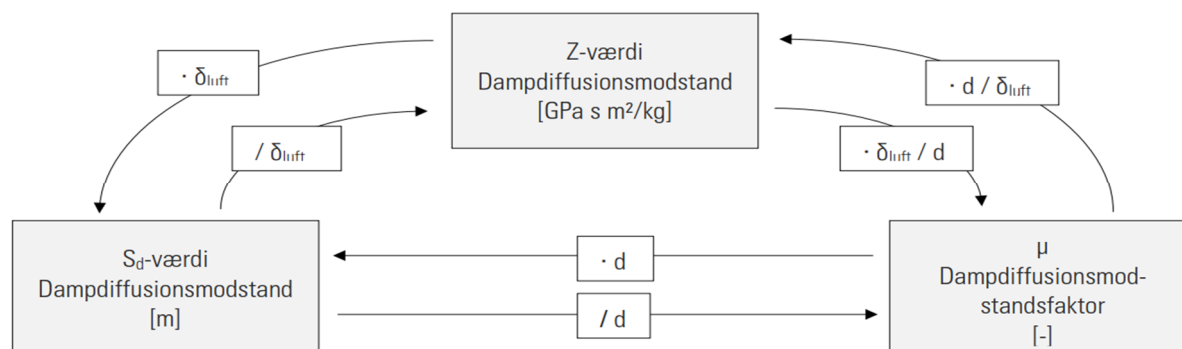
$$Z = 113,64 \frac{GPa \cdot s \cdot m^2}{kg}$$

Dampdiffusionsmodstandsfaktor ønskes:

$$\mu = \frac{S_d}{d} [-]$$

$$\mu = \frac{20 \text{ m}}{0,0002 \text{ m}}$$

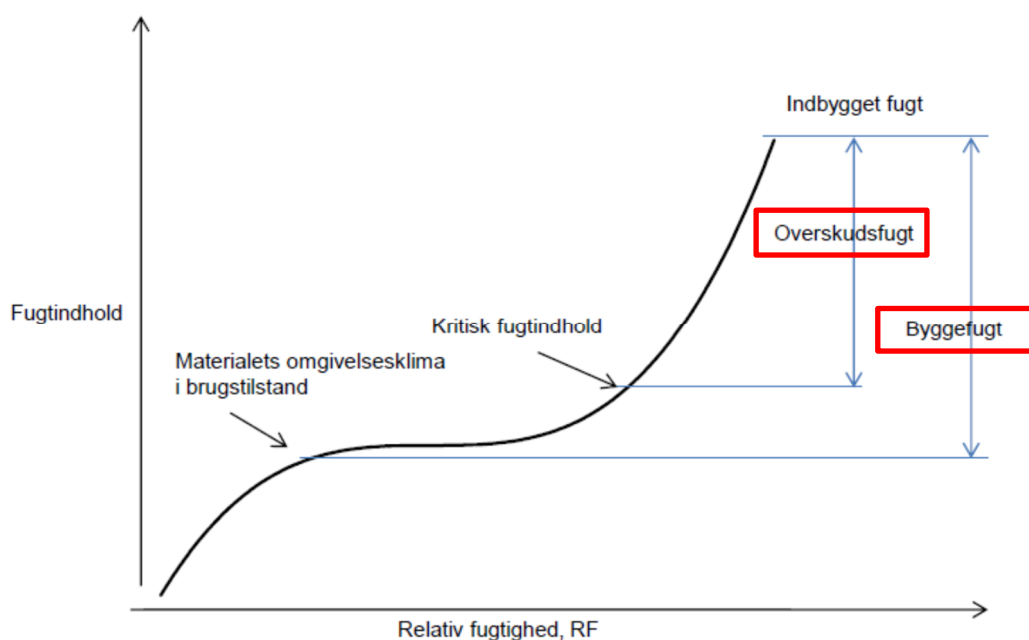
$$\mu = 100.000$$



Figur 7, Omregning mellem Z-værdi, S_d -værdi og dampdiffusionsmodstandsfaktor (Gottfredsen & Nielsen, 1997)

HVAD ER BYGGEFUGT?

Udtørringen af byggefugt kan tage lang tid, ofte flere år. Et byggemateriale som beton har høj fugtkapacitet og når det indbygges *in-situ* er det vandmættet. Da byggeriets tidsplaner som oftest ikke tillader en langsommelig naturlig udtørring, vil der normalt iværksættes forceret mekanisk affugtning for at udtørre netop så meget, at den resterende fugtmængde så det ikke skaber fugtproblemer efter indbygning – dette niveau defineret som det kritiske fugtniveau. Den resterende tilladelige fri fugt, kaldes for byggefugt, og den vil gradvis reduceres ud fra ligevægtpotentialet, se Figur 8.



Figur 8, Definition af byggefugt og overskuds fugt (Geving & Thue, 2002) redigeret med dansk tekst.

BR18 foreskriver, at bygninger skal udføres, så vand og fugt ikke medfører skader eller brugsmæssige gener, herunder forringet holdbarhed og utilfredsstillende sundhedsmæssige forhold. Det betyder konkret, at der ved udbud, planlægning, projektering og udførelse af bygningskonstruktioner skal træffes de foranstaltninger, som af hensyn til klimatiske forhold er nødvendige for en forsvarlig udførelse. Denne bestemmelse skal blandt andet sikre, at der ikke indbygges materialer med skimmelsvamp eller vækstbetingelser for skimmelsvamp i opførelsesperioden. I reglementets vejledningstekst kan der endvidere henvises til bl.a. *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*, hvor det kan læses at dette kan imødekommes ved en hensigtsmæssig kvalitetssikringsprocedure, og at ansvaret for den nødvendige udtørring ligger hos bygherre (eller dennes rådgivere), idet bygherre i udbudstidsplanen skal afsætte tid til den nødvendige udtørring af byggematerialer og bygningskonstruktioner. Det anbefales samtidigt, at der fastsættes fugtkriterier for de enkelte arbejdsfaser, således at evt. overskuds fugt opdages og håndteres/ fjernes i byggefasen.

FUGTSAGKYNDIG

Myndighederne kan forlange, at bygherre gør brug af en fugtsagkyndig (Aagaard, Emcon, & Møller, 2011, s. 7). Generelt er der krav om, at der tilknyttes en fugtsagkyndig, når byggerier indplaceres i fugtbelastningsklasse 4 og 5, eller der er tale om særligt komplekse konstruktioner (Møller E. B., 2010, s. 9). Det er op til bygherre at udvælge en fugtsagkyndig.

Hvis der opstår fugtproblemer i byggefasen, vil udstedelse af en ibrugtagningstilladelse ofte være betinget af en opfølgende fugtteknisk målerapport fra en uvildig fugtsagkyndig, som viser, at

fugtproblemet er afhjulpet. Det er suverænt op til de enkelte kommuner at stille krav om supplerende fugtteknisk dokumentation, når fugtproblemerne skal imødekommes eller afhjælpes – dvs. enten ved udstedelse af byggetilladelsen eller ibrugtagningstilladelsen. For udvælgelses af sådanne risiko-behæftede konstruktionsdele henvises til *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*, hvori der er forslag til kontrolplan, se Figur 9.

ID	Beskrivelse	Trans- portfor- hold	Oplag på bygge- pladsen	Fugtfor- hold ved indbyg- ning	Fugtfor- hold ved færdiggø- relse
1	Bygningsdele af træ og træ-baserede materialer	x	x	x	x
2	Beton støbt in-situ				x
3	Bygningsdele af hygroskopi-ske mineralske materialer; fx gips og porebeton	x	x	x	
4	Isoleringsarbejder på yder-vægge, kælder og funda- menter	x	x	x	
5	Våde fugeudstøbninger, gulvstøbning, pudsning etc.				x
6	Montering af vinduer, udven-dige døre og rørgennemfø-ringer af klimaskærm	x	x	x	x
7	Arbejder ved lægning og luk- ning af tegltag			x	

Figur 9, Behov for en fugtsagkyndig, vejledende eksempel iht. (Aagaard, Emcon, & Møller, 2011, s. 6).

Med viden om den samlede indbyggede vandmængde for *in-situ* støbte betongulve og ovenstående risikobehæftede forhold jf. Figur 7 (vejledende beskrivelser til myndighederne), så burde betongulve være selvskrævet som fokusområde for ethvert byggeri, hvilket udløser behov for en fugtsagkyndig. Bygherren og/eller den projekterende opfordres desuden til at inddrage en fugtsagkyndig så tidligt i byggeriet som muligt og helt allerede i projekteringsfasen.

SKIMMELSVAMPE

SKIMMELSVAMPE OG INDEKLIMA

Skimmelsvampe findes overalt i naturen, men hvis de gror i vores bygninger, er de uønsket og defineres derfor som en indeklimairritant. Art og omfang er afgørende for hvor drastisk der sættes ind overfor vækst i bygninger, og Sundhedsstyrelsen beskriver i den forbindelse, at fugt- og skimmel-svampeproblemer altid skal vurderes tværfagligt – dvs. på baggrund af beboernes helbredstilstand og bygningens "sundhedstilstand" (Hansen & Smith, 2009, s. 21). Indeklimaet opdeles overordnet set som det termiske-, atmosfæriske-, akustiske-, optiske og funktionelle indeklime. Hver af disse hovedkategorier kan desuden opdeles i en række underkategorier, herunder det atmosfæriske indeklime som favner bl.a. partikler, fugt, flygtige stoffer mv. Partikler kan igen underopdeles som husstøvmider, svampesporer, pollen og sodpartikler samt partikler fra byggematerialer såsom mineralulds- og asbestfibre (Brauer, 2017, s. 2).

SVAMPERIGET

Skimmelsvampe tilhører hverken dyre- eller planteriget, men er et selvstændig biologisk rige (Thrane, et al., 2020, s. 120). Skimmelsvampe vokser i kolonier som tynde hyfer, der tilsammen danner et mycelium. Når myceliet kan ses med det blotte øje, kaldes det en koloni. Skimmelsvampe spiller en vigtig rolle i naturens stofkredsløb, hvor de nedbryder forskellige plantedele. Ingen kender det præcise antal af svampearter, men et kvalificeret gæt er 2,2-3,8 millioner arter (Hyde, et al., 2017). Kun cirka 200.000 svampearter er kendt og navngivet og heraf er der ~50.000 som er skimmelsvampe. I bygninger kendes ~100 forskellige skimmelsvampearter hvoraf 15-20 arter er typisk forekommende - disse er alle beskrevet nærmere i SBI-Anvisning 274 (Thrane, et al., 2020, s. afsnit 6.1).

Skimmelsvampe er eukaryote⁷, aerobe mikroorganismer som frigiver sporer og myceliefragmenter til luften som en del af deres livscyklus. Når de rette vækstbetingelser er til stede, spirer disse vindsprede sporer og danner et nyt mycelium. Under vækst udskiller skimmelsvampene forskellige substratnedbrydende enzymer og en række andre biologisk aktive stoffer. Blandt disse er mykotoksiner⁸, som er giftige sekundære metabolitter, der beskytter svampen mod konkurrenter i nærmiljøet (Gravesen, 2005, s. 30). Under vækst frigives desuden flygtige stoffer fra stofskifteproduktionen, mVOC'er⁹, disse forekommer dog ikke i koncentrationer hvor de anses som problematiske for indeklimaet (Gravesen, 2005, s. 32). Der findes mindst 50.000 forskellige skimmelsvampearter og hver har deres eget habitat (Andersen B., 2011, s. 8). Denne geografiske variation er desuden sæson- og årstidspåvirket.

Når udeluft tilføres indeluften, vil der typisk ske en vis partikelfiltrering gennem ventilationsanlægget, efterfuldt af en opblanding som er afhængig af bygningens anvendelse, rengøringsniveau og evt. interne kilder, såsom fødevarer. Samlet set betyder det, at bygningers mikrobiologiske profil er meget dynamisk (Adams, et al., 2016, s. 225). Der er stor forskel i svampenes evne til at danne sundhedsskadelige stoffer, hvorfor vækst af eksempelvis *Stachybotrys chartarum* betegnes som en skærpende omstændighed (Thrane & Andersen, Skimmelsvampe i danske bygninger, 2018, s. 32).

⁷ Biologiske organismer med cellekerne

⁸ Bl.a. aflatoxin, fumonisiner, patulin, kotinin, sterigmatocystin og trichothecener (Thrane, Andersen, & Nielsen, Skimmelsvampe og indeklimakvalitet, 2001, s. 34)

⁹ MVOC'er er en forkortelse for "Microbial Volatile Organic Compounds"

Mange skimmelsvampearter kan vokse i ekstremt næringsfattige miljøer, hvorfor støvpartikler som bindes eller sedimenteres på uorganiske overflader såsom beton, udgør tilstrækkelig næringsstof for vækst (Campana, Sabatini, & Frangipani, 2020, s. 510). Generelt set er der risiko for angreb af skimmelsvampe i bygninger når vandaktiviteten er højere end 0,75. De fleste skimmelsvampearter trives bedst ved a_w på 0,80-0,95. Når først svampesporerne er begyndt at spire, kan svampen vokse videre under mindre optimale forhold. Svampe kan overleve/gå i dvale ved en vandaktivitet på 0,45 eller lavere (Andersen, et al., 2011).

VÆRKTØJER TIL BEDØMMELSE AF VÆKSTRISIKO

Risikoen for skimmelsvampevækst kan bedømmes relativt simpelt ud fra fugtkriterier for maksimal tilladelig indbygningsfugt og krav til indvendig overfladetemperatur ift. den aktuelle fugtbelastningsklasse (Brandt, et al., 2013, s. 65-99). Når der anvendes gennemprøvede byggeprincipper og -materialer, er det rimeligt, at man alene bedømmer risikoen for skimmelsvampevækst ud fra ovennævnte overordnede bedømmelsesparametre. Ofte vil materialevalg, bygningens udformning, kompleksitet og/eller anvendelse stille krav til en mere individuel fugtbedømmelse, ved beregning/ simulering evt. flerdimensionelt samt brug af matematiske skimmelmodeller.

Matematiske skimmelmodeller kan bruges til at forudsige, om der opstår risiko for skimmelsvampevækst på forskellige overflader. To af de mest anvendte modeller for vurdering af skimmelvækst på overflader og i konstruktioner er LIM-modellen¹⁰ (Sedlbauer, 2002) og VTT-modellen (Ojanen, et al., 2011), hvorfra MRD-modellen¹¹ også udspringer (Thelandersson & Isaksson, 2013). Sedlbauers og Viitanens graduering af skimmelvækst fremgår af Figur 10 og Figur 11.

Mould Index	Area covered in [%]	Characteristic feature
0	0	no growth
1	≤ 1	little growth, visible only under the microscope
2	≤ 10	moderate growth, visible only under the microscope
3	≤ 30	visually visible growth
4	≤ 70	
5	> 70	
6	100	

Figur 10, Skimmelindeks (Mould index) iht. fra Sedlbauer (LIM modellen) (Sedlbauer, 2002)

VTT- og LIM-modellen klassificerer væksten efter et skimmelindeks, 0-6, hvor 0 er ingen vækst og 6 er en helt dækket overflade. LIM-modellen er en teoretisk model udviklet til forudsigelse af skimmelvækst i konstruktioner og på overflader. Modellen kan bruges på forskellige materialeklasser, LIM 0, LIM I og LIM II, hvor LIM 0 er under optimale vækstbetingelser, LIM I er vækst på organisk materiale og LIM II

¹⁰ LIM står for "Lowest Isopleth for Mould" – altså laveste grænse for skimmelsvampevækst.

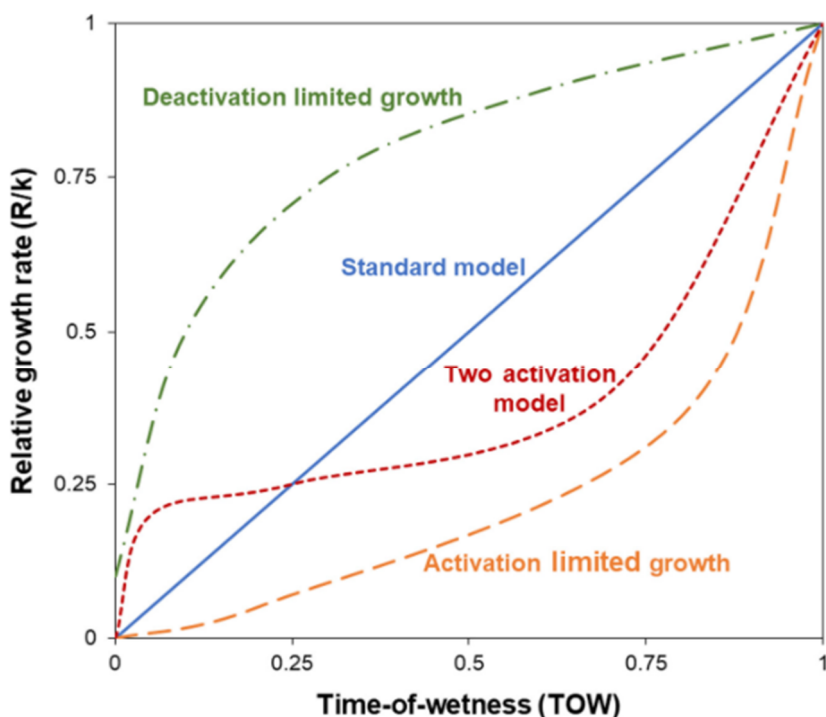
¹¹ MRD står for "Mould resistance design"

er vækst på uorganisk materiale. VTT-modellen er en videnskabelig model baseret på laboratorieundersøgelser af skimmelvækst på forskellige materialer.

Index	Description of the growth rate
0	No growth
1	Small amounts of mould on surface (microscope), initial stages of local growth
2	Several local mould growth colonies on surface (microscope)
3	Visual findings of mould on surface, < 10 % coverage, or < 50 % coverage of mould (microscope)
4	Visual findings of mould on surface, 10 - 50 % coverage, or >50 % coverage of mould (microscope)
5	Plenty of growth on surface, > 50 % coverage (visual)
6	Heavy and tight growth, coverage about 100%

Figur 11, Skimmelindeks (Mould index) iht. VVT (Viitanen, Krus, Ojanen, Eitner, & Zirkelbach, 2015, s. 1426)

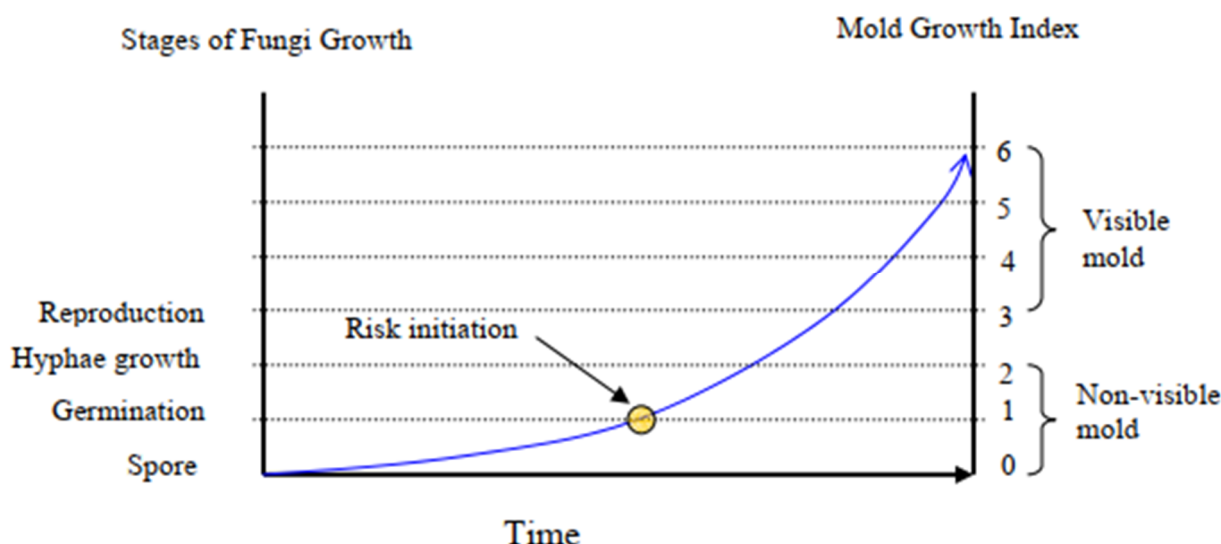
Vækstrisikoen kan også bedømmes mere simpelt ud fra en tidsfaktor, som fortæller hvor mange timer luften har et fugtniveau, som tillader vækst. Modellen kaldes Time-of-wetness (TOW) og udtrykker antallet af timer over/under en given grænseværdi (Adan, et al., 2011, s. 67). Grænseværdien angiver en bestemt risiko som typisk er; $T > 0$ & $RH > 80\%$ (Vereecken & Roels, 2012, s. 297). Denne probabilistiske model kan, efter modulering, også bruges til vurdering af eksponentielle vækstrater (Haines, Siegel, & Dannemiller, 2020, s. 984). TOW-modellen behøves ikke være lineær, som eksempel se Figur 12.



Figur 12, Teoretiske standard TOW-modeller, (R/k) er den relative vækstrate og (TOW) er den brøkdelen af den samlede tid brugt over 80% ligevægt relativ fugtighed (Haines, Siegel, & Dannemiller, 2020, s. 979)

En begrænsning for enhver forudsigelsesfaktor/matematisk skimmelmodel, er svampesporer som er i dvaletilstand også efter initial angreb jf. Figur 13. Undersøgelser fra Finland har påvist, at spiringsdygtigheden kun i ringe grad påvirkes af en fugtreduktion ned til 50 % RF (Pasanen, et al., 2000, s.

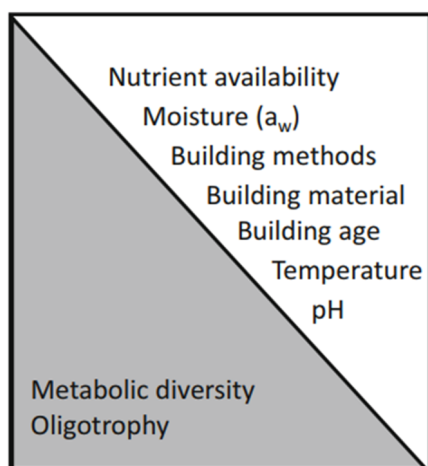
117). Når der udlægges en fugtspærre af banevare på et terrændæk eller et etagedæk, vil der ske en ændring i fugtfordelingen (fugttværsnittet) i betonens øvre del, særligt efter en periode med mekanisk udtørring. Der er derfor risiko for at sådanne "præspirede" betonoverflader tillader fortsat skimmel-svampevækst i tiden efter indbygning (måske måneder/år). En afhandling fra Georgia Institute of Technology påpeger netop, at i det øjeblik "mould growth index 1" er opnået på en overflade, er betingelserne for videre vækst til stede (Moon, 2005, s. 59 og 60). Videre udsving i temperatur og fugtniveau vil ikke påvirke svampens spiringsdygtighed, hvorfor "mould growth index 1" anbefales som risikokriterium, se Figur 13.



Figur 13, Forholdet mellem skimmelvækstindeks og risikoinitiering (Moon, 2005, s. 60)

Af Figur 14 fremgår de faktorer, som afgør om der kommer vækst på en betonoverflade. Bemærk at betonens pH-værdi nævnes som en særskilt betydende faktor.

MOULD\CEMENTITIOUS MATERIAL INTERACTION



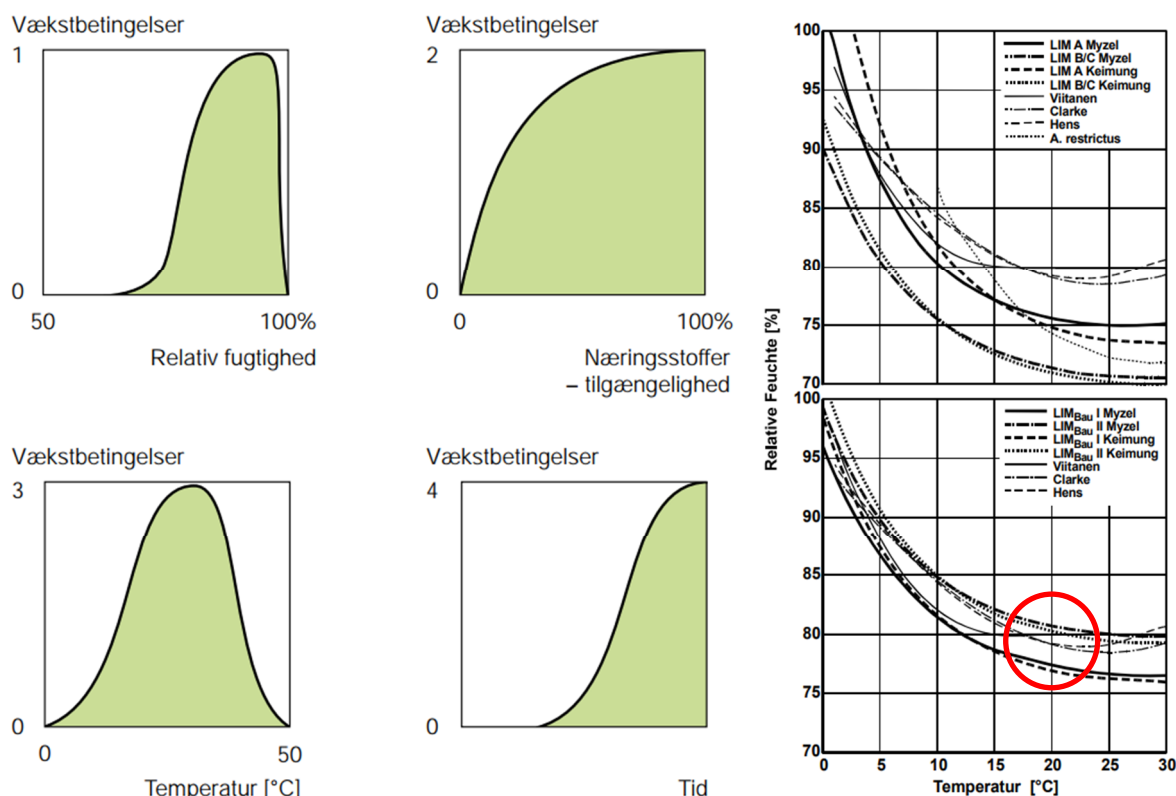
Betonens indbygningsfugt er den naturligt største variabel for regulering af vækstrisikoen. Da støv er til stede overalt i vores omgivelser og særligt på vandrette overflader (uagtet rengøringsniveau) kan vi forudsætte, at der er tilstrækkelig næring for skimmelsvampeangreb på alle almindelige betonoverflader.

Figur 14, Faktorer der påvirker interaktion mellem skimmelvækst og cementsholdige byggematerialer (Campana, Sabatini, & Frangipani, 2020, s. 511)

FUGTKRITERIER

KRITISK FUGTNIVEAU

Det kritiske fugtniveau ift. skimmelsvampevækst varierer meget i forhold til materialer, temperatur osv. Generelt anses 75 % RF (0,75 a_w) ved normal indendørstemperaturer som værende det kritiske fugtniveau for skimmelsvampe. I praksis er det dog noget vanskeligere at vurdere det konkrete fugtkriterium, men det er en forudsætning, at der er næring, fugt og en passende temperatur over en given periode (latenstiden). Disse fire overordnede faktorer er vist med Figur 15, hvor der også er kurver som sammenligner forskellige skimmelmodellers minimale vækstkrav som funktion af temperatur og RF.



Figur 15, Kvalitativ vurdering af vækstbetingelserne for skimmelsvampe afhængigt af forskellige påvirkningsfaktorer + LIM-kurver for minimale vækstkrav afhængig af temperatur og RF ved sammenligning af flere matematiske skimmelmodeller (Sedlbauer, 2001, s. 49 og 79) og (Brandt, et al., 2013, s. 96)

Grænseværdien kan forekomme konservativ for uorganisk materiale (se rød cirkel på Figur 15), hvilket til dels skyldes, at man samtidig ønsker at tage højde for måleusikkerhed på instrumenterne (Møller E. B., 2010, s. 77). Der kan desuden henvises til et stadig gældende BYG-ERFA Erfaringsblad fra 2005, hvo det fremgår, at der kan være risiko for skimmelsvampevækst helt ned til 70 % RF på organiske materialer (Brandt, Hansen, Bunch-Nielsen, & Ebbeshøj, 2005). Bemærk at forsøg fra 2017 har påvist vækstmulighed for en specifik *Aspergillus*-art helt ned til et vandaktivitetsniveau på 0,585 a_w (Stevenson, et al., 2017, s. 693).

LOVGIVNING

I bygningsreglement, BR18, fremgår der alene funktionskrav. I §336 står der, at "Bygningskonstruktioner og -materialer må ikke have et fugtindhold, der ved indflytning medfører risiko for

vækst af skimmelsvamp” (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2020). Videre i vejledningsteksten stk. 1.2 henvises til ”Vejledning og håndtering af fugt i byggeriet” fra 2010, se Figur 16.

1.2.	Det skal sikres, at konstruktionerne ved indbygning ikke har et fugtindhold, der medfører risiko for vækst af skimmelsvamp. Ligeledes skal det sikres, at konstruktionerne ikke opfuges i byggefasen eller at der indbygges materialer med synlig skimmelvækst.
	Der henvises til Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet (SBI 2010).

Figur 16, Bygningsreglementets vejledning om fugt og vådrum (§334-§339) (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2020, s. Vejledningstekst)

Af ”Vejledning og håndtering af fugt i byggeriet” fremgår følgende orienterende maksimale fugtforhold ved tildækning af våde materialer, inden videre arbejde finder sted:

Tabel 2, Orienterende maksimalt fugtindhold ved videre arbejde (Møller E. B., Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet, 2010, s. 78).

Materiale	Videre arbejde	Relativ luftfugtighed	Vægt-%
Beton	Tæt gulvbelægning, som linoleum, vinyl m.m.	85 % RF	ca. 3 %
	Strøgulve, svømmende gulve på fugtspærre	90 % RF	ca. 4 %
	Limede trægulve uden fugtspærre	65 % RF	ca. 2 %

VEJLEDNINGER OG ANVISNINGER

I SBI-Anvisning 272 betitlet ”Anvisning om bygningsreglement 2018” (Hansen, et al., 2020) henvises til almen teknisk fælleseje for generel byggeteknisk vejledning, anvisningens tabel 1. I denne tabel kan der for emnet fugt henvises til bl.a. SBI-anvisning 224 ”Fugt i Bygninger”. I denne står der oplistet følgende fugtkriterier, se Tabel 3.

Tabel 3, Eksempler på eksperimentelt bestemt kritisk relativ fugtighed for skimmelsvampe-vækst på overfladen af byggematerialer (langtidspåvirkning ved 20 °C) (Brandt, et al., 2013, s. 97)

Materiale	Kritisk RF for skimmelsvampevækst, %
Træ og træbaserede materialer	75-80
Karton på gipskartonplader	80-85
Mineraluld	90-95
Ekspanderet polystyren (EPS)	90-95
Beton	90-95
Forurenede materialer, fx forurenede med jord eller støv	75

Ovenstående maksimale vejledende fugtværdier er i øvrigt i identiske med de svenske anbefalinger fra 2005 (Johansson, et al., 2005, s. 23). I tråd med Tabel 3’s maksimale fugtværdi på 95 % RF for beton, kan der for blandingsproduktet EPS-beton også tillades indbygning med op til 95 % RF jf. BYG-ERFA Erfaringsblad fra 2019 (Jacobsen, 2019). Der findes ingen anvisninger som differentierer fugtkriterier i forhold til fugtspærretypen, hhv. banevare versus smøremembran. Smøremembran anføres dog som en mulighed i den nye SBI-Anvisning 274 ” hvor det i tabel 14 fremgår som en mulig erstatning for kapillarbrydende lag efter vandskade eller ved renovering.

I SBi-Anvisning 274 "Skimmelsvampe i bygninger", fremgår et fugtkriterium på 90-95 % RF for **ren** beton, om end læseren gøres opmærksom på, at tilsmudsning og byggepladsforhold udløser krav om et væsentlig lavere fugtkriterium på 75 % RF, se Tabel 4.

Tabel 4, Eksempler på eksperimentelt bestemt kritisk relativ fugtighed (RF), hvor ligevægtsfugtindholdet i materialet vil understøtte vækst af skimmelsvampe på overfladen (Thrane, et al., 2020, s. tabel 1)

Materiale	Kritisk relativ luftfugtighed for vækst af skimmelsvampe [% RF]
Rent træ og rene træbaserede materialer	75-80
Rent karton på gipskartonplader	80-85
Ren mineraluld	90-95
Ren ekspanderet polystyren (EPS)	90-95
Ren beton	90-95
Tilsmudsede materialer, fx med jord eller støv	75

Som det ses af Tabel 2, Tabel 3 og Tabel 4 kan man jf. vejledninger og almen teknisk fælleseje (med reference til gældende lovgivning) aflæse, at nystøbt beton kan indbygges med et maksimalt tilladigt fugtindhold på RF 90-95 %, når det **ikke** har været udsat for støv! De fleste gulvproducenter er mere konservative i forhold til undergulvets fugtniveau, hvorfor en stor andel af de markedsledende gulvproducenter har fastsat et maksimalt fugtkriterium for undergulve på RF 85 % inden udlægning af fugtspærre og svømmende gulvbelægning, se bl.a. (Moland byggevarer a/s, 2020) og (TIMBERMAN DENMARK A/S, 2020). Brancheorganisationen Gulvbranchen definerer en tilsvarende maksimal fugtprocent på RF 85 % (Brancheorganisationen Gulvbranchen, 2015).

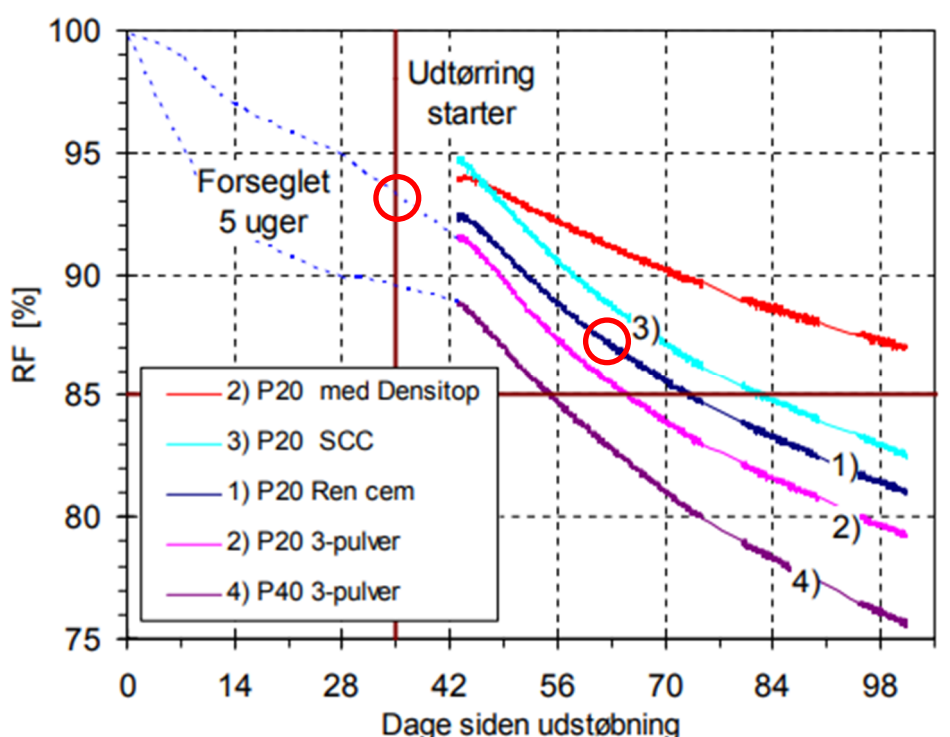
VÆRKTØJER TIL BEREGNING AF AFFUGTNINGSTIDER

Det er ofte vanskeligt at bedømme hvor lang udtørningstid byggematerialer har behov for inden indbygning og ibrugtagning. Vejrliget i byggeperioden samt byggeprocessens planlægning i øvrigt spiller også en stor rolle for affugtningsperioden. Til at bedømme affugtningstider kan man planlægge et byggeforløb på baggrund af vejledende udtørningstider, forsimplede beregningsværktøjer eller specifikke dynamiske fugtsimuleringer. Der er også muligt at ty til gammeldags håndberegning-metoder som angivet i Beton-Bogen (Herholdt, et al., 1985, s. 191). Uagtet fremgangsmåden er det nødvendigt at man i sin fugtstrategiplan afsætter nødvendig tid til affugtning af byggematerialer – og her er det typisk den "svære" beton som er tidsstyrende pga. en typisk større fugtkapacitet sammenlignet med andre byggematerialer. For terrændæk er der desuden tale om ensidig udtørning. Der er stor variation i de enkelte betontypers, recept, indbygningsfugt (v/c -tal¹²) og dermed evnen til at afgive og transportere fugt. Der findes også såkaldte selvudtørrende betoner som i princippet kun

¹² v/c -tal = forholdet mellem vand og cement

indeholder den mængde fugt, der skal til for, at hærdningen af cementen kan finde sted (typisk v/c-tal 0,37-0,40). De relativt små mængder vand i selvudtørrende beton vil dog forsvinde meget langsomt. Cementen binder under hydratiseringen ca. 25 % af sin vægt som kemisk bundet vand i hydratiseringsprodukterne. Dette vand er ikke-fordampeligt ved temperaturer under 100 °C. Herudover adsorberes der på hydratiseringsprodukternes overflader en vandmængde svarende til ca. 15 % af cementens vægt. Dette vand er principielt fordampeligt, men først ved lave damptryk i betonens poresystem, eller ved stigende temperatur, op til ca. 100 °C. Cementen vil altså binde ca. 40 % af sin vægt som kemisk og fysisk bundet vand. Den samlede tilsatte vandmængde minus disse 40 % af cementmængden vil derimod findes som frit vand/kapillarvand (Rasmussen, 2010, s. 37). Som eksempel vil en beton med v/c-tal på 0,6 (150 l vand og 250 kg cement) indeholde 50 liter frit vand pr. m³ (150-(250x0,40)). Der er således betydelige mængder overskuds-fugt der skal fjernes fra et betonbyggeri. For nogle terrændækskonstruktioner kan der indbygges op mod 190 liter frit vand pr. m³ beton (Clifton, 2007, s. 20).

V/c-tallet relaterer sig i øvrigt til betonens miljøklasse, hvor beton i passiv miljøklasse typisk har et højt v/c-tal, mens beton i ekstra aggressiv miljøklasse har et lavt v/c-tal (selvudtørrende beton). Det betyder, at beton med høje v/c-tal (typisk > 0,40) har overskydende vand, som skal udtørres (Morelli, et al., 2015, s. 12). Bemærk, at i passiv miljøklasse er der ikke et øvre krav til betonens v/c-tal. Laboratorieforsøg har vist, at forceret mekanisk udtørring af et almindelig P20 MPa terrændæk, vil kunne reducere fugtniveauet fra 93 til 87 % RF på cirka 30 dage, se Figur 17.



Figur 17, Udtørningsforløb af seks forskellige gulvbetoner som er vist med hver sin farvekode. Den blå kurve viser affugtningsforløbet for en typisk P20MPa beton og de to røde cirkler viser effekten af 30 dages mekanisk affugtning – dvs. fugtreduktion fra 93 til 87 % RF. Der er tale om laboratorieforsøg og målinger udført i 50% af materialedybden (Nielsen & Olsen, 2006, s. 43).

For at opnå et fugtkriterium på 85 % RF for en typisk passiv-beton med et v/c-tal på 0,6, må der påregnes en udtørningstid på 4,4 til 6,6 måneder, uagtet fugttilførsel/nedbør i byggeperioden. For fugtkriterium 90 % må der forventes udtørning på mellem 1,4 og 2,9 måneder alt afhængig af klimaforhold, se røde markeringer på Tabel 5.

Tabel 5, Vejledende udtørningstider for 90 mm beton ensidig udtørning afhængig af v/c-tal og hærdningsforhold fra start af udtørning. Udtørningstiden er angivet for start af udtørning, dvs. fra det tidspunkt, hvor betonen er beskyttet mod nedbør. RF er 60 % og temperaturen er 18 °C Kilde: (Møller E. B., 2010, s. 49).

		Estimeret udtørningstid (måneder)				
Hærdningsforhold inden udtørning startes* v/c tal		A	B	C	D	E
Udtørning til 90 % RF	0,4**	0,7	0,7	0	0,2	0,2
	0,5	1,5	1,5	0,8	1,2	0,8
	0,6	2,9	2,2	1,4	2	1,1
	0,7	3,6	2,9	2,2	3	1,9
Udtørning til 85 % RF	0,4**	2,2	1,5	0,6	1,3	1,3
	0,5	3,9	2,9	3,9	3,5	3,9
	0,6	6,6	4,5	5,6	4,4	5
	0,7	-	6,2	7,3	-	6

* Der anvendes følgende hærdningsforhold inden udtørringen startes:

A: 4 ugers regn efter støbning før udtørring begynder.

B: 2 ugers regn og derefter 2 ugers høj RF i omgivende luft før udtørring begynder.

C: 4 uger med høj RF i omgivende luft uden nedbør.

D: 2 ugers regn før start af udtørring.

E: Udtørring starter 1 døgn efter udstøbning.

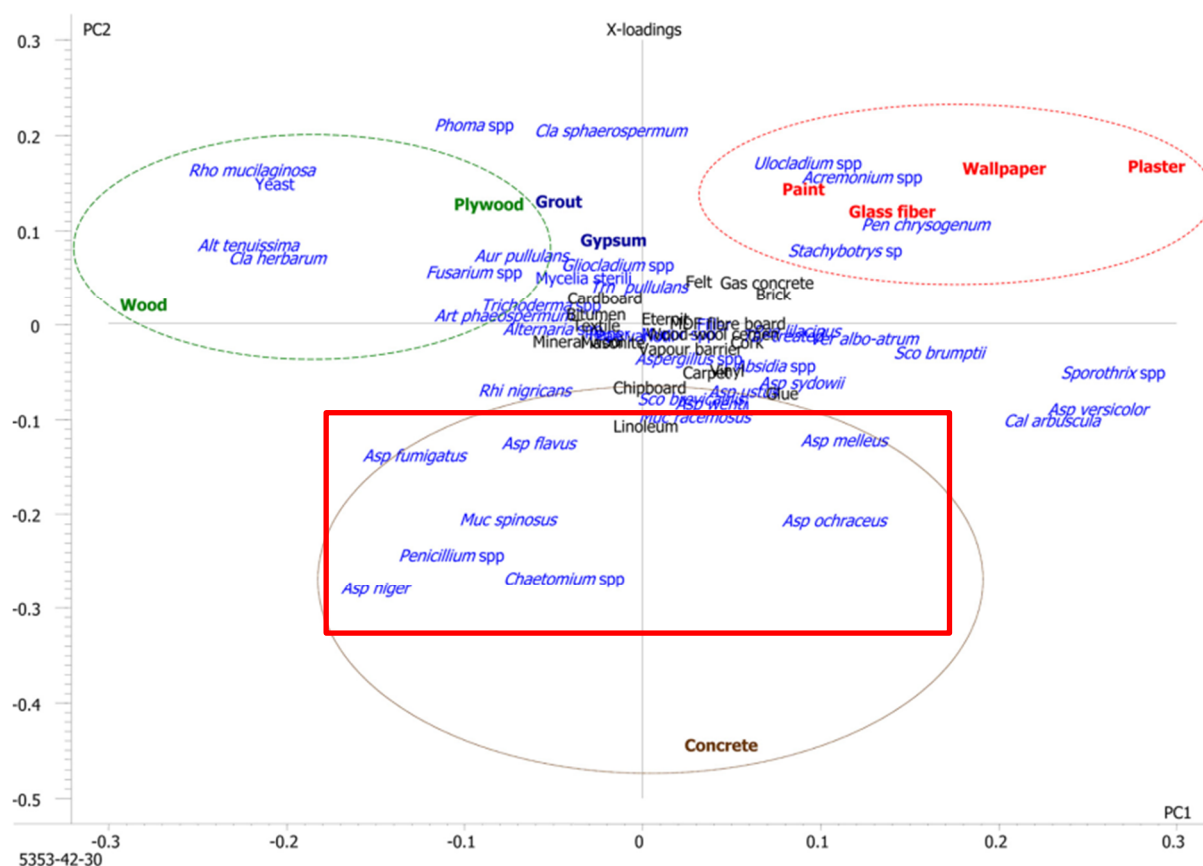
** For selvudtørrende beton med $v/c < 0,35$ -0,4 viser danske erfaringer, at man kan nå ned på 80-85 % RF efter ca. seks måneder uden brug af energikrævende affugtning. Denne udtørring er dog stærkt temperaturafhængig. Udtørring ved 5 °C tager således mere end tre gange så lang tid som ved 20 °C.

PH-VÆRDI

PH-VÆRDI OG BIOLOGISK SELEKTION

Af laboratorieforsøg fra 2004 ses, at fugtigt, høj- og lav densitets beton samt afretningslag har en tydelig tendens til at favorisere vækst af den specifikke skimmelsvampeart *Aspergillus versicolor* (Nielsen, et al., 2004, s. 331). I et andet studie er der analyseret 5.353 dyrkningsprøver (V8-agar) på 18 forskellige materialetyper, og de to materialer som bedst understøttede skimmelsvampevækst var henholdsvis gips og beton (Andersen, et al., 2011, s. 4181). Miljøer med pH-værdier mellem 4,9 og 6,0 favoriserer vækst af skimmelsvampe. Imidlertid er nogle arter alkalisk-tolerante, såsom *Aspergillus fumigatus*, *Lichtheimia corymbifera* og *Mucor hiemalis* som alle er i stand til at fortsætte ved pH-værdi på op til 9 (Bakshaliyeva, et al., 2020).

Skimmelsvampe udvinder energi og kemiske forbindelser fra det lokale miljø afhængigt af både abiotiske og biotiske miljøfaktorer. Disse inkluderer fugtighed, temperatur, pH, ilt tilgængelighed, belysning osv. (Bakshaliyeva, et al., 2020, s. 6773). Generelt betegnes *Penicillium chrysogenum* og *Aspergillus versicolor* som værende de mest almindelige skimmelsvampearter i vandskadede bygninger. På fugtige byggematerialer er det også hyppigt at se slægterne *Chaetomium*, *Acremonium* og *Ulocladium* (Andersen, et al., 2011, s. 4180). Det er dog velkendt, at bestemte skimmelsvampe-typer foretrækker bestemte byggematerialer (præference). Af Figur 18 ses bl.a., at vækstmiljøet på beton favoriserer forekomsten af *Mucor spinosus*, *Mucor racemosus*, flere specifikke *Aspergillus*-arter (særligt *Aspergillus ochraceus*, *Aspergillus flavus* og *Aspergillus niger*) samt *Penicillium*- og *Chaetomium* på slægtsniveau.



Figur 18, Sammenhæng mellem skimmelarter og byggematerialer som plot (svampe-identifikation med V8-agar) (Andersen, et al., 2011, s. 4183)

Eftersom beton er det dominerende materialevalg til horisontale flader i byggeriet (gulve/undergulve), vil der aflejres betydelige mængder støv og snavs i byggeperioden, både ved alm. støvsedimentering og når gulvene betrædes med mudrede sko og deslignende, se Figur 19.



Figur 19, Fotoeksempler fra byggepladstilsyn visende oplag af byggematerialer og udbredt besmudsning af organisk støv. Kilde: sagsarkiv OBH Rådg. Ingeniører A/S.

Skimmelsvampeslægterne *Aspergillus*, *Chaetomium* og *Mucor* er almindelig forekommende i støv og jord og indføres sammen med støv og snavs i byggeperioden (Bakshaliyeva, et al., 2020, s. 6777). Arterne vil, i større eller mindre grad, være til stede på betonoverfladerne når de indbygges og de kan derfor begynde at vokse, så snart betonen bliver våd, da de tåler betonens alkaliske forhold (Andersen, et al., 2011, s. 4187).

For betoner med samme fugtindhold vil øget porevandsalkalinitet resultere i lavere RF. Typisk vil et lavere v/c-tal medføre højere alkalinitet, mens anvendelse af mikrosilika (ved 3-pulver blandinger¹³) vil sænke pH-værdien (Nielsen & Olsen, 2006, s. 25). Disse modsatrettede mekanismer skal man være opmærksom på i tilfælde, hvor man ønsker at manipulere med betonens pH-værdi.

PH SKALAEN

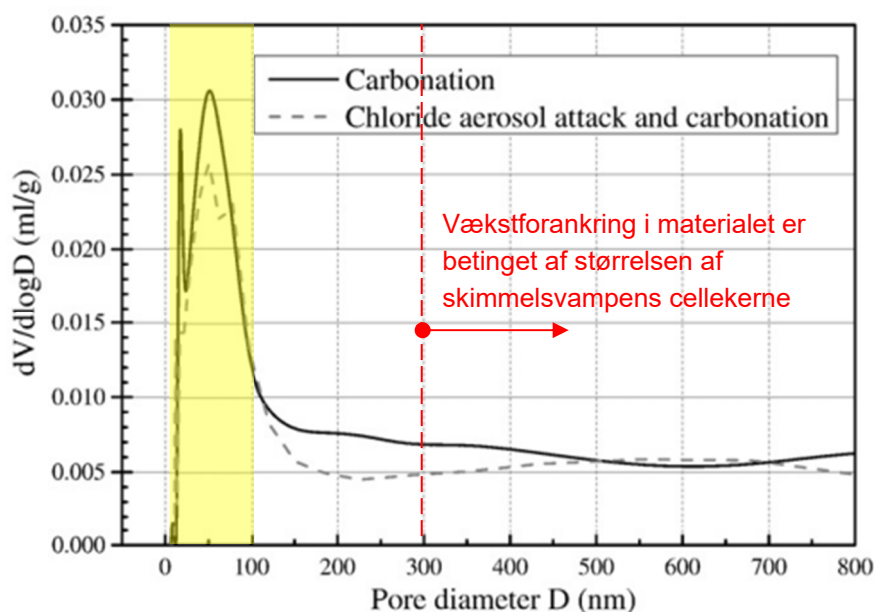
En af de vigtigste faktorer for betonens modtagelighed overfor mikrobiel vækst er pH-værdien (Verdier, et al., 2014, s. 145). pH-skalaen går fra 0 til 14. Skalaen er logaritmisk (titalslogaritme), dvs. en pH-værdi 9 er 10 gange mere basisk end en pH-værdi på 8 (Thirstrup & Johannsen, 2017, s. 9). Betonens overfladestruktur er også vigtig i forhold til etablering, forankring og udvikling af fauna og/eller flora (Guillitte, 1995, s. 216). En porøs overfladestruktur er generelt gunstig for dannelsen af biofilm i makro- og kapillærporer (Stanaszek-Tomal, 2020, s. 6). I forhold til pH-værdi anses de øvre 0-3 mm af betonoverfladen at have relevans for vækstmiljøet på overfladen.

KARBONATISERING

Overfladens pH-værdi vil reduceres, når den udsættes for atmosfærisk kuldioxid. Kulstofdioxid genererer kulsyre i porerne i betonen og reducerer overfladens pH på beton. Denne proces er forholdsvis langsom og kaldes for karbonatisering. For beton defineres ikke-karbonatiseret zone ved en pH værdi $>11,5$ pH, mens pH-intervallet 9-11,5 betegnes som delvis karbonatiseret (dvs. 0-50%), pH-intervallet 7,5-9,0 er overvejende karbonatiseret (dvs. 50-100%) og pH værdier $<7,5$ betragtes gennemkarbonatiseret (Chang & Chen, 2006, s. 1766). Beton er meget alkalisk og for nystøbt beton er pH-værdien typisk >12 , og beton fremstillet med højalkal cement kan have en pH-værdi over 13.

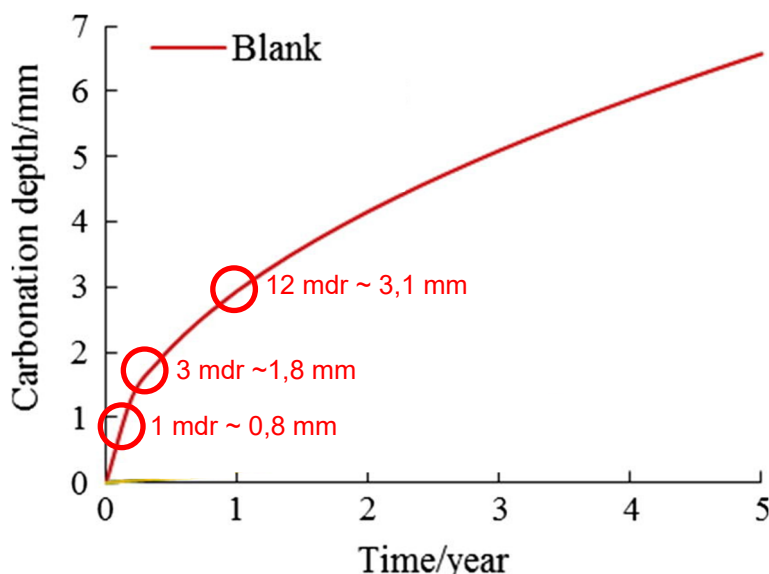
¹³ Standard betegnelsen "3-pulver blanding" dækker over en blanding af fillermaterialerne; cement, flyveaske (restprodukt fra kulafbrænding) og mikrosilika (fra vulkansk bjergart). Cement og flyveaske har begge en typisk partikelstørrelse på $\sim 10 \mu\text{m}$, men hvor cementpartiklen er kantet er flyveasken kugle-formet. Mikrosilika er også kugleformet men cirka 100 gange mindre ($\sim 0,1 \mu\text{m}$). En typisk recept hedder 75:20:5. Der er IKKE krav til maksimalt indhold af flyveaske i P-beton (DS/EN 934-2, 2012, s. 11-15)

Karbonatisering går meget langsomt i vandmættet eller udtørret beton, men noget hurtigere i middel-fugtige betoner. Det kræves desuden, at betonen har en vis porøsitet, som tillader luftens kuldioxid at trænge ind i betonen (Herholdt, et al., 1985, s. 118). For svagere betontyper kan der ses en øget karboniseringshastighed, qua en øget andel af åbne porer generelt. Bemærk at andelen er åbne porer i størrelsen $\varnothing$ 0,01-0,1 μm , yder et relativt større bidrag til den samlede karbonatisering, se gul markering på Figur 20. Til sammenligning kan skimmelsvampe gro "ind" i materialer med en porediameter $\geq 0,3$ mikrometer (μm) (Thrane, et al., 2020, s. 122), se rød markering på Figur 20.



Figur 20, Karbonatisering af betonstruktur med v/c-tal 0,47, påvirkning af kuldioxid i forhold til betonens porestørrelse (Liu, et al., 2017, s. 221)

På Figur 21 ses at overfladens yderste 0,8 mm er karbonatiseret allerede efter ~1 måneds eksponering med atmosfærisk luft – uden hensyntagen til vejrkonitioner.



Figur 21, Karboniseringsdybde (Li, Dong, Bai, Lei, & Du, 2017, s. 63). Rød kurver = ubehandlet beton af ordinær Portland cementbetontype (figuren er renset for grafer visende effekt af coating). Røde cirkler viser karboniseringsdybden efter hhv. 1, 3 og 12 måneder.

Karboniseringshastigheden vokser generelt med temperaturen. Feltmålinger har for en betonstyrke 28,9 MPa vist, at karboniseringsdybden er 3,1 mm efter 12 måneder (Peng, Tang, Zhang, & Cai, 2018, s. 15).

PH-VÆRIDENS BETYDNING FOR OVERFLADEVÆKST OG MIKROMILJØ

Generelt er *Aspergillus*-arter mere tolerante overfor høj pH-værdi, mens *Penicillium*-arterne er mere tolerante over for sure miljøer (lav pH-værdi) (Wheeler, Hurdman, & Pitt, 1991, s. 141). Af kendte skimmelsvampearter med høj alkalisk tolerance (pH-værdi 9,8-11) fremhæves *Penicillium citrinum*, *Penicillium cyclopium*, *Aspergillus parasiticus*, *Aspergillus ochraceus*, *Aspergillus niger* og *Aspergillus flavus* (Sedlbauer, 2000, s. 165).

Netop for beton kan den fysisk-kemiske påvirkningen også være modsatrettet eftersom mange af de metabolitter der produceres af skimmelsvampene, bl.a. består af organiske syrer, CO₂, mineralsyrer og svovlforbindelser (Campana, Sabatini, & Frangipani, 2020, s. 511). Denne evne til at ændre pH-værdi i nærmiljøet er bl.a. påvist ved laboratorieforsøg med vækst på alkaliske substrater med pH-værdier i niveauet 9,7–10,3 (Simonovicová, Gódyová, & Sevc, 2004, s. 8). Under naturlige/virkelige betingelser er det muligt at den alkaliske resistens er endnu højere, i det omfang svampene kan regulere surheden i deres nærmiljø (Fries, 1973, s. 11). Denne pH kontrol er en slags overlevelsesmekanisme som kaldes protonpumpe aktivering, hvor det ekstracellulære rum gøres surt (Keton, et al., 2019, s. 2).

I meget iltfattige miljøer har skimmelsvampearterne *Mucor hiemalis*, *Lichtheimia corymbifera* og *Rhizomucor miehei* vist sig at have mikroaerofile (anaerobe) egenskaber (Bakshaliyeva, et al., 2020, s. 6773). Iht. til Klaus Sedlbauer må der generelt forventes risiko for skimmelsvampevækst på overflader med pH-værdi fra 2 til 11 (Sedlbauer, 2000, s. 164). Bemærk at matematiske skimmelmodeller, som WUFI Bio (WUFI® Bio, 2020) og VVT (WUFI® Mould Index VTT, 2020), ikke inddrager pH-værdien som et særskilt materialeparameter foruden den i forvejen tildelte substratklasse (Sedlbauer, 2000, s. 44).

METODER OG MATERIALER

FUGTRELATEREDE BYGGESKADER

Udvikling i antal af byggeskader, skadeserstatninger og den "fugtrelaterede andel af skader" er bedømt på baggrund af tal fra Byggeskadefonden (BSF), Byggeskadefonden vedrørende Byfornyelse (BvB), Byggeriets Evaluerings Center (BEC), Byggeriet Ankenævn (BA), Forsikring & Pension samt Byggeskadeforsikringsordningen. Statistik fra Byggeskadeforsikringsordningen er fremskaffet ved sekretariatet for byggeskadeforsikringsordningen (Teknologisk Institut) og fremgår af Bilag 2. For alle øvrige instanser at der anvendt offentlig tilgængelig statistik, jf. Bilag 1.

Overordnet set har det ikke været muligt at synliggøres andelen af fugtrelaterede byggeskader på baggrund af den tilgængelige statistik. I de tilfælde hvor fugtskader har fremgået isoleret for enkelte bygningsdele eller forsikrings-type ses, at direkte fugtafledte skader udgør beskedne 5-10 %. En del af forklaringen skyldes formentlig at fugt- og skimmelsvampevækst ofte vil være en følgeskade til svigt eller skader som i statistikken fremgår som en anden udløsende faktor. Analysen og dens øvrige delkonklusioner fremgår alene af Bilag 1.

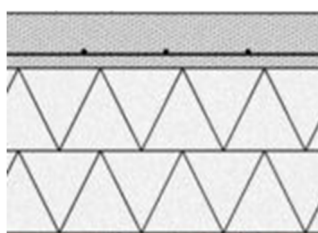
BEREGNING AF AFFUGTNINGSTIDER

I det følgende beskrives forskellige beregningsscenarier for affugtning af et traditionelt støbt terrændæk. Der regnes konkret på affugtningstider (antal døgn) til et givet fugtkriterie eller affugtningseffekt inden for en afhærdnings- og affugtningssperiode som er fastsat til 90 dage. Terrændæk er valgt som "værst tænkelige" scenario efter som der altid er tale om ensidig udtørring. Rapportens teori og casestudiet omfatter dog både etagedæk og terrændæk, eftersom problemstillingen er identisk. Der tages endvidere udgangspunkt i et forsimplet byggeprincip af et enfamiliehus hvor byggeperioden er kort og tiden til affugtning derfor er begrænset.

BEREGNINGSMODEL

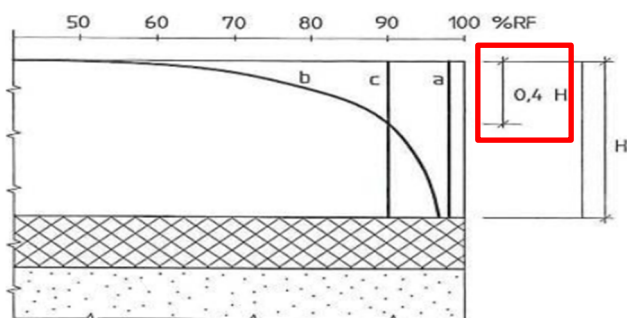
Tabel 6, Beregningsmodel og beskrivelse.

Beregningsmodel	Beskrivelse
Terrændæk	100 mm beton er valgt som standard lagtykkelse - Polystyren er valgt på grund af lav fugtkapacitet, således evt. tilskud fra indbygningsfugt elimineres 300 mm polystyren er valgt da det er i TorkaS maksimale isoleringstykkelser og beregningsresultaterne ønskes sammenlignelige - I WUFI udføres tre successive simuleringer med hver deres klimabetingelser, start-slutbetingelser er indtastet ved iteration. (30 d. vejrlig + 30 d. overdækket uopvarmet + 30 d. opvarmet/affugtning)



MÅLEDYBDE

Ved ensidig udtørring defineres måledybden typisk som mellem 40 og 50 % af betontykkelsen, se Figur 22. TorkaS, BYG-ERFA-modellen, Gulvfakta, Aalborg Portland og *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet* med hjemmel i BR18, anviser alle en måledybde på 0,4 gange dækkets tykkelse, hvilket har været udgangspunktet for alle beregningerne i denne rapport.



Figur 22, Fugtprofil i betongulv. a = nystøbt beton, b = fugtprofil under udtørring og c = fugtprofil efter udlægning af fugtmembran og omfordeling af fugt ud fra ligevægtspotentialet (Geving & Thue, 2002).

BEREGNINGSSCENARIO 1

Hvor der omtales et standard byggeforløb refereres til en foruddefineret optimal byggeproces for et "standard-parcelhus" med en byggeperiode på cirka 180 dage¹⁴ se Tabel 7. I omhandlende tilfælde er det defineret som et enfamilieshus i et-plan med traditionel støbt terrændæk som beskrevet i Tabel 6. Der er anvendt to forskellige starttidspunkter, ét for sommerbyggeri (S) med støbetidspunkt 1. april, og ét for vinterbyggeri (V) med støbetidspunkt 1. oktober. Den foresimplede byggeproces fremgår af Tabel 7.

Tabel 7, Et foruddefineret "standard byggeforløb" er grundlag for denne rapport's beregninger og vurderinger.

Forsimplet byggeproces for et enfamilieshus		
Samlet byggeperiode er 6 måneder (180 dage)		
Bygningsdel/proces	Type/bemærkning	Tid/dag
Kloak/jord/fundament		0
Støbning af terrændæk	Passiv miljø: Eks. styrkeklasse 20 MPa og v/c-tal 0,67 (P20)	30
Eksponering for periodisk regn (i denne periode slibes overfladen for fjernelse af cementpasta)		30-60
Tæt tag/undertag (ej varmesat)		60-90
Affugtningsperiode (bygning lukket og varmesat). Evt. påvirkning af fugttilskud fra flise/spartle/-malerarbejde er ikke indregnet	RF ~40% ved 20°C	90-120
Gulvlægning/aptering/finish	Fugtspærre af banevare	120-150
Mangler/rengøring/aflevering		150-180

¹⁴ Danmarks største leverandør af parcelhuse er HusCompagniet og de oplyser at er typisk byggeforløb er 8-10 måneder (HusCompagniet, 2019, s. 154). Danmarks næststørste leverandør af parcelhuse, Hybel, oplyser at byggetiden typisk er 4,5 – 5,5 måneder (Hybel, 2020, s. 6).

Af Tabel 7 skal det bemærkes, at der typisk går 90 dage (~3 mdr.) fra støbning af terrændæk til udlægning af gulve på et fugtspærrende underlag af banevare. Disse 3 måneder bliver brugt som bedømmelsestidspunkt både ved fortolkning af omhandlende fugtberegninger men også i forhold til pH-værdier i betonoverfalden.

BEREGNINGSSCENARIO 2

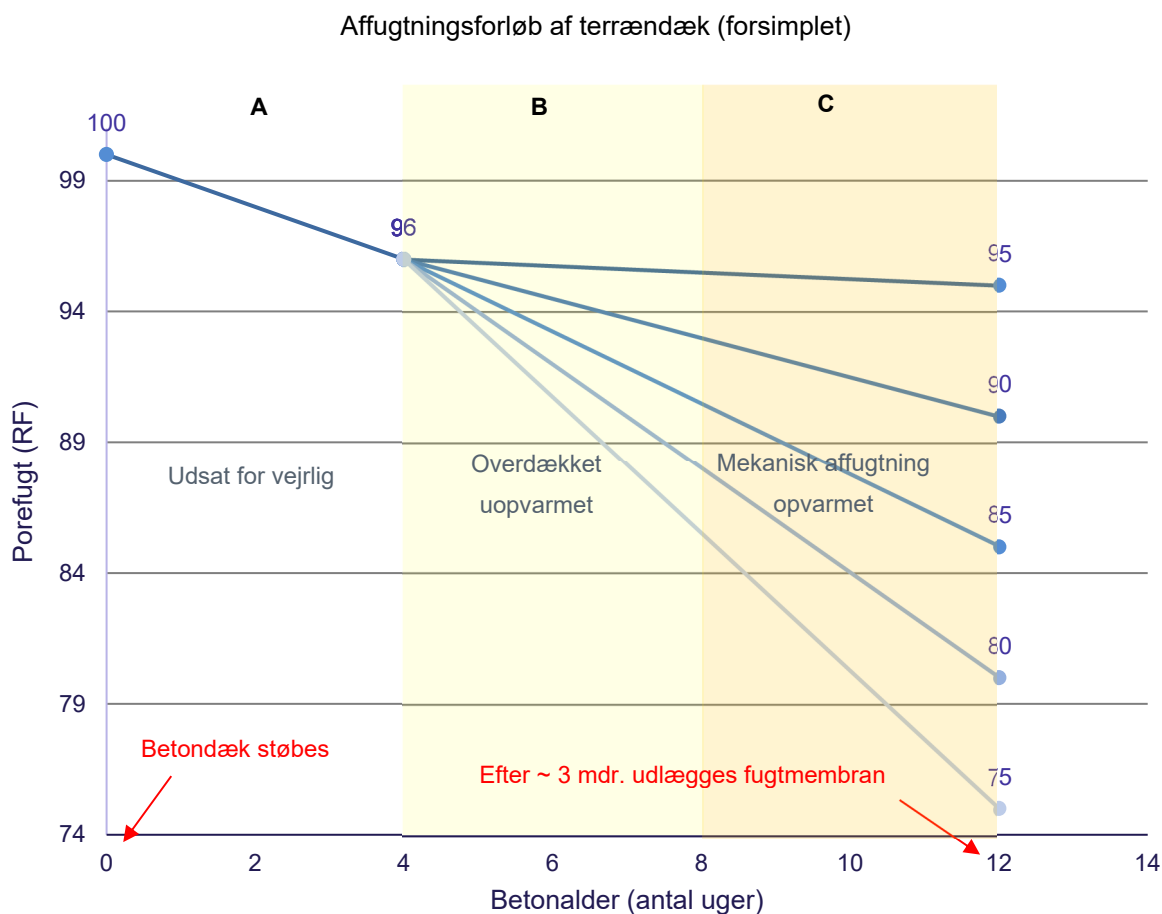
Som beregningsscenario 1 - men hvor byggeforløbet ved beregning opdeles i følgende tre faser af relevans for både affugtningsforløb og karbonatisering:

- A. Afhærtningsperioden uden tag på bygning, udsat for vejrlig (30 dage)
- B. Uopvarmet periode under tag, ingen fugttilskud og naturlig udtørring (30 dage)
- C. Forceret mekanisk affugtning i opvarmet bygning (gns. 20 °C og 40 % RF (30 dage)

I beregninger udført med WUFI vil der refereres til ovenstående tre klimabetingelser (A, B og C).

PRINCIP FOR AFFUGTNINGSFORLØB

Med Figur 23 synliggøres betydningen af et effektivt affugtningsforløb, når der i et typisk byggeforløb ønskes et fugtkriterium på 75, 80, 85 eller 90 % RF.



Figur 23, Typisk affugtningsforløb for terrændæk i et enfamilieshus. Der går typisk 3 mdr. fra støbning til gulvlægning. En almindelig P20 MPa beton antages at have et fugtniveau på ~96% RF efter 5 ugers eksponering for vejrlig (Nielsen & Olsen, 2006, s. 44). 85 %RF er et typisk anvendt fugtkriterium.

BEREGNINGSFORUDSÆTNINGER OG RANDBETINGELSER

Tabel 8, Beregningsforudsætninger og randbetingelser.

WUFI Pro 6.5 (BEREGNINGSSCENARIO 2)			
Underlaget består af 300 mm XPS (0,04 W/mK) 100 mm betondæk opdeles i to lag med 40/60-fordeling i forhold til ønsket måledybde på 40 %			
Betontype		Beskrivelse	Sorptionskurve
MPa	v/c-tal		
P12/15	-	Fraunhofer C12/15 Beton 2200 kg/m ³ Vandindhold: 175 kg/m ³	
M35/45	-	Fraunhofer C35/45 Beton 2220 kg/m ³ Vandindhold: 147 kg/m ³	
-	0,5	Fraunhofer Concrete v/c 0,5 Beton 2300 kg/m ³ Vandindhold: 150 kg/m ³	
-	-	MASEA Concrete (TU Dresden) Beton 2104 kg/m ³ Vandindhold: 144 kg/m ³	

Fase		Forudsætninger
A		- o jordtemperatur sættes til 12 °C ved sinuskurve ± 2 °C - o Initial fugt i beton = 1 (100% RF) - o Initial støbetemperatur = TRY-månedsmiddelværdi (april for sommerberegning og november for vinterberegning) - o Udv. overgangsisolans (exterior surface) 0,17 (m²K)/W - o Ingen vindpåvirkning - o Ingen coating - o Ingen kort- eller langbølget stråling - o jordens kortbølgerreflektion er sat til standard værdien 0,2 - o Andel som er regnpåvirket = faktor 1,0 - o Indv. overgangsisolans (interior surface) = 0,04 (m²K)/W - o Regnpåvirkning (Rain load (R1)) = faktor 1,0 - o LUND klimadata (jord 12 °C ± 2 °C sinus)
B		som A. men med flg. ændringer: - o Initial fugt i beton = slutbetingelser fra beregning a. - o Klimadata iht. TRY månedsmiddeltemperatur og RF. (V) = 91% RF og 5 °C u. regn (S) = 78% RF og 10,6 °C u. regn - o Ingen <i>rain load</i>
C		som A. men med flg. ændringer: - o Initial fugt i beton = slutbetingelser fra beregning b. - o Konstant indeklima på 20 °C og 40 % RF - o Ingen <i>rain load</i>
TorkaS – materialeparametre og randbetingelser (BEREGNINGSSCENARIO 2)		
I beregningsprogrammet er det ikke muligt at regne med lavere fugtindhold end 160 kg/m ³ , hvorfor der for 3 af 4 betontyper er regnet for høje startfugtsbetingelser end angivet i BYG-ERFA-modellen. - o Affugtning v. 20 °C og 40 % RF) - o Støbetemp. V= 10 °C S=15 °C - o Vindforhold på støvetidspunkt: 0 m/s - o Klimadata fra: Lund (Sverige) - o Støbeform: Ingen - o Afdækning: Ingen		
P20	0,67	Vandindhold: 160 kg/m ³ (faktisk 151 kg/m ³) Cement 239 kg/m ³ Densitet 2350 kg/m ³
P20	0,62	Vandindhold: 171 kg/m ³ Cement 276 kg/m ³ Densitet 2350 kg/m ³
P20	0,69	Vandindhold: 160 kg/m ³ (faktisk 155 kg/m ³) Cement 232 kg/m ³ Densitet 2350 kg/m ³

P40	0,39	Vandindhold: 160 kg/m ³ (faktisk 135 kg/m ³) Cement 410 kg/m ³ Densitet 2350 kg/m ³		
BYG-ERFA-modellen (BEREGNINGSSCENARIO 1)				
Startfugtindhold: 99 % RF Affugtning ved: 20 °C og 40 % RF BEMÆRK: En af nedenstående betontyper er en SCC-beton ¹⁵ , de øvrige tre er konventionelle. Alle fire betoner indeholder en mindre andel plastificeringsstoffer (FOSROC Conplast 212, 316 AEA og/eller Superplast Structuro A1510). For uddybende betoninfo: (Nielsen & Olsen, 2006, s. 15)				
P20	0,67	U _{start} 6,7 vægt% / U _{krit} 3,3 vægt% (75% RF) Beton 2280 kg/m ³ Cement 171 kg/m ³ / Flyveaske 60 kg/m ³ / Mikrosilika 0 kg/m ³		
P20	0,62	U _{start} 6,3 vægt% / U _{krit} 3,3 vægt% (75% RF) Beton 2325 kg/m ³ Cement 277 kg/m ³ / Flyveaske 0 kg/m ³ / Mikrosilika 0 kg/m ³		
P20 SCC	0,69	U _{start} 5,7 vægt% / U _{krit} 2,7 vægt% (75 & RF) Beton 2260 kg/m ³ Cement 163 kg/m ³ / Flyveaske 80 kg/m ³ / Mikrosilika 17 kg/m ³		
P40	0,39	U _{start} 6,1 vægt% / U _{krit} 3,4 vægt% (75% RF) Beton 2300 kg/m ³ Cement 281 kg/m ³ / Flyveaske 53 kg/m ³ / Mikrosilika 11 kg/m ³		
S = Sommerberegning, startdato 01.april, tæt hus 01.maj og udtøringsstart 01.juni V = Vinterberegning, startdato 01.oktober, tæt hus 01.november og udtøringsstart 01.december				
Miljøklasser ift. eksponeringsklasser				
BEMÆRK: Eksponeringsklasser er af miljømæssige hensyn afkoblet fra betonens styrkeklasser, hvorfor der i ovenstående også ses P-betoner med højere trykstyrke end hvad de traditionelle miljøklasse tilsiger.				
Miljøklasse iht. DS 411 (Dansk Standard, 2007)	Passiv (P)	Moderat (M)	Aggressiv (A)	Ekstra aggressiv (E)
Eksponeringsklasser iht. DS/EN 206-1 (Dansk Standard, 2019)	X0	XC2	XD1	XD2
	XC1	XC3	XS1	XD3
		XC4	XS2	XS3
		XF1	XF2	XF4
		XA1	XF3	XA3
			XA2	

SKIMMELSVAMPE - CASESTUDIE

Udvalgte sager omhandler skimmelsvampevækst på nyere/nystøbt beton. Der er alene udvalgt sager som omhandler skimmelsvampevækst enten på terrændæk eller etagedæk. Der findes ingen korresponderende pH-værdier for de enkelte målepunkter. Kilde: sagsarkiv OBH Rådgivende Ingeniører A/S.

¹⁵ Selvkompakterende beton (SSC = "Self-Compacting Concrete")

PH-VÆRDI - FELTFORSØG

FREM GANGSMÅDE

pH kan måles på flere måder og der findes en række standarder for måling i væsker. Der findes pt. ikke nogen standardiseret testprocedure for feltmåling af pH i faste materialer såsom beton (Behnood, Tittelboom, & De Belie, 2016, s. 176). For faste materialer er der erfaringer med at påfører phenolphthalein for aflæsning af farveudslag og på tilsvarende vis ved udvaskning af overfladen til lakmuspapir. Phenolphthalein opløsningen er fravalgt af arbejdsmiljømæssige hensyn, mens udvaskning til lakmuspapir er fravalgt på baggrund resultaternes validitet (Behnood, Tittelboom, & De Belie, 2016, s. 177-181). Der findes alternative prøvemethoder, ej standardiseret, som forholder sig til overfladens betonstøv ved afskrabning/slibning (Behnood, Tittelboom, & De Belie, 2016, s. 181). Herunder en metode som angiver en 60-sekunders-opløsning bestående af destilleret vand og betonpulver i forholdet 10:1 (Vogler, et al., 2020, s. 3). Denne er sammenlignelig med en målemetode som er beskrevet i en australske standard, AS 1884 fra 2012 (AS 1884 Floor covering - Resilient sheet and tiles - Installation practices, 2012), som har været udgangspunkt for metodevalget.

Metoden som beskrevet i AS 1884:

- a) indledningsvis klargøring af betonoverfladen ved let håndslibning med mellemfint sandpapir (slibekorn 200). Overskydende støv fjernes med en blød håndkost.
- b) Med sprøjteflaske påføres betonoverfladen ~10-20 dråber destilleret/deioniseret vand som efterlades i ~60 sekunder.
- c) Opløsningen opsamles herefter med en pipette og placeres i sensorelektroden på det digitale pH-meter for direkte aflæsning af måleværdien i displayet.

I praksis er metoden tilrettet for at undgå fortynding pga. af fragmenter fra sandpapiret og forbedret ekstrahering ved en kontrolleret opblanding på et ikke-sugende underlag. Den **faktisk** udførte prøvemethode er derfor som følger:

- a) Limrester og byggeaffald afskrabes med spartel og evt. overfladestøv fjernes med en håndkost.
- b) På betonoverfladen udføres en let håndslibning med grov sandpapir (slibekorn 40).
- c) Slibestøvet (~0,05-0,1 g)¹⁶ opsamlet på en metalspartel og udrøres med 10-20 dråber deioniseret vand som røres rundt og efterlades i ~60 sekunder.
- d) Opløsningen ekstraheres herefter med en pipette og placeres i sensorelektroden på det digitale pH-meter for direkte aflæsning af måleværdien i displayet.

Målingerne er udført med et såkaldt elektrokemisk pH-meter, som udmærker sig ved en generelt stor nøjagtighed (Vonau & Guth, 2006, s. 748). pH målingerne er alle udført *on-site* med et digitalt pH-meter af typen LAQUA Pocketmeter PH22 fra HORIBA (HORIBA, 2020), måleusikkerheden er $\pm 0,01$ pH. pH-meter typen er en potentiometrisk målemetode¹⁷, bestående af en måleelektrode af glas og en spændingsstabil referenceelektrode belagt med titanium, se Figur 24.

¹⁶ *Prøveafvigelse* ift. fortynding er efterprøvet ved afmåling af homogen betonstøv med præcisionsvægt, se senere i dette afsnit.

¹⁷ *Måling af elektrisk potential baseret på spændingsforskellen mellem to elektroder.*



Figur 24, Repræsentative fotos fra pH-målinger i felten.

VALIDERING AF pH MÅLINGER I FORHOLD TIL FORTYNDINGSEFFEKT

Validering af måleresultater er tilnærmet ved et lav-praktisk forsøg for at tydeliggøre fortyndings-effekten. En ensartet masse af betonstøv er opsamlet og hjemtaget til analyseret på laboratorium ved ~21 °C. Der er foretaget afvejning med præcisionsvægt. Formålet var at vurdere betydningen af fortynding i forhold til prøveresultatet. I Tabel 9 ses, at der er en god reproducerbarhed af enkelt-målinger og at der kun er mindre afvigelser i forhold til fortyndingseffekten. Repræsentative fotos fra den praktiske afvejning og fortynding ses af Figur 25.

Tabel 9, Vurdering af fortyndingseffekt (betonstøv vs. deioniseret vand).

Prøvemængde (betonstøv) ift. 20 dråber deioniseret vand	0,025 g	0,05 g	0,1 g	0,2 g	0,4 g
Aflæsning på pH-meter efter kalibrering med pH7-væske (21°C)	10,42 10,41	10,58 10,52 10,50 10,53	10,62 10,58 10,55	10,66 10,61	- *

* Blandingen er ikke egnet til måling i pH-meter, væsken er for "grødet" og tyktflydende



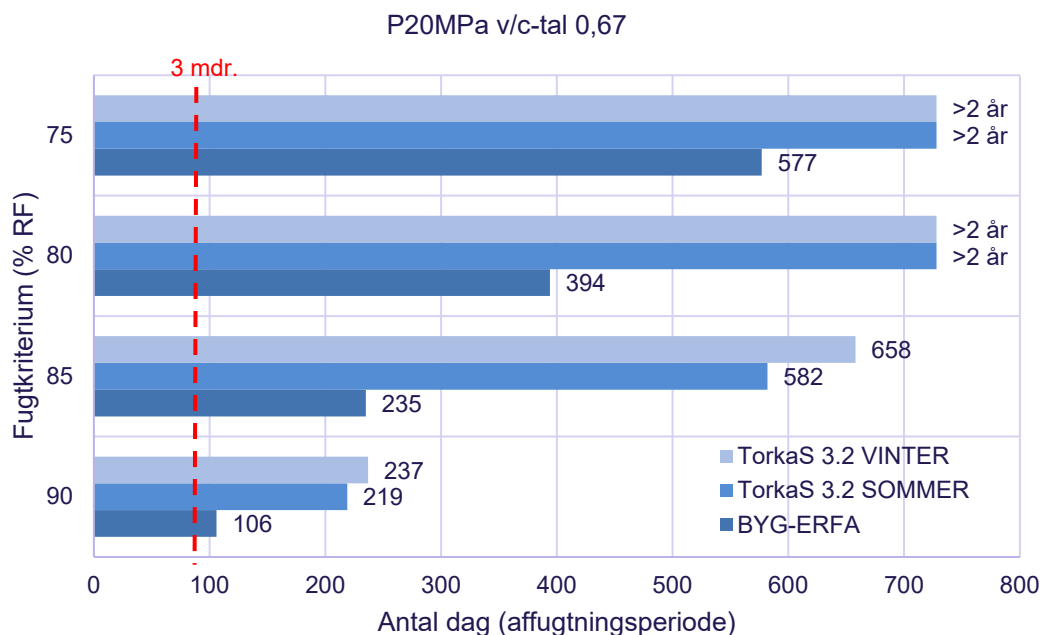
Figur 25, Repræsentative fotos fra pH-målinger udført på afmålte doser af deioniseret vand og betonstøv.

Det vurderes at en opløsning bestående af 0,05- 0,1 gram er optimal både henset til konsistens og målingernes reproducerbarhed.

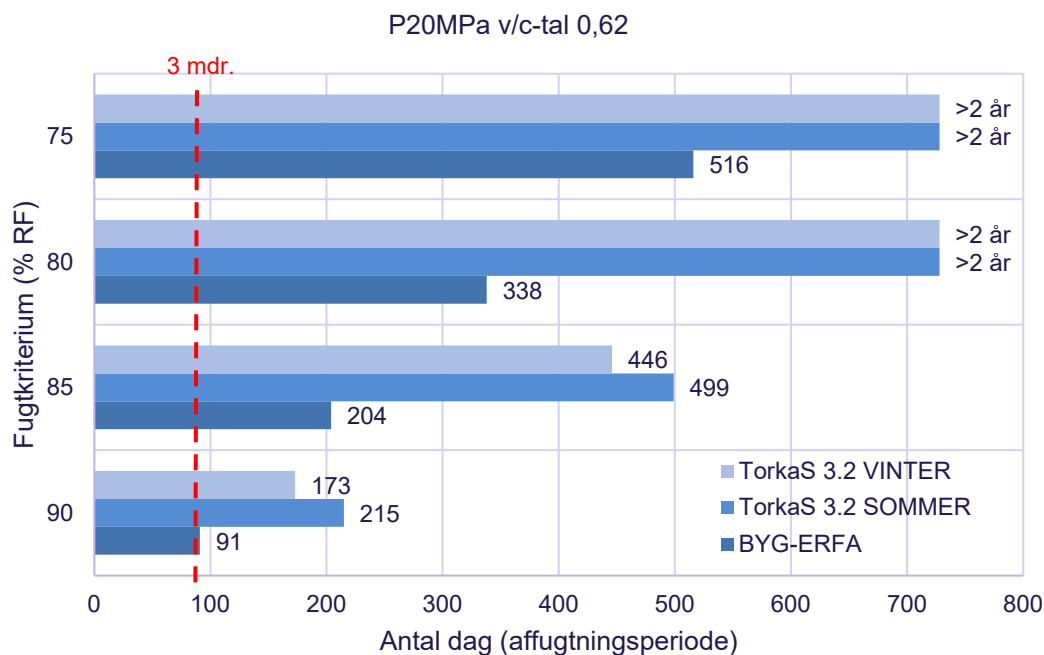
RESULTATER

AFFUGTNINGSTIDER – BEREGNINGSSCENARIO 1 OG 2

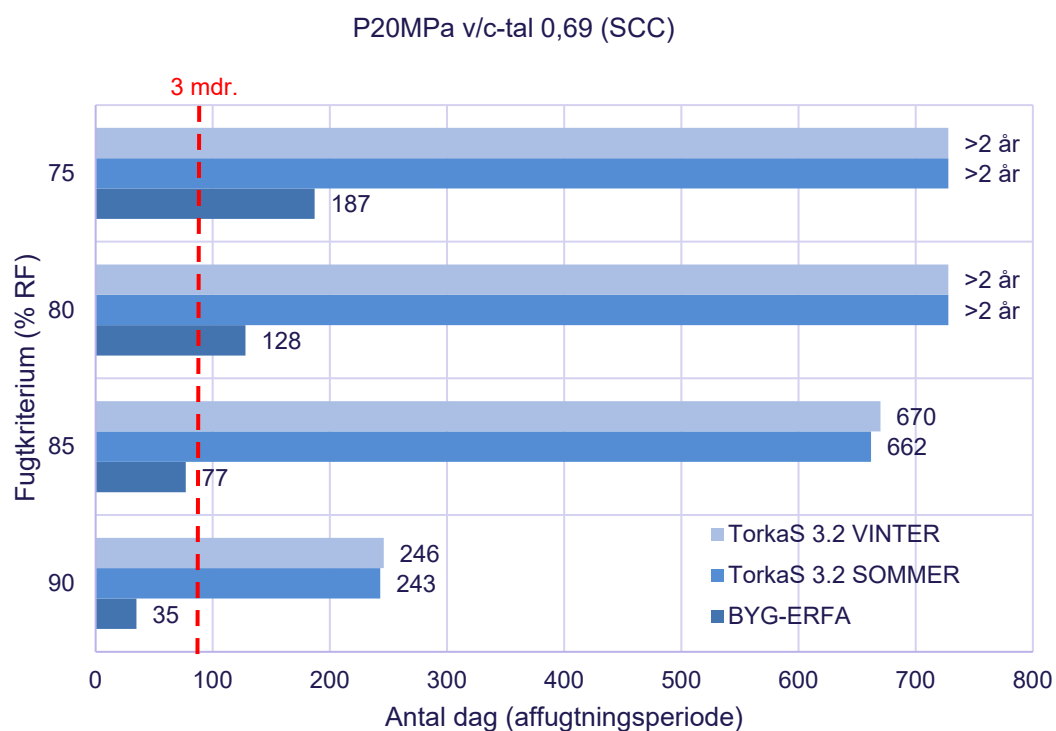
For beregninger udført med TorkaS og BYG-ERFA-modellen sammenlignes affugtningstider (antal døgn) for opnåelse af fugtkriterierne 90, 85, 80 eller 75 % RF, se Figur 26 til Figur 29. For beregninger udført med WUFI estimeres affugtningseffekten (% RF) for et "Standard byggeforløb" jf. Tabel 7.



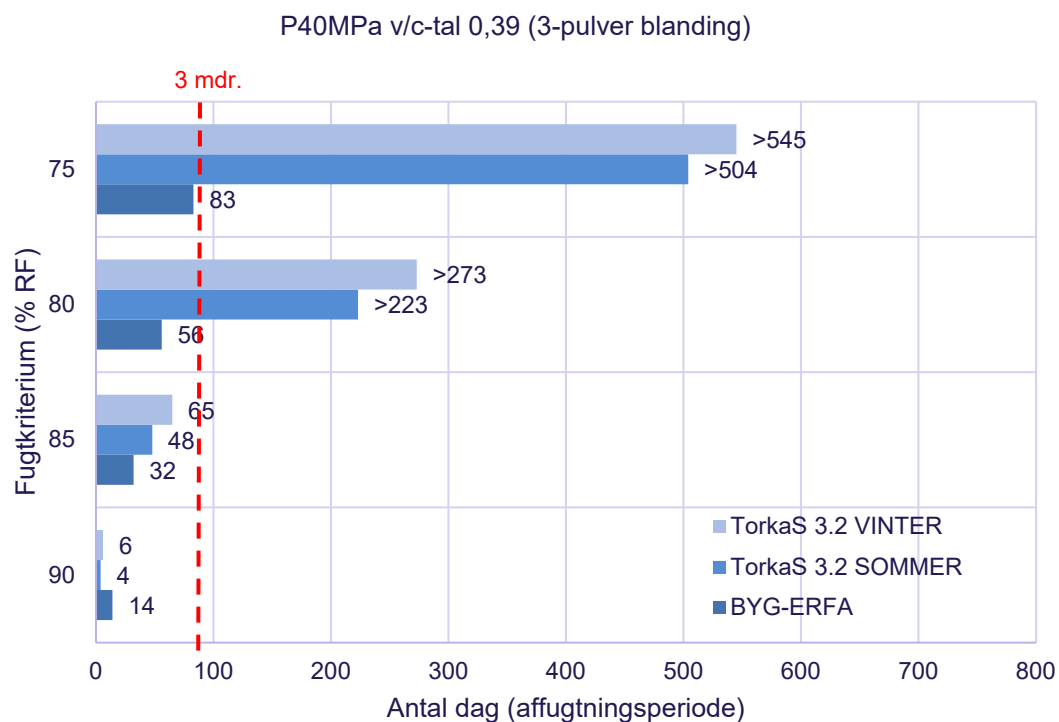
Figur 26, Sammenligning af affugtningstider for opnåelse af fugtkriterium 75, 80, 85 eller 90 % RF i beton P20MPa v/c-tal 0,67. Rød linje viser et afhædnings- og affugtningsperioden på 3 mdr.



Figur 27, Sammenligning af affugtningstider for opnåelse af fugtkriterium 75, 80, 85 eller 90 % RF i beton P20MPa v/c-tal 0,62. Rød linje viser et afhædnings- og affugtningsperioden på 3 mdr.

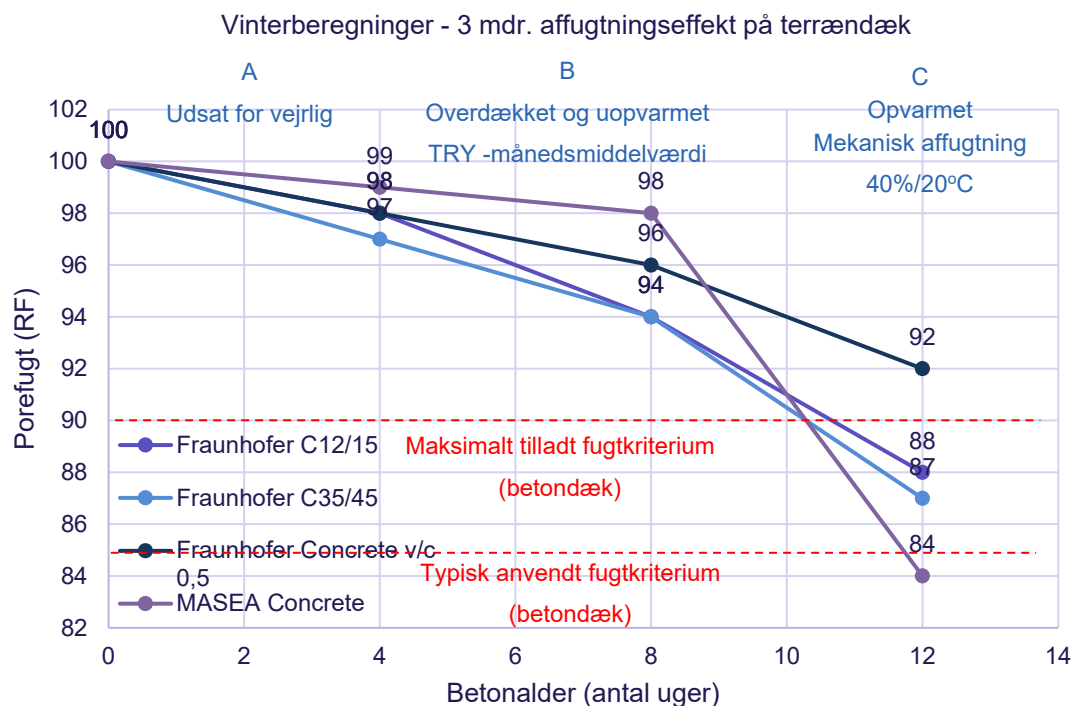


Figur 28, Sammenligning af affugtningstider for opnåelse af fugtkriterium 75, 80, 85 eller 90 % RF i beton P20MPa v/c-tal 0,69 SCC. Rød linje viser et afhærdnings- og affugtningsperioden på 3 mdr.

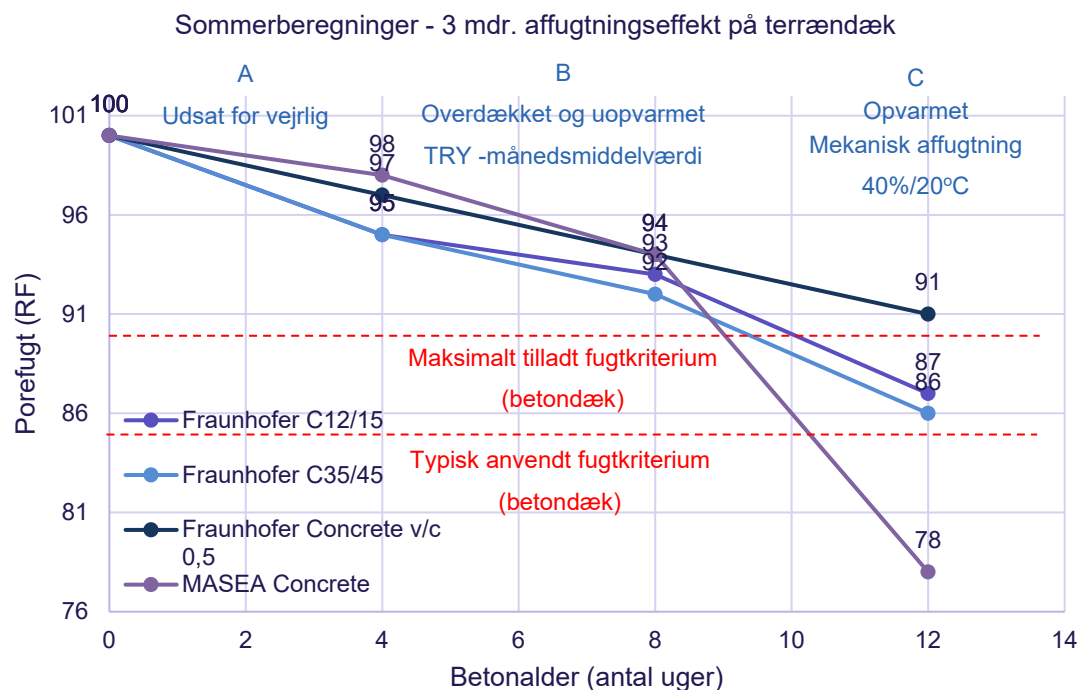


Figur 29, Sammenligning af affugtningstider for opnåelse af fugtkriterium 75, 80, 85 eller 90 % RF i beton P40MPa v/c-tal 0,39. Rød linje viser et afhærdnings- og affugtningsperioden på 3 mdr.

I Figur 27 og Figur 28 sammenlignes affugtnings-effekten mellem fire forskellige betontyper fra WUFI's materialebibliotek. Der er udvalgt fire betontyper for videre simulering af fugtudvikling i den tidligere definerede byggeproces (fase A, B og C).



Figur 30, Sammenligning af affugtnings-effekt for fire veldefinerede betontyper. Resultatskema af vinterberegninger.



Figur 31, Sammenligning af affugtnings-effekt for fire veldefinerede betontyper. Resultatskema af sommerberegninger.

SKIMMELSVAMPEVÆKST PÅ BETON - CASESTUDIE

PRØVE- OG MÅLERESULTATER FRA PERIODEN 2017-2020

Skimmelsvampevækst konstateret på nyere/nystøbt beton, enten terrændæk eller etagedæk.

Tabel 10, Casestudie bestående af laboratorieresultater med korresponderende fugtmålinger fra 21 anonymiserede sager fra perioden 2017-2020.

Løbe nr.	Case ID	Bygningsdel		Renhed* (visuel bedømmelse)	Fugtmålinger				Mdr.		Skimmelsvampeanalyser					
					Absolute fugtværdier		Relative fugtværdier		Latenstid							
		Terrændæk	Etagedæk		Normal håndværker	Særlig rengøring/damprens	RF % spotmåling på stedet	Fugtlige vægt i klimaskab	Veje-tørre-veje måling	% TRAMEX- værdi	GANN digits	Betonens alder efter støbning	Tid efter mont. af fugtmembran	Identifikation	CFU	Mycometer-værdi
1	17 A	1	0	1	0	81,6			80	95	18	14	Aspergillus versicolor >100 Penicillium spp. >100	>200		Vækst
2	17 A	1	0	1	0					76	18	14	Aspergillus versicolor >100 Penicillium spp. >50	>150		Vækst
3	20 A	1	0	1	0		95,8		80	96	30	26	Aspergillus versicolor 50 Penicillium spp. >50	>100		Vækst
4	19 A	1	0	1	0					10 5	23	17	Aspergillus sydowii 1 Aspergillus versicolor 11 Chaetomium sp. 3	15		Ingen vækst
5	19 A	1	0	1	0					77	23	17	Aspergillus flavus 1 Aspergillus sydowii 3 Aspergillus versicolor >200 Penicillium sp. 26	>230		Vækst
6	19 A	1	0	1	0					88	23	17	Aspergillus versicolor 17	17		Vækst
7	19 A	1	0	1	0					90	23	17	Aspergillus versicolor 6	6		Vækst
8	19 A	1	0	1	0					66	23	17	Acremonium sp. >50 Aspergillus versicolor 17	>67		Vækst

9	19 B	0	1	0	1	73,0					16	11	Acremonium sp. 6 Aspergillus versicolor 7 Penicillium sp. 1	14	47	
10	19 B	0	1	0	1	77,7					16	11	Aspergillus sydowii 1 Aspergillus versicolor 31 Trichoderma sp. 1	33	330	
11	19 C	0	1	1	0				>7 0	10 5	15	9	Acremonium sp. 5 Aspergillus flavus 12 Aspergillus sydowii >100 Aspergillus versicolor 22 Penicillium spp. >50	>189		Vækst
12	19 C	0	1	1	0				>7 5	11 0	15	9	Alternaria sp. 1 Cladosporium sp. 4 Aspergillus sydowii 20 Aspergillus versicolor >50 Penicillium spp. 22 Stachybotrys sp. 1	>98		Vækst
13	19 C	0	1	1	0				>7 5	10 5	15	9	Aspergillus ochraceus >50 Aspergillus sydowii 25 Aspergillus versicolor >100 Penicillium spp. 20 Tritirachium sp. 5	>200		Vækst
14	19 C	0	1	1	0				>8 0	10 0	15	9	Arthrinium sp. 2 Aspergillus niger 3 Aspergillus tamarii 2 Aspergillus versicolor >100 Chaetomium sp.2 Fusarium sp.1 Penicillium spp. 25	>135		Vækst
15	20 B	1	0	1	0					12 2	~1 2	~7	Acremonium sp. 2 Aspergillus versicolor >200 Penicillium spp.21	>223		Vækst
16	20 B	1	0	1	0					11 6	~1 2	~7	Aspergillus niger 3 Aspergillus versicolor >200 Penicillium spp.9	>212		Vækst
17	20 B	1	0	1	0					98	~1 2	~7	Aspergillus sydowii >100 Aspergillus versicolor >100	>200		Vækst
18	20 B	1	0	1	0					10 5	~1 2	~7	Aspergillus sydowii >50 Aspergillus versicolor >100 Fusarium sp.3	>153		Vækst
19	19 D	1	0	1	0					96	22	17	Aspergillus versicolor >100 Cladosporium sp.12 Stachybotrys sp.4	>116	1101	
20	19 D	1	0	1	0					91	22	17	Aspergillus versicolor 32 Penicillium spp.3 Stachybotrys sp.1	36	1542	
21	19 D	1	0	1	0					10 1	22	17	Aspergillus versicolor >75 Cladosporium sp. 2 Penicillium spp. 22 Ulocladium sp. 1	>100	988	

22	19 D	1	0	1	0					10 6	22	17	Aspergillus versicolor >150 Ulocladium sp. 3	>153	881	
23	19 D	1	0	1	0					10 5	22	17	Aspergillus versicolor >200 Penicillium spp. 3	>203	502	
24	20 C	0	1	1	0					88	21	11	Penicillium spp. >100	>100		Vækst
25	20 C	0	1	1	0					86	21	11	Penicillium spp. >150	>150		Vækst
26	20 D	0	1	1	0		94,4						Aspergillus versicolor >200	>200		Vækst
27	20 D	0	1	1	0		93,2						Aspergillus versicolor >150	>150		Vækst
28	20 D	0	1	1	0		92,2						Aspergillus versicolor >200	>200		Vækst
29	20 D	0	1	1	0		90,0						Aspergillus versicolor >200	>200		Vækst
30	20 E	0	1	1	0		97,3		10 0	14 3	8	4	Aspergillus versicolor >50 Penicillium spp. 7	>57		Vækst
31	19 E	0	1	1	0					12 1	15	7	Aspergillus versicolor 10 Penicillium spp. 20	30		Vækst
32	19 E	0	1	1	0					67,	15	7	Acremonium strictum 15 Penicillium spp. 14	29		Vækst
33	19 E	0	1	1	0					96	15	7	Penicillium spp. 3	3		Ingen vækst
34	19 E	0	1	1	0		79,0			10 0	15	7	Penicillium spp. > 100	>100		Vækst
35	19 E	0	1	1	0		95,1			13 3	15	7	Acremonium strictum 15 Aspergillus versicolor 45 Penicillium spp. 35	95		Vækst
36	19 E	0	1	1	0					82	15	7	Aspergillus versicolor 40 Penicillium spp. 22	62		Vækst
37	19 E	0	1	1	0					98	15	7	Aspergillus versicolor >50 Penicillium spp. 50	>100		Vækst
38	19 E	0	1	1	0		100			11 1	15	7	Penicillium spp. 100	100		Vækst
39	19 E	0	1	1	0					67	15	7	Penicillium spp. 11	11		Ingen vækst
40	17 B	1	0	1	0					12 6	18	12	Aspergillus versicolor >150 Penicillium spp. 30	>180		Vækst

41	17 B	1	0	1	0					12 7	18	12	Aspergillus versicolor 19 Penicillium spp. 30 Cladosporium spp. 2 Gær 5	56		Vækst
42	17 B	1	0	1	0					12 3	18	12	Aspergillus versicolor 7 Chaetomium sp. 1 Cladosporium spp. 2 Penicillium sp. 1	11		Vækst
43	17 C	1	0	1	0					12 0	12	8	Aspergillus versicolor >50 Gær >50 Penicillium spp. 50 Tricoderma spp. >10	>160		Vækst
44	17 C	1	0	1	0					12 5	12	8	Aspergillus versicolor 7 Chaetomium sp. 1 Cladosporium spp. 2 Penicillium spp. 15	25		Vækst
45	17 C	1	0	1	0					11 2	12	8	Alternaria spp. 2 Aspergillus versicolor 35 Chaetomium sp. 1 Penicillium spp. 50	88		Vækst
46	17 D	0	1	0	1		76			90	23	13	Penicillium spp. 6	6		Vækst
47	17 D	0	1	0	1		73			95	23	13	Chaetomium spp. 2 Cladosporium sp. 1	3		Vækst
48	17 D	0	1	0	1		78			12 0	23	13	Aspergillus versicolor 11 Penicillium sp. 1	12		Vækst
49	17 D	0	1	0	1		80				23	13	Chaetomium spp. 7 Cladosporium sp. 11	18		Vækst
50	17 E	0	1	1	0					10 4	23	11	Aspergillus versicolor 18 Cladosporium sp. 1 Penicillium spp. 12 Rhodotorula gær 1 Sterilt mycelium 1	33		Vækst
51	17 E	0	1	1	0					11 4	23	11	Aspergillus versicolor 40	40		Vækst
52	17 E	0	1	1	0					10 6	23	11	Aspergillus versicolor >50	>50		Vækst
53	18 A	1	0	1	0		6,6				22	15	Aspergillus flavus 11 Aspergillus versicolor >50 Penicillium spp. 5	>66	398	
54	18 A	1	0	1	0		6,1				22	15	Aspergillus flavus 2 Aspergillus versicolor >100	>102	555	
55	18 A	1	0	1	0		5,8				22	15	Aspergillus versicolor 12 Cladosporium sp. 1 Ulocladium chartarum 1	14	244	
56	18 B	1	0	1	0					10 1	14	10	Aspergillus versicolor >100 Cladosporium spp. 8 Penicillium spp. 12	>120		Vækst
57	18 B	1	0	1	0					92	14	10	Aspergillus versicolor 30 Gær >50 Penicillium spp. 12	>92		Vækst

58	18 B	0	1	1	0					78	16	10	Aspergillus versicolor >150 Cladosporium spp. 5 Penicillium spp. 25	>180		Vækst
59	18 B	0	1	1	0					81	16	10	Aspergillus niger 2 Aspergillus versicolor 50 Cladosporium spp. 50 Penicillium spp. 35	137	44	Vækst
60	18 B	1	0	1	0					10 8	14	9	Acremonium strictum >50	>50		Vækst
61	18 B	0	1	1	0					10 0	16	9	Penicillium spp. >75 Mucor sp. 1	>76	683	
62	18 C	1	0	1	0		88,8			10 5	14	8	Penicillium spp. >100	>100		Vækst
63	18 C	0	1	1	0		75,5			90	16	8	Penicillium spp. 45 Ulocladium spp. 4	49		Vækst
64	18 C	1	0	1	0		91,1			11 0	14	8	Aspergillus versicolor >50 Penicillium spp. 50	>100		Vækst
65	17 F	1	0	1	0					11 5	9	4	Alternaria alternata 1 Chaetomium globosum 1 Cladosporium spp. 6 Penicillium spp. 11	19	88	
66	17 F	1	0	1	0					11 0	9	4	Aspergillus versicolor 41 Penicillium spp 25	66	878	
67	17 F	1	0	1	0					11 5	9	4	Aspergillus versicolor >150 Chaetomium globosum 3 Penicillium spp. 25	>178	441	
68	20 F	1	0	1	0		>98	7,2		13 0	12	8	Acremonium sp. 1 Aspergillus flavus 9 Aspergillus sydowii >50 Aspergillus versicolor 21 Penicillium spp. 8	>89		Vækst
69	20 F	1	0	1	0		95,5	5,6		11 0	12	8	Aspergillus flavus >50 Aspergillus sydowii 2 Aspergillus versicolor 34 Penicillium spp. >50	>136		Vækst
70	20 G	1	0	1	0					95	22	18	Aspergillus ochraceus 11 Aspergillus versicolor >100 Chaetomium globosum 1 Doratomyces sp. 2	>114		Vækst
71	20 G	1	0	1	0					10 0	22	18	Aspergillus versicolor >150 Chaetomium globosum 2 Penicillium spp. 50 Cladosporium spp. 3	>205		Vækst
72	18 D	1	0	1	0					88	11	3	Aspergillus ochraceus 12 Aspergillus versicolor >100 Penicillium spp. 30 Stachybotrys chartarum 1	>143		Vækst
73	18 D	1	0	1	0					91	11	3	Aspergillus versicolor 50 Penicillium spp. 8 Stachybotrys chartarum 1	59		Vækst

SUM	0	0	0	0					Betonalder før udlægning af fugtmembran					
									4-6 mdr	7-9 mdr	10-12 mdr			
	0	0	0	0					44	16	9	7214		
Antal CFU (gns)	109	87	106	14					114	65	46	99		
%									0,6463,77	23,19	13,04			

CFU (colony forming units) =spiringsdygtige skimmelsvampeenheder (primært sporer).

Tapeaftryk og materialeprøve. Eventuel forekomst af skimmelsvampevækst overføres til tapeaftryk, som efterfølgende analyseres ved lysmikroskopi. Forekomsten af hyfer, mycelium og sporestande indikerer tilstedeværelsen af skimmelsvampevækst. Der mikroskoperes direkte på materialeprøver.

Resultaterne fra aftryksanalyser udtaget i støv inddeles i følgende kategorier (iht. SBI-anvisning 274):

0 - <10 cfu Lav forekomst af spiringsdygtige skimmelsvampesporer

10 – 50 cfu Middel forekomst af spiringsdygtige skimmelsvampesporer

50-100 cfu Høj forekomst af spiringsdygtige skimmelsvampesporer

>100 cfu Meget høj forekomst af spiringsdygtige skimmelsvampesporer

Resultaterne fra Mycometer testen inddeles i følgende kategorier (iflg. producenten):

A Mycometer tal mellem 0-25 Niveauet af skimmelsvamp ikke over normalt baggrundsniveau

B Mycometer tal mellem 26-450 Niveauet af skimmelsvamp er over normalt baggrundsniveau

C Mycometer tal over 450 Målingen viser vækst af skimmelsvamp

CASESTUDIE VS. VIDENSKABELIGE STUDIER

Iht. til SBI-Anvisning 274 er der kendskab til cirka 100 forskellige skimmelsvampearter som trives i bygninger og indbo. Af disse er der cirka 15-20 arter der forekommer jævnligt (Thrane, et al., 2020, s. 124). I Tabel 11 sammenlignes de dominerende svampearter som er fundet ved casestudiet med resultater af laboratorieforsøg fra hhv. (Sedlbauer, 2000) og (Andersen, et al., 2011).

I Tabel 11 er fem skimmelsvampearter fremhævet med **fed** skrift, da disse anses som biologisk betydende. Det drejer sig om arterne *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus versicolor*, *Stachybotrys chartarum* og slægten *Chaetomium* (særligt arten *globosum*). Skimmelsvampearterne *Aspergillus versicolor*, *Stachybotrys chartarum* og *Chaetomium globosum* er kendt for at være særligt biologisk aktive ift. afgivelse af indeklimagenerende VOC'ere og toksiner. Den øgede bevågenhed overfor arterne *Aspergillus fumigatus* og *Aspergillus niger* skyldes at de tilhører gruppen af humant patogene svampe, hvilket betyder at de har mulighed for at inficere mennesker hvis personen har et svækket immunforsvar.

Skimmelsvampe som har en vækstpræference for beton og/eller foretrækker alkaliske vækstmiljøer, defineres hér som pH >9. De typisk bygningsrelaterede svampe iht. SBI 274 fremgår af første "Kilde"-kolonne i Tabel 11.

Tabel 11, Hyppigt forekommende fugtskadeindikatorer sammenlignet med skimmelsvampearter som trives ved høj pH-tolerance og/eller har betonpræference iht. videnskabelige studier og casestudiet.

Sammenligning af typisk bygningsrelaterede skimmelsvampe, pH-range, kendt betonpræference og resultater fra casestudie						
Art/slægt:	Kilde:					Casestudie****
	Thrane*	Sedlbauer**			Andersen***	
	Hyppigt forekommende fugtskadeindikatorer	Min	Opt	Max	Betonpræference	Dominans/subdominans eller biologisk betydende på V8-agar
<i>Acremonium strictum</i>	JA					JA (sporadisk)
<i>Alternaria alternata</i>	JA					
<i>Aspergillus flavus</i>		2,5	7,5	>10	JA	JA (hyppigt)
<i>Aspergillus fumigatus</i>	JA				JA	
<i>Aspergillus glaucus</i>	JA					
<i>Aspergillus mellus</i>					JA	
<i>Aspergillus niger</i>	JA	1,5	-	9,8	JA	JA (sjældent)
<i>Aspergillus ochraceus</i>		3	6,5	10	JA	JA (sporadisk)
<i>Aspergillus sydowii</i>						JA (sporadisk)
<i>Aspergillus versicolor</i>	JA				JA	JA (meget hyppigt)
<i>Aspergillus wenti</i>					JA	
<i>Aspergillus parasiticus</i>		2	6,5	10,5		
<i>Chaetomium globosum</i>	JA					JA (sporadisk)
<i>Chaetomium spp.</i>					JA	JA (sporadisk)
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	JA					
<i>Cladosporium herbarum</i>	JA					
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>	JA					
<i>Fusarium oxysporum</i>		2	-	9		
<i>Mucor racemosus</i>					JA	
<i>Mucor plumbeus</i>	JA					
<i>Mucor spinosus</i>					JA	
<i>Penicillium chrysogenum</i>	JA					
<i>Penicillium citrinum</i>		2	5,5	10		
<i>Penicillium cyclopium</i>		2	-	10		
<i>Penicillium italicum</i>		1,5	-	9,8		
<i>Penicillium spp.</i>					JA	JA (meget hyppigt)
<i>Rhizopus stolonifer</i>	JA					
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i> *****	JA					
<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>		-	9,5	-	JA	
<i>Stachybotrys chartarum</i>	JA					JA (sjældent)
<i>Trichoderma viride</i>	JA					
<i>Ulocladium chartarum</i>	JA					
<i>Wallemia sebi</i>	JA					

* (Thrane, et al., 2020, s. tabel 13)

** (Sedlbauer, 2000, s. 165, tabel 4)

*** (Andersen, et al., 2011, s. 4183, figur 1)

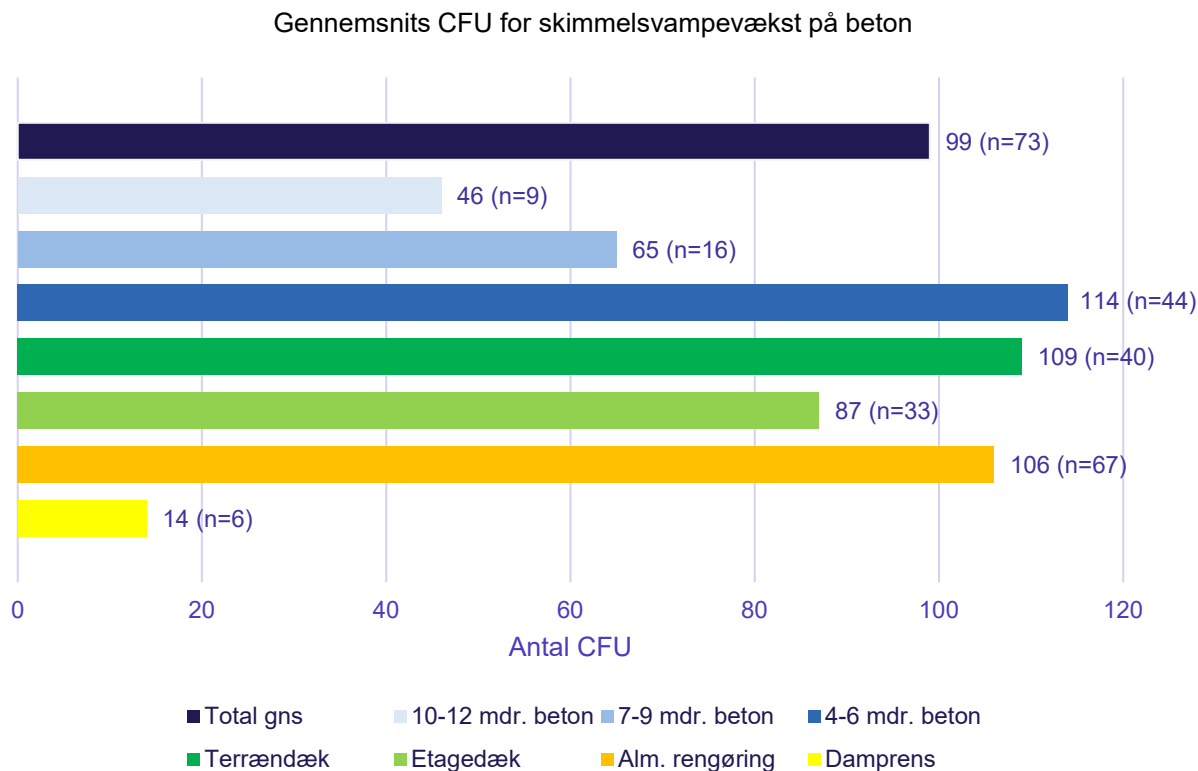
**** casestudie fra OBH Rådgivende Ingeniører A/S, se Tabel 10

***** og andre Gær-svampe

For særligt én skimmelsvampeslægt og to specifikke skimmelsvampearter vurderes der at være god overensstemmelse mellem laboratorieforsøg fra videnskabelige studier og resultater fra casestudiet – disse er markeret med rødt i Tabel 11. Der er tale om slægten *Penicillium* og arterne *Aspergillus flavus* og *Aspergillus versicolor*. Det øvre pH-spænd er for *Aspergillus flavus* opgivet til "pH >10", mens der mangler informationer om både *Aspergillus versicolor* og hele *Penicillium*-slægten, men det må formodes at disse har et lignende pH-interval - dvs. op til eller måske større end pH 10.

Overordnet set synes der at være god overensstemmelse mellem de fremherskende arter og slægter fra casestudiet til laboratorieresultater fra de videnskabelige studier. I den forbindelse skal det bemærkes, at flere af de oplistede skimmelsvampearter med høj pH-tolerance (≥ 9 pH) ikke er direkte bygningsrelaterede. Det lader sig bl.a. *Penicillium citrinum*, *Penicillium italicum* (blue mold) og *Penicillium cyclopium*, som typisk angriber citrusfrugter (Frisvad & Samson, 2004). Trods casestudiets hyppige frekvens af *Aspergillus flavus* bemærkes, at denne ikke fremgår af SBI-274 som værende typisk bygningsrelateret. *Aspergillus flavus* er desuden ikke en del af det normale screeningspanel i de fleste kommercielle DNA-analyser, og dens andel vil derfor alene fremgå af en større totalsum på slægtsniveau.

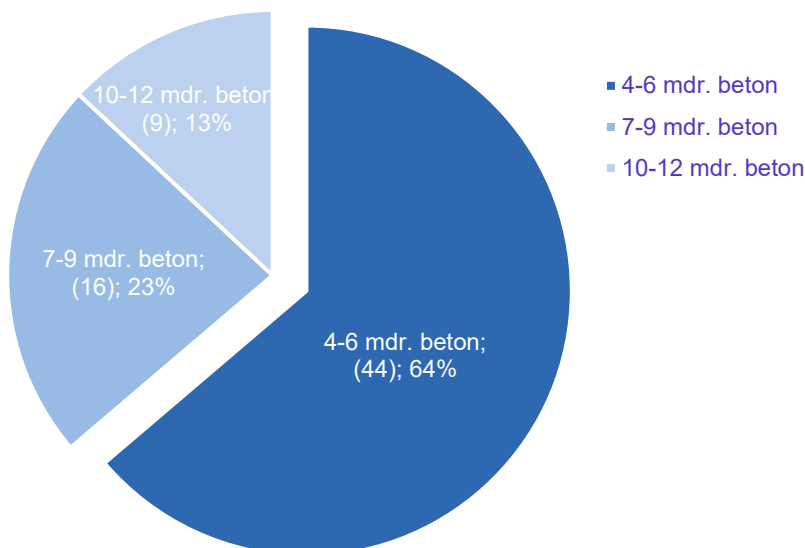
Af casestudiet ses at antal CFU er markant lavere på overflader som forinden har gennemgået en særlig afrensning, enten ved brug af kemi eller ved damprens, se Figur 32. Overfladebesmudsning må derfor vurderes at have en væsentlig betydning for vækstintensiteten, hvilket harmonerer med allerede kendt viden om vigtigheden i at indbygge rene materialer. Endvidere ses at antal CFU falder i takt med betonens alder i forhold til udlægning af fugtmembran – fra 114 CFU for 4-6 mdr. beton til 46 CFU på 10-12 mdr. beton.



Figur 32, Gennemsnitlig antal CFU på tværs af svampe. Sammenligning mellem betonalder, konstruktionsdel og rengøringsniveau. Konfidens: (n = antal prøver fra casestudie).

Af casestudiet ses også en tendens til at betonens alder på tidspunkt for indbygning af fugtmembran er afgørende for vækstrisikoen. Af Figur 33 ses at 64 % af de prøveresultater som har påvist skimmelsvampevækst, stammer fra beton med en "indbygningsalder" på 4-6 måneder.

Andel af prøver fra casestudie grupperet efter betonalder



Figur 33, betonens "indbygningsalder" på prøveudtagningstidspunktet fra. (x)= antal og (%)= procentuel andel af casestudiet.

For den overvejende del af sagerne kan der på prøveudtagningstidspunktet registreres fugt som er større en 75 % $RF_{kritisk}$, og for en mindre del af sagerne er fugtniveauet fundet større end det for sagen fastsatte fugtkriterium. Dette er bedømt enten på baggrund af vejledende måleværdier udført med kapacitive og dielektriske måleapparater eller ved absolutte fugtværdier. Fugtmålinger udført på prøveudtagningstidspunktet er i sagens natur ikke retvisende for fugtniveauet på indbygnings-tidspunktet. Fugtmålingerne kan dog bruges som mål for minimums fugtniveauet på indbygnings-tidspunktet. Omfordeling af fugt vil desuden være påvirket af eventuel tilstedeværelse af gulvvarme, varmeslangernes placering og ikke mindst effekten/fremløbstemperaturen. For terrændæk vurderes at det nedadrettede damptryk medfører et øget affugtningspotentiale sammenlignet med etagedæk (difference rum-jordtemperatur versus rum-rumtemperatur). Bemærk at ligevægt i terræn- og særligt etagedæk først indtræffer efter flere år (Andersen, Christensen, & Nielsen, 2003, s. 72).

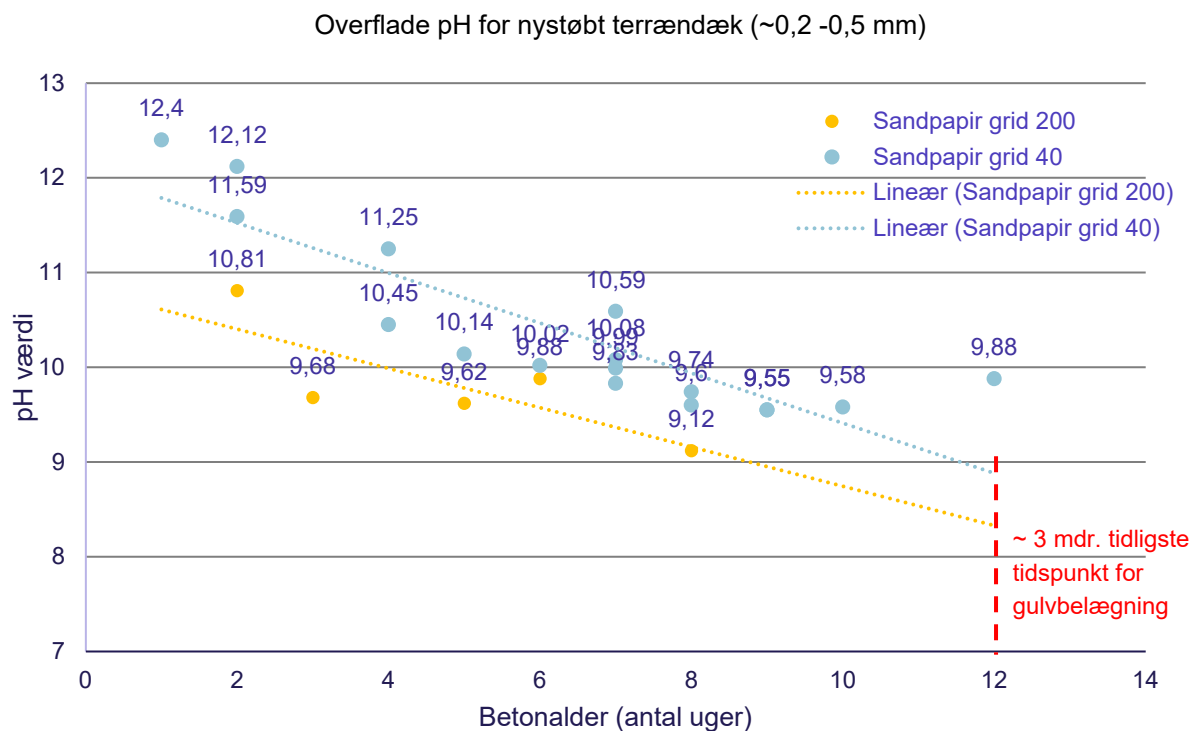
PH-VÆRDI – FELTFORSØG

MÅLERESULTATER

Ændring af overflade-pH for beton er bedømt ud fra konkrete spotmålinger fra byggepladser i Jylland. Der er udelukkende udtaget prøver fra terrændæk i enfamiliehuse, anslået betonstyrke: P25MPa.

De 21 spotmålinger som er vist på Figur 34 viser en tydelig tendens til at pH-værdien i betonoverfladen (0,2-0,5 mm) falder gradvist fra støbetidspunktet og 12 uger frem. Der er tale om et fald i pH-værdi fra ~12,5 til mellem 10 og 9 pH. Det betyder at der på tidspunkt for udlægning af membran er en pH-værdi som tillader vækst af bestemte skimmelsvampearter. De første spotmålinger

blev udført med mellemfint sandpapir i kornstørrelse 200, hvilket medførte en utilsigtet fortynding af resultaterne, se gule målepositioner på Figur 34. Af Figur 35 ses at betonoverfladens pH-værdi er faldet til < 9,5 pH på 12. uger, hvilket muliggør skimmelsvampevækst når fugtmembranen udlægges.



Figur 34, Isopleth viser spotmålinger af slibestøv fra betonoverflade. Med rødt angives tidligste tidspunkt for udlægning af fugtmembran og gulvbelægning iht. til standard byggeproces.

DISKUSSION

BEREGNING AF AFFUGTNINGSTIDER

Udtørring af beton er per definition tidskrævende (Nielsen & Olsen, 2006, s. 5). Et lavere fugtkriterium for nystøbt beton vil resultere i længere affugtningstider under forudsætning af, at der anvendes tilsvarende betontyper, affugtningsmetoder, miljøbetingelser osv. "Standard affugtningsscenariet" for et enfamilieshus med traditionelt støbt terrændæk af beton med v/c-tal 0,67 som ønskes affugtet til 90 % RF, kan fastsættes til cirka 90 dage ved en række forsimplede antagelser (Herholdt, et al., 1985, s. 197, Tabel 3.4-4). I nærværende rapport er konkrete affugtningstider vurderet ved hjælp af tre forskellige beregningsmetoder, jf. BYG-ERFA modellen, TorkaS 3.2 og WUFI® Pro 6.5.

Beregningerne tager udgangspunkt i en "standard" byggeperiode på cirka 180 dage, jf. Tabel 7. Beregningerne har vist store udsving i resultater, hvortil begrænsninger i TorkaS programindstillinger har vist sig at være det væsentligste. I TorkaS er der hverken mulighed for at tilvælge SSC-betoner eller pulverblandinger, hvorfor betontyperne ikke direkte kan sammenlignes med BYG-ERFA-modelens danske betontyper. I TorkaS er det desuden ikke muligt at vælge et vandindhold på mindre end 160 kg/m³. Samlet set vurderes beregningsresultater fra TorkaS ikke at være retvisende for affugtningstider under danske forhold og med danske betontyper.

Ved beregning af affugtningstider for fire typisk anvendte betontyper ses, med BYG-ERFA-modellen, at fugtkriterium på 85 % RF opnås efter 32 til 235 dage alt afhængig af betontypen. Med WUFI har det været muligt at regne med de dynamiske klimafaktorer (fase A, B og C) for hvert tidsskidt, hvorfor resultaterne herfra vises som den opnåede affugtningseffekt efter et "standard" tre-måneders afhærdnings- og affugtningsforløb. Kun en af fire anvendte betontyper, "MASEA Concrete", sikrede et fugtkriterium på maksimalt 85 % RF efter tre måneder. De resterende tre betontyper (fra Fraunhofer) ligger mellem 86 og 91 % RF ved sommerberegning og mellem 87 og 92 % RF for vinterberegninger. Affugtningseffekten synes med andre ord at være upåvirket af årstiden, og den højeste betonstyrke udviste størst affugtningseffekt.

Som det ses af beregningerne i Figur 26 til Figur 29, kan affugtningsperioden mere end halveres når der anvendes selvudtørrende betoner. Betegnelsen selvudtørrende beton bruges om betoner hvor v/c-tallet er så lavt at cementen udnyttes både som bindemiddel for at give betonen styrke og som en kemisk fugtabsorber. Det betyder at der ikke forekommer frit vand i porerne efter hydratisering. Selvudtørrende betoner er defineret som betoner med et lavt v/c-tal på 0,37 (maks.: 0,40) og anvendelse af cementtypen CEM I, dvs. min. 95 % Portland cement. Reduceret fugtudveksling mellem beton og luft i hydratiseringsprocessen vurderes at være irrelevant for en almindelig byggeproces hvor bygningen alligevel henstår ubeskyttet mod vejrlig. Betonens større kemisk bundne fugtandel er derimod meget hensigtsmæssig, eftersom den sikrer en generel lavere porefugt. Erfaringer viser, at selv-udtørrende betoner i praksis er næsten upåvirkede af nedbør (Dansk Beton, Fabrikksbetongruppen, 2013, s. 8). Man skal være opmærksom på at selvudtørrende betoner typisk får en unødvendig høj trykstyrke, og at man i højere grad skal sikre mod tidligt udtøringsvind og plastisk svind ved passende afdækning. Afdækning i hydratiseringsfasen er generelt nødvendig i forhold til styrkeudvikling i alle betontype.

CASESTUDIE - SKIMMELSVAMPEVÆKST PÅ BETON

Som der fremgår af casestudiet i Tabel 10, kan der i 21 konkrete sager konstateres skimmelsvampevækst på indbyggede betonoverflader efter blot få måneders indbygning. Dette til trods for en forventet høj pH-værdi på betonoverfladen. Flere skimmelsvampearter kan, for at sikre deres egen overlevelse, ændre deres mikromiljø, således der også kan ske vækst på højalkaliske betonoverflader (Keton, et al., 2019, s. 1). Hvorvidt det er betonens indbygningsfugt, pH-værdien eller proton-pumpe-effekten hos disse særlige skimmelsvampearter vides ikke, mest sandsynligt er, at der er tale om en kombination af disse faktorer. Casestudiet viser veritabelt, at der ofte kan konstateres skimmelsvampevækst på nystøbte betonoverflader. I prioriteret rækkefølge er der konstateret vækst af; *Aspergillus versicolor*, *Penicillium spp.*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus sydowii*, *Aspergillus ochraceus* og *Chaetomium globosum*.

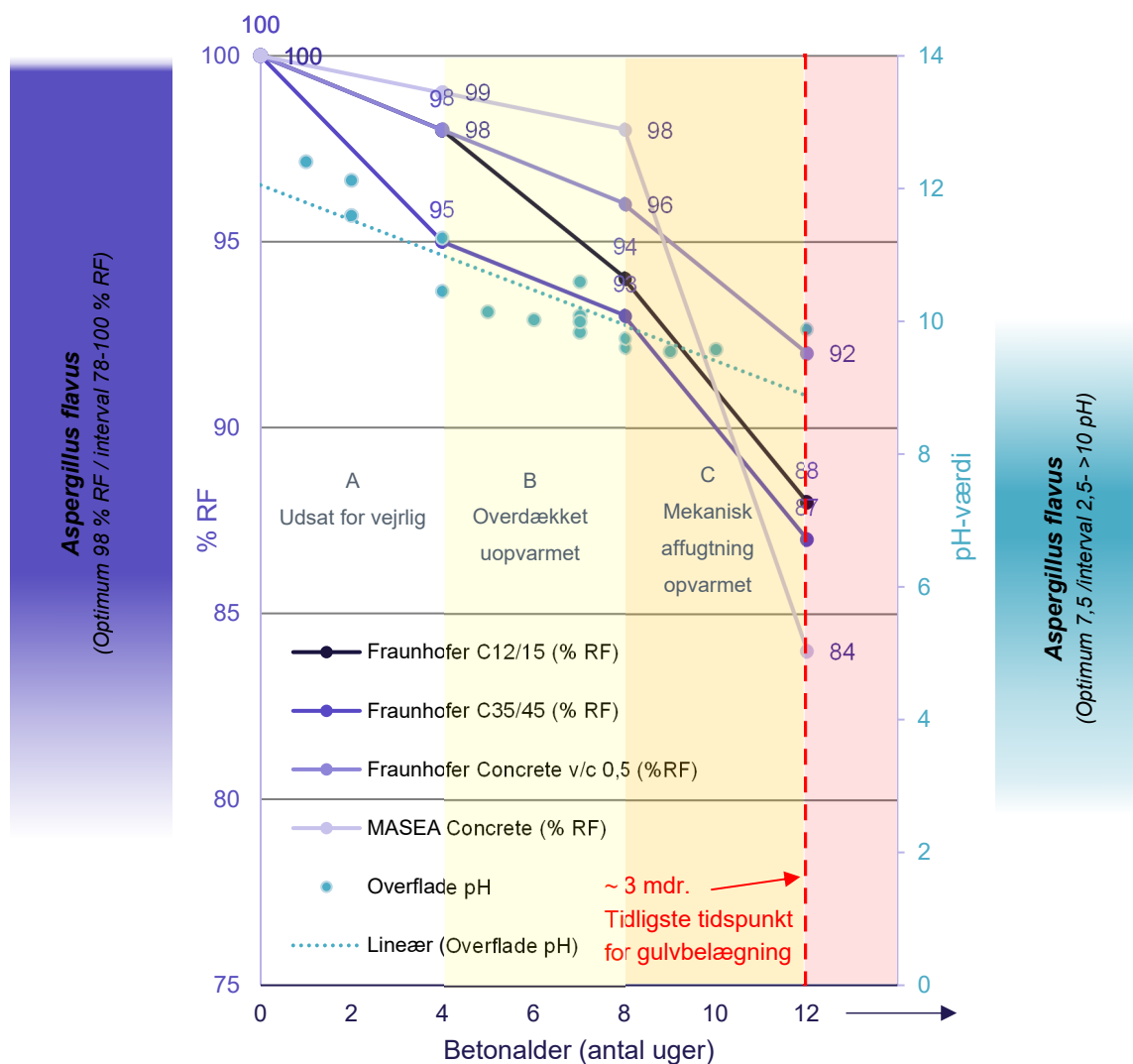
Eftersom der er tale om svampeidentifikation ved mikroskopering af spiringsdygtige sporer på dyrkningsmedie, vil der uundgåeligt være risiko for at visse arter enten over- eller underestimeres. Når skimmelsvampe materiale fra forskellige skimmelsvampearter spirer på et vækstmedium, kan der opstå en vis konkurrence om pladsen, en slags biologisk krig. I praksis betyder det, at visse arter som eksempelvis *Chaetomium globosum* typisk underestimeres, eftersom andre hurtigt-spirende arter har vokset hen over pladen og derved hindret identifikation. Overordnet set vurderes, at der er overensstemmelse mellem studier som viser skimmelsvampearter med betonpræference og analyseresultater fra casestudiet. Det skal i den forbindelse bemærkes, at der kun er begrænset viden om pH-intervallet for de skimmelsvampearter som typisk findes på betonoverflader og defineres som typiske fugtskade-indikatorer i bygninger (Thrane, et al., 2020, s. 121-148).

Casestudiet viser også at der er en tendens til at gennemsnits CFU for prøver udtaget på terrændæk er højere end prøver udtaget på etagedæk. Dette kan eksempelvis tilskrives besmudsning, pga. reduceret trafik i bygningens højde og/eller en hyppigere forekomst af gulvvarme i terrændæk, som derved skaber særligt gunstige vækstbetingelser - når ellers fugtforholdene tillader. Andelen af sager hvor der var kendskab til en forudgående kemisk afrensning eller damprens af overfladen var beskeden (6 stk.), men af disse ses en markant reduktion i antallet af spiringsdygtige skimmelsvampesporer og fragmenter, fra 106 til 14 CFU. Det tyder derfor på at rengøringsniveauet spiller en stor rolle i forhold til udviklingen af skimmelsvampevækst.

Temperaturbetingelser for vækst er ikke inddraget som et betydende parameter, eftersom samtlige bygningsrelaterede skimmelsvampearter har et temperaturinterval som tillader vækst ved almindelig rumtemperatur. Den specifikke skimmelsvampeart *Aspergillus flavus* har en optimumtemperatur for mycelievækst på 40 °C og for spiring af sporer er optimum 30 °C. Det er derfor sandsynligt, at tilstedeværelsen af gulvvarme vil fremme vækst af netop *Aspergillus flavus* eftersom fremløbs-temperatur for gulvvarme typisk indreguleres til mellem 28 og 34 °C på gulvets underside - altså der hvor skimmelvæksten vil ske (Brandt, 2007, s. 2).

Den specifikke skimmelsvampeart *Aspergillus flavus* er udvalgt til nærmere risikovurdering eftersom det er den eneste beton-præference-skimmelsvamp hvor pH-intervallet er kendt (Sedlbauer, 2000, s. tabel 4). Resultater af fugtsimuleringer i WUFI er sammenholdt med målinger af overflade-pH og konkrete vækstbetingelser for *Aspergillus flavus*. Risikoperioden efter udlægning af en fugtmembran er vist med rød markering på Figur 35.

Affugtningsforløb, overflade pH samt pH- og fugtinterval for *Aspergillus flavus*



Figur 35, Affugtningsforløb for fire betontyper (WUFI), målinger af overflade-pH og vækstbetingelser for *Aspergillus flavus*. Byggeperiodens fase A, B, C er angivet med baggrundsfarverne, hvid, gul og orange. Rød stiple linje angiver tidligste tidspunkt for udlægning af gulvmembran (iht. standard byggeproces defineret i Tabel 7) og rød baggrundsfarve indikerer at der er vækstbetingelser for *Aspergillus flavus* efter indbygning.

PH VÆRDI

Feltforsøget har vist at pH-værdien i den nystøbte betonoverflade falder gradvist over tid. Målingerne i de øvre 0,2- 0,5 mm af betonoverfladen viser et fald i pH-værdi fra ~12,5 til ~9,5 efter 12 uger. Da karbonatisering af beton er en irreversibel proces (Vogler, et al., 2020, s. 8), må der efter udlægning af en fugtmembran forventes at være *steady-state conditions* i betonoverfladens pH-niveau. Det skal tages i betragtning at den udførte målemetode hverken er standardiseret eller tidligere testet under danske forhold, hvorfor måleresultaterne er forbundet med en vis usikkerhed.

De enkelte måleresultater er forsøgt valideret ved flere på hinanden gentagne spotmålinger samt ved laboratorieforsøg, hvor en ensartet mængde slibestøv er afvejet i forskellige doser for at bedømme fortyndingseffekten i forhold til måleresultatet. Ved gentagne spotmålinger ses en afvigelse på $\pm 3\%$ af den aflæste pH-værdi og ved fortyndingsforsøg med deioniseret vand vs. slibestøv ses kun en mindre fejlvisning. Ved en afmålt prøvemængde mellem 0,05 og 0,1 g var måleafvigelsen beskedne $\pm 1\%$.

Det er normalt, at betongulvenes overflader slibes cirka 5- 20 dage efter støbning. Denne slibning har til formål dels at fjerne eventuelle uønskede grater og højderygge og samtidig "åbne" overfladens porestruktur (ved fjernelse af cementpasta fra betonoverfladen), hvorved affugtningspotentialet fra overfladen øges. I tilgift til denne praksis vil overfladens modtagelighed over for smuds også øges, ligesom der er risiko for at det øgede overfladeareal (på mikro-niveau) øger optaget af atmosfærisk kuldioxid og dermed øget karbonatisering.

Hertil kommer effekten af tilført regnvand som qua en gradvis forsurening gennem de seneste årtier (bl.a. pga. menneskeskabte svovl- og kvælstofforbindelser) har en pH-værdi på cirka 4,2 (Johnsen, 2013). Det kan desuden ikke afvises, at øget brug af det mineralsk fillermateriale "mikrosilika" i betoner kan være en medvirkende årsag til pH reduktion i betoner (Nielsen & Olsen, 2006, s. 25).

KONKLUSION

FAKTORER SOM BESTEMMER VÆKSTRISIKO AF SKIMMEL PÅ BETONOVERFLADER

Traditionelle byggeprincipper, øget tidspres, manglende fugtbevågenhed samt et generelt øget fokus på indeklima bevirker at problemstillingen med skjult skimmelsvampevækst på nystøbte betonoverflader er højaktuelt. Støvsediment på en vandret betonoverflade er uundgåelig, ligesom det normale temperaturinterval i bygninger er tæt på optimum for de fleste skimmelsvampearter. De tre væsentligste risikofaktorer for vækstinitiering er vist med Figur 36 ved kritisk fugtniveau på 0,75 a_w . Rød farve viser at der er en vækstrisiko, grøn farve viser at der ikke er nogen vækstrisiko, og gul farve er grænsefladerne herimellem.

Vandaktivitet (a_w)



Overflade-pH



Overfladebesmudsning



Figur 36, viser de tre væsentligste risikofaktorer for skimmelsvampevækst på nystøbte betonoverflader, hhv. indbygningsfugt, pH-værdi og besmudsning. Der kan formentlig tolereres højere besmudsning ved samtidig høj pH og vice versa. Tilstedeværelsens af fugt (>75 % RF) er dog altid en forudsætning for skimmelsvampevækst.

I forhold til indbygningsfugt gælder, jo højere vandaktivitet jo højere risiko for vækst. Den alkaliske væksthæmmer i form af høj pH-værdi i betonoverfladen reduceres i byggeperioden til et niveau som tillader vækst af skimmelsvampe på indbygningstidspunktet. Øget besmudsning vil forværre skadesbilledet i tilfælde hvor både fugt og pH-værdi tillader skimmelsvampevækst. I "risikoeksemplet" fra Figur 36 er det ikke taget i betragtning at betonoverfladens fysisk-kemiske egenskaber kan ændres, eksempelvis i form af påført biocid, nanocoating eller anden form for manipulering som ændrer overfladens biomodtagelighed.

SKIMMELSVAMPEVÆKST OG PH

Følgende skimmelsvampearter har beton-præference; *Aspergillus versicolor*, *Penicillium spp.*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus sydowii*, *Aspergillus ochraceus* og *Chaetomium globosum*. Casestudiet viser at der ofte kan konstateres skimmelsvampevækst på betondæksoverflade under fugtspærre af banevare. Der er tale om skimmelsvampevækst som er registreret efter byggeriets aflevering og optil 3 år efter. Den udvalgte sagsportefølje er fra periode 2017-2020. For den overvejende del af sagerne kan der på prøveudtagningstidspunktet registreres fugt som er større en 75 % ligevægtsfugt og for andre er fugtniveauet fundet større end det fastsatte fugtkriterium. Dette er bedømt enten på baggrund af vejledende måleværdier udført med capacitive- og dielektriske måleapparater eller ved absolutte fugtværdier. Der er alene udvalgt sager hvor betonoverfalden visuelt fremstod rengjort, hvorfor indbygget fugt og/eller utilstrækkelig høj pH-værdi vurderes at være den/de primære årsager til den

konstaterede skimmelsvampevækst. Af relevans for skimmelsvampene er alene betonens overflade, eftersom skimmelsvampen alene vil kunne trives i de øvre 0-3 mm (for nystøbt beton) og vil kunne trænge gennem porer ned til 0,3 µm.

Målinger af overflade-pH har sandsynliggjort at betonoverflader i form af terrændæk på indbygnings-tidspunktet for en fugtmembran har en pH-værdi på mellem 9 og 10. Et pH-interval på mellem 9 og 10 eliminerer **ikke** muligheden for vækst af bestemte skimmelsvampearter. På baggrund af resultatet af casestudiet og kendskabet til skimmelsvampenes proton-pumpe-effekt, kan det ikke afvises, at visse skimmelsvampearter kan trives ved endnu højere pH-værdier, formentlig >10.

FUGTKRITERIER

I et typisk byggeforløb af et enfamilieshus (ukompliceret byggeforløb), går der blot 90 dage fra støbning af terrændæk til gulvmontage. Et typisk anvendt fugtkriterium for betondæk er 85 % RF, jf. udfaldskrav fra gulvleverandører. Nettoudtørringstiden for almindelig P20-MPa-beton til fugtkriterium 85 % RF kan ved beregninger fastsættes til mellem 77 og 670 dage alt afhængig af betontype, klima-betingelser mv., se Figur 27. I praksis vil der således være behov for at anvende betontyper med større andel cement (typisk i form af 3-pulverblandinger), lavere v/c-tal, forceret affugtning (evt. højtemperatursaffugtning og/eller tilsikre en længere affugtningstid.

Præventive overfladeimprægneringer indeholdende fungicid kan have en effekt, men er overordnet set uønsket ud fra substitutionsprincippet. Ved at fjerne størstedelen af tilgængeligt ilt fra betonoverfladen vil skimmelvæksten også kunne hindres – dette sikres ved anvendelse af fugtspærre som smøremembraner i stedet for banevare.

Med nærværende rapport er det sandsynliggjort at alkaliske egenskaber i nystøbt beton kun til en vis grad hæmmer skimmelsvampevækst. Der er ligeledes sandsynliggjort at et stort antal terræn- og etagedæk indbygges med fugtniveauer, som er større end de anbefalede fugtkriterier. Betonens store fugtkapacitet, i kombination med dets store overfladeareal, giver et uforholdsmæssigt stort vækstpotentiale af skimmelsvamp skjult i bygninger.

Med det nye kendskab til betonoverfladens pH-værdi (lavere end forventet) samt muligheden for anvendelse af smøremembraner, gives forslag til nye fugtkriterier for betondæk, se Tabel 12. Bemærk at disse nye fugtkriterier forholder sig specifikt til betonoverfladens pH-værdier og har et særskilt fugtkriterium for smøremembraner. Sidst men ikke mindst så gives der udvidede beføjelser til at en uvildig fugtsagkyndig foretager konkret bedømmelse når der indbygges beton med fugtkriterium > 85 % RF.

Anvendelse af smøremembraner i stedet for traditionelle banevarer er fordyrende, foruden produktprisen er der tale om to arbejdsgange i stedet for én, samt ekstra ventetid i forbindelse med afhærdningen. Hvis entreprenøren i stedet ønsker at nedbringe fugtniveauer på traditionel vis, må der påregnes udgifter enten til uforholdsmæssig længere affugtningsforløb ved brug af traditionelle terrændæksbetoner eller ved anvendelse af betoner med pulvertilslag/-filler og/eller lavere v/c-tal i form af de såkaldte selvudtørrende betoner.

Øget brug af selvudtørrende betoner synes at være det oplagte valg, eftersom det muliggør at de nuværende byggeprincipper i forhold til arbejdsgange og tidsforbrug vil kunne opretholdes. Selvudtørrende betoner er generelt op til 30 % dyrere end en almindelig beton til passivt miljø, såsom P20MPa (Dansk Beton, Fabrikbetongruppen, 2013, s. 4). Ved brug af selvudtørrende betoner skal

der samtidig påregnes ekstra udgifter til afdækning i afhædningsperioden. Eftersom selvudtørrende betoner vil afkorte affugtningsperioden effektivt, vurderes både smøremembranen og den selvudtørrende beton at være oplagte værktøjer til i fremtiden at eliminere muligheden for skjult skimmel-svampevækst. Valget må således bero på en totaløkonomisk afvejning af fordele og ulemper, herunder hensyn til byggeriets fremdrift og materialevalg i øvrigt.

Tabel 12, Forslag til fugtkriterier for gulvbelægning på betondæk baseret på de hidtidige undersøgelsesresultater og tendenser i denne rapport.

Forslag til nye fugtkriterier for terrændæk og etagedæk, herunder også inddragelse af pH-værdier, krav om brug af fugtsagkyndig, særskilt fugtkriterium for smøremembraner og konsekvens af korresponderende byggematerialer			
Beton <i>(maksimale vejledende værdier)</i>			
Bygningsdel		Fugtkriterium	Fugtkriterium i dag****
Limede trægulve	Fugtspærre undlades	65	65
	Massive brædder/stave på en fugtbremsende lim*	65-75	-
	Lamelbrædder på en fugtbremsende lim*	65-85	-
	Fugtspærre af smøremembran eller svejst/fuldklæbet asfaltpap**/banevare*** (terrændæk)	90	-
Svømmende gulve	Fugtspærre undlades	75	75
	Fugtspærre af banevare (overflade pH ≤11)	75	90-95
	Fugtspærre af banevare (overflade pH ≥11)	85	90-95
	Fugtspærre af smøremembran eller svejst/fuldklæbet banevare*** (etagedæk)	85	90-95
	Fugtspærre af smøremembran eller svejst/fuldklæbet banevare*** (terrændæk)	90	90-95
<i>I tilfælde hvor byggematerialer er korresponderende, er det laveste fugtkriterium gældende.</i>			
<i>Inden gulvlægning forudsættes at betonoverflader er rengjorte ved grundig støvsugning og/eller vask/damprens afhængig af besmudsningsgraden.</i>			
<i>Fugtspærre af banevare skal være tilstrækkelig robust til at tåle håndtering på byggepladsen. Generelt anses en PE-folie/polyethylen på 0,20 mm at være tilstrækkelig robust. Hvis der anvendes folier med mindre tykkelse anbefales at de beskyttes af skumplast/foam og/eller at der foreligger dokumentation for tilsvarende robusthed ift. rivestyrke og perforering samt diffusionsmodstand.</i>			
<i>* MS-lim eller SMP-lim, konkret fugtkriterium iht. lim-leverandørens anvisninger (Johansen, 2010, s. 37)</i>			
<i>** SBS-pap, såsom Icopal Base 500 P Gulvspærre jf. (Johansen, 2010, s. 14).</i>			
<i>*** Der skal foretages en individuel fugtbedømmelse af en uvildig fugtsagkyndig.</i>			
<i>****Iht. SBI 224 "Fugt i bygninger" 2013 og Vejledning og håndtering af fugt i byggeriet 2010</i>			

PERSPEKTIVERING

Sunde huse er oppe i tiden, "Indeklima, bæredygtighed, DGNB¹⁸ svanemærkning mv." er *buzzwords* som optræder hyppigt i forbindelse med nybyggeri. Det kan derfor forekomme paradoksalt at byggefugt ikke har større bevågenhed hvad angår fugtkriterier for uorganiske materialer, eftersom fugt ofte er involveret i byggeskader, også i nybyggeriet.

Af casestudiet kan det udledes at et fugtniveau større end 75 % RF i beton, i kombination med nystøbt beton med forventelige overflade-pH under 10, udgør en latent risiko for skjult mikrobiel vækst på betonoverfladen. Er overfladen tilmed besmudset, vil den øgede mængde næringsstof forøge vækstpotentialet – formentlig proportionelt med besmudsningsgraden. Forsøg med særlig rengøring/desinfektion af betonoverfladerne vil kunne belyse i hvor høj grad skimmelsvampevæksten påvirkes af besmudsning. For mere konkret risikovurdering i forhold til specifikke skimmelsvampearter er der behov for øget kendskab til de enkelte skimmelsvampearters pH-interval, hvilket generelt er mangelfuldt, særligt for fremtrædende arter såsom *Aspergillus versicolor* jf. Tabel 11.

I specialet har jeg ikke forholdt mig til de fysisk-kemiske egenskaber af spartel- og anhydritgulve, hvorfor deres evne til eventuelt at obstruere eller sabotere mikrobiel vækst er ukendt. I forhold til overflade-pH kunne det være interessant med korresponderende måleresultater (skimmelanalyser, pH-målinger og fugtmålinger) fra flere forskellige gulvmaterialer udsat for samme materialefugt og klimabetingelser.

Alle pH-målinger som fremgår af studiet, er udført *on-site* ved en adapteret måleproces af slibestøv fra betonen. En videreudvikling og validering af en sådan eller lignende måleproces for faste byggematerialer synes opportunt, særligt set i forhold til pH's betydning i andre sammenhænge i byggeriet, eksempelvis i underlaget for visse fuldlmede slutbelægninger, malingslag o.l.

Siden slutning af 1990'erne og starten af nullerne har det været kutyme at terrændækket støbes inden opsætning af vægge og tag. Betondæk er derfor generelt blevet mere eksponeret for regnvand gennem de sidste cirka 20 år og det er vel og mærke i en periode hvor regnintensiteten er øget og regnvandet gradvist er blevet forsuret. Alle disse faktorer taler for en relativ hurtig reduktion af betonens overflade-pH. Regnvandets isolerede betydning for betonens overflade-pH er dog ukendt, men det er overvejende sandsynligt, at det bidrager til en forceret overfladekarbonatisering.

Hvad angår smøremembran versus fugtmembran, så forholder rapporten sig alene teoretisk til effekten af en smøremembran, hvor grundtesen har været, at hvis hulrummet med ilt fjernes, så elimineres vækstrisikoen. Skimmelsvampe behøver dog kun 0,25 % ilt i atmosfærisk luft for at kunne gro, hvorfor en fuldstændig eliminering nok ikke er mulig (Sedlbauer, 2000, s. 164 tabel 3). Egentlige erfaringer og/eller undersøgelsesresultater fra feltforsøg ville derfor være ønskelige, eftersom fugtspærre i form af smøremembraner fremstår som en umiddelbar forhåndsværende løsning, såfremt byggebranchen fortsætter med de nuværende "høje" fugtkriterier for betondæk.

¹⁸ DGNB står for "Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen". DGNB er en bæredygtig certificeringsordning af bygninger. Green Building Council Denmark (DK-GBC) står for DGNB-certificeringen i Danmark.

Tilgængelig inddata for beregning af affugtningstider har vist sig sparsom og bygger overvejende på forældede betonrecepter, hvorfor det har været svært at opnå valide simuleringsresultater i WUFI. Egentlige materialebiblioteker med tekniske egenskaber for selvudtørrende betoner mangler, således man i højere grad vil kunne estimere affugtningstider ved beregning.

I lav miljøeksponeringsklasse (passivt miljø), såsom terrændæk, kan der opnås øget frihed til at sammensætte betoner ved at adskille eksponerings- og styrkeklasser som foreslået af branchefællesskabet Dansk Beton i 2019 (Thrane, Andersen, & Mathiesen, 2019, s. 21). Herved sikres større mulighed for at manipulere med alkaliniteten ved brug af særlige cementpulverblandinger med filler eller lignede. Betonens pH-værdi og hygroskopiske egenskaber i øvrigt kan muligvis også påvirkes af plastificeringsstoffer (negativt/ positivt). Fremtidige betonrecepter kan om muligt udvikles til målrettet at sikre en alkalinitet som forhindrer skimmelsvampevækst.

LITTERATURLISTE

- Adams, R. I., Bhargar, S., Dannemiller, K. C., Eisen, J. A., Fierer, N., Gilbert, J. A., . . . Bibby, K. (7. September 2016). Ten questions concerning the microbiomes of buildings. *Building and Environment*, s. 224-234. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.001>
- Adan, O. C., Samson, R., Miller, D. J., Dijksterhuis, J., Huinink, H. P., Samson, R. A., . . . Summerbell, R. C. (2011). *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. Wageningen Academic Publishers.
- Andersen, B. (2011). Mug er smuk - men ikke på dine vægge. *Aktuel Naturvidenskab*(4), s. 6-9.
- Andersen, B., Frisvad, J. C., Søndergaard, I., Rasmussen, I. S., Larsen, L. S., & et, a. (2011). Associations between Fungal Species and Water-Damaged Building Materials. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, Vol. 77, No. 12, s. 4180-4188. doi:10.1128/AEM.02513-10
- Andersen, N., Christensen, G., & Nielsen, F. (2003). *SBI-Anvisning 178, Bygningers fugtisolering*. Statens Byggeforskningsinstitut.
- (2012). *AS 1884 Floor covering - Resilient sheet and tiles - Installation practices*. Standards Australia.
- Bakshaliyeva, F. K., Namazov, N. R., Jabrailzade, S. M., Yusifova, A. A., Rzaeva, A. L., & et, a. (27. 05 2020). Ecophysiological Features of Toxigenic Fungi Prevalent in Different Biotopes of Azerbaijan. *Biointerface Research in Applied Chemistry*(Volume 10, Issue 6), s. 6773-6782. Hentet fra <https://biointerfaceresearch.com/wp-content/uploads/2020/05/20695837106.67736782.pdf>
- Behnood, A., Tittelboom, K. V., & Belie, N. D. (2016). *Methods for measuring pH in concrete*. Magnel Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University. Ghent: Construction and Building Materials. Hentet 2020 fra <https://pdf.sciencedirectassets.com/271475>
- Behnood, A., Tittelboom, K. V., & De Belie, N. (2016). Methods for measuring pH in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, s. 176-188. Hentet fra <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.032>
- Brancheorganisationen Gulvbranchen. (2015). *Fugtmåling før gulvlægning*. København K. Hentet fra https://www.gulvbranchen.dk/media/20989/vejledning_fugtmaaling-foer-gulvlaegning_maj_2015.pdf
- Brandt, E. (2007). *BYG-ERFA Erfaringsblad (43) 070628, Gulvvarme og gulvtyper - isoleringsforhold, skader og gener*. Ballerup: Fonden BYG-ERFA.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Christensen, G., Gudum, C., Hansen, M. H., & Møller, E. B. (2013). *SBI Anvisning 224 Fugt i bygninger*. 2450 København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

- Brandt, E., Hansen, M. Ø., Bunch-Nielsen, T., & Ebbeshøj, N. (2005). *BYG-ERFA Erfaringsblad (99) 051231, Skimmel i bygninger - vækstbetingelser og forebyggelse*. Ballerup: Fonden BYG-ERFA.
- Brauer, C. (Februar 2017). *Armino (Arbejdsmedicinens online informationssystem)*. (O. Carstensen, Red.) Hentet 2020 fra Armoni, Bygningsrelaterede symptomer: http://www.armoni.dk/sites/default/files/Armoni_Fildeling/files/Public/Sygdomme_i_Aandedraet_sorganerne/armoni_indeklimavejledning.pdf
- BYG ERFA. (2020). *Udtørring af byggematerialer*. Hentet fra <https://byg-erfa.dk/udtoerring>
- Byggeriets Ankenævn. (2020). *Årsberetning 2019 for Byggeriets Ankenævn*. København K: Dansk Byggeri. Hentet 18. 09 2020 fra https://www.byggerietsankenævn.dk/media/41751/ankenævnberetning_2019-20_net.pdf
- Byggeskadefonden. (2020). *Byggeskadefonden Beretning 2019*. København V. Hentet 18. 09 2020 fra https://bsf.dk/media/1893/bsf_beretning_2019.pdf
- Byggeskadefonden. (2020). *www.bsf.dk*. Hentet fra <https://bsf.dk/erfaformidling/vi-anbefaler/byggeriets-projektering/fugt/>
- Byggeskadefonden vedrørende Bygningsfornyelse. (2020). *Beretning 2019*. København K: BvB. Hentet 19. 09 2020 fra https://bvb.dk/media/svopj2yv/bvb_a-rsberetning_2019.pdf#/media/media/edit/1545?list=1319&page=1&filter=&orderBy=updateDate&orderDirection=desc
- Campana, R., Sabatini, L., & Frangipani, E. (2020). Moulds on cementitious building materials—problems, prevention and future perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*(104), s. 509-514. doi:<https://doi.org/10.1007/s00253-019-10185-7>
- Chang, C.-F., & Chen, J.-W. (September 2006). The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete Research*(Volume 36, Issue 9), s. 1760-1767. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.025>
- Clifton, D. (September 2007). Dehumidification - the fast-track to concrete drying. *Concrete, Floors and Screeds*, 20-22.
- Dansk Beton, Fabriksbetongruppen. (2013). *Selvudtørrende beton - til gavn for byggeriet, Anvendelse, specifikation, udførelse og baggrund*. 1358 København K: Dansk Beton. Hentet fra <https://www.danskbeton.dk/media/20302/selvudtoerreende-beton-til-gavn-for-byggeriet.pdf>
- Dansk Standard. (2007). *DS 411:1999/Ret. 2:2007, Norm for betonkonstruktioner*.
- Dansk Standard. (2013). *DS/EN ISO 13788, Byggekomponenters og -elementers hygrotermiske ydeevne - Indvendig overfaldetemperatur for at undgå kritisk overfladefugtighed og kondensdannelse i hulrum - Beregningsmetoder*. Charlottenlund.
- Dansk Standard. (2019). *DS/EN 206 DK NA:2019, Beton - Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse - Regler og anvendelse af EN 206 i Danmark*.

- DS/EN 934-2. (2012). *Tilsætningsstoffer til beton, mørtel og injektionsmørtel - Del 2: Betontilsætningsstoffer - Definitioner, krav, overensstemmelse og mærkning* (+A1:2012 udg.). DANSK STANDARD.
- Erhvervs- og Byggestyrelsen. (2009). *Omfanget af svigt, fejl, mangler og skader i dansk byggeri*. Hentet fra https://boligejer.dk/file/25739/Omfanget_af_svig_t_fejl_mangler_og_skader_i_dansk_bygg
- Forsikring & Pension. (2020). Hentet 01. 10 2020 fra Forsikring & Pension: <https://www.forsikringogpension.dk/media/5975/ejerskifteforsikring.pdf>
- Frederiksen, J., & Munch-Petersen, G. N. (2015). *Betonhåndbogen*. Danmark: Dansk Betonforening. Hentet fra <https://betonhaandbogen.dk/>
- Fries, N. (1973). Effects of volatile organic compounds on the growth and development of fungi. *British Mycological Society*, s. 1-21. doi:10.1016/S0007-1536(73)80055-5
- Frisvad, J. C., & Samson, R. A. (2004). Polyphasic taxonomy of *Penicillium* subgenus *Penicillium*, A guide to identification of food and air-borne terverticillate *Penicillia* and their mycotoxins. *Studies in Mycology* 49, s. 174.
- Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger* (Håndbok 50 udg.). (BYGGFORSK, Red.) Norges byggforskningsinstitutt.
- Gottfredsen, F., & Nielsen, A. (Red.). (1997). *Bygningsmaterialer, Grundlæggende egenskaber* (1. udgave, 76. oplag, 2015 udg.). Lyngby: Polyteknisk Forlag.
- Gravesen, S. (2005). Skimmelsvampe og indeklima - hvad ved vi i dag? *Dansk Kemi*(1), s. 30-33. Hentet fra <https://www.kemifokus.dk/wp-content/uploads/sites/7/side30-31del-1daknr1.pdf>
- Grønning, J. T. (2011). *Bogen om allergi* (1, udgave udg.). Danmark.
- Guillitte, O. (1995). Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *The Science of the Total Environment*(167), s. 215-220. doi:[https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04582-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04582-L)
- Haines, S. R., Siegel, J. A., & Dannemiller, K. C. (2. May 2020). Modeling microbial growth in carpet dust exposed to diurnal variations in relative humidity using the "Time-of-Wetness" framework. *Indoor Air*, s. 978-992. doi:DOI: 10.1111/ina.12686
- Hansen, E. d., Ginnerup, S., Sigbrand, L., Jensen, O., Brandt, E., Morelli, M., . . . Bergsøe, N. C. (2020). *SBI-Anvisning 272, Anvisning om Bygningsreglement 2018* (2. udgave, udgivet den 29.09.2020 udg.). Danmark: BUILD.
- Hansen, E., & Nielsen, J. (2008). *Synliggørelse af svigt i byggeriet - opdating af indeks for 2006*. Notat, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København SV.
- Hansen, H. L., & Smith, E. (2009). *Personers ophold i bygninger med fugt og skimmelsvamp - Anbefalinger for sundhedsfaglig rådgivning* (Version 2,0 udg.). (A. Fabricius, & J. Blands, Red.) København S, Danmark: Sundhedsstyrelsen. Hentet 2020 fra <https://www.sst.dk/>

/media/Udgivelser/2010/Publ2010/CFF/Skimmelsvamp/Personers-ophold-i-bygninger-med-fugt-og-skimmelsvamp-Anbefalinger-for-sundhedsfaglig-r%C3%A5dgivning.ashx

- Hansen, K. K. (1986). *Sorption isotherms - A Catalogue and a Data Base*. Technical University of Denmark.
- Herholdt, A. D., Justesen, C. F., Nepper-Christensen, P., Nielsen, A., et, a., & et, a. (Red.). (1985). *Beton-Bogen* (2. udgave udg.). Danmark: Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, Aalborg Portland.
- Hjorslev Hansen, M., & Hansen, K. K. (2010). *BYG-ERFA Erfaringsblad (99) 100527 Udtørring af byggematerialer - forenklet metode til vurdering af udtørringstid*. Ballerup: Fonden BYG-ERFA.
- HORIBA . (2020). Hentet 11. 10 2020 fra LAQUA HORIBA Scientific:
https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/water_quality/Documents/Application_Notes/HIS/03_-_pH_of_Cement_for_Floor_Installation_Testing__Hi-Res_.pdf
- HusCompagniet. (2019). *Vores Livs Hus*. Danmark. Hentet fra
https://issuu.com/idenyt/docs/huscompagniet_digitalkatalog
- Hybel. (2020). *hybelhuse.dk*. Hentet 03. 11 2020 fra
<https://ditnybyggeri.dk/media/8547/hybelcompressed.pdf>
- Hyde, K. D., Maharachchikumbura, S. S., Hongsanan, S., Samarakoon, M. C., Lücking, R., Pem, D., . . . Elgorban, A. M. (2017). The ranking of fungi: a tribute to David L. Hawksworth on his 70th birthday. *Fungal Diversity*(84), s. 1-23. doi:DOI 10.1007/s13225-017-0383-3
- Hyldgård, C., Funch, E., & Steen-Thøde, M. (1997). *Grundlæggende klimateknik og bygningsfysik* (Rev. Januar 2001 udg.). Danmark: Aalborg Universitet, Institut for Bygningsteknik.
- Jacobsen, T. B. (2019). *BYG-ERFA Erfaringsblad (43) 191031, Skader på gulve med EPS-tilslag (EPS-beton)*. København K: Fonden BYG-ERFA.
- Jensen, N., Odgaard, T., Bjarløv, S., Andersen, B., Rode, C., & Møller, E. B. (2020). *Hygrothermal assessment og diffusion open insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls*. Technical University of Denmark, COWI A/S, Section of Building Physics and Refurbishment and Department of Bioengineering, Technical University of Denmark. Building an Environment 182 (2020) 107011. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107011>
- Johansen, B. L. (2010). *TRÆ 64, Trægulve - Lægning* (Inkl. tillæg fra januar 2017 udg.). Træinformation.
- Johansson, P., Samuelson, I., Ekstrand-Tobin, A., Mjörnell, K., Sandberg, P. I., & Sikander, E. (2005). *SP RAPPORT 2005:11, Kritiskt fuktillstånd för mikrobiell tillväxt på byggmaterial – kunskapssammanfattning*. SP Energiteknik, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. Hentet fra <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962303/FULLTEXT01.pdf>
- Johnsen, I. (2013). *Forsuring, Naturen i Danmark*. Danmark: lex.dk. Hentet fra <https://naturenidanmark.lex.dk/Forsuring>

- Keton, C., Gámez-Arjona, F. M., Menna, A., Scholl, S., Dora, S., Huerta, A., . . . Sánchez-Rodríguez, C. (17. Oktober 2019). Pathogen-induced pH changes regulate the growth-defense balance in plants. *The EMBO Journal*(38: e101822), 1-20. doi:10.15252/embj.2019101822
- Koch, A., & Christensen, G. (2014). *BYG-ERFA Erfaringsblad (13) 141212, Opfugtet betonplade i terrændæk - undersøgelse og renovering*. KBH: Fonden BYG-ERFA.
- Kwiatkowski, J., Woloszyn, M., & Roux, J.-J. (2009). *Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials*. Universite de Lyon. Building and Environment. Hentet fra <https://www.sciencedirect-com.zorac.aub.aau.dk/science/article/pii/S0360132308001078?via%3Dihub>
- Li, G., Dong, L., Bai, Z., Lei, M., & Du, J. (2017). Predicting carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects. *Construction and Building Materials* 142, s. 59-65. Hentet fra <https://www.sciencedirect-com.zorac.aub.aau.dk/science/article/pii/S0950061817304270>
- Liu, J., Qiu, Q., Chen, X., Xing, F., Han, N., He, Y., & Ma, Y. (May 2017). Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, s. 217-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.032>
- Lunds Universitet. (2020). Hentet fra <http://www.fuktcentrum.lth.se/verktyg-och-hjaelpmedel/windows-baserade-datorprogram/torkas/>
- Moland byggevarer a/s. (2020). *Læggevejledning for Molaloc*. Hentet 23. 19 2020 fra <https://www.moland.dk/Resources/render.aspx?id=1012>
- Moon, H. J. (2005). *Assessing Mold Risks in Buildings under Uncertainty*. A Thesis, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the College of Architecture, Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Morelli, M., Vanhoutteghem, L., Rose, J., Svec, O., Villumsen, C., & Andersen, T. J. (2015). *Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen, SBI 2015:12, 1. udgave*. Dokumentationsrapport, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København SV.
- Mundt Petersen, S., Wallentén, P., Toratti, T., Heikkinen, J., et, a., & et, a. (2012). *Moisture risk evaluation and determination of required measures to avoid mould damage using the Folos 2D visual mould chart*. Lund University. Thermophysics.
- Mundt-Petersen, S. O., & Harderup, L.-E. (2013). Validation of a One-Dimensional Transient Heat and Moisture Calculation Tool under Real Conditions. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference*, s. 12.
- Møller, E. (2013). *Materialenedbrydning - Mekanismer og forebyggelse*. København SV: SBI Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Møller, E. B. (2010). *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*. December, Danmark: Erhvervs- og Byggestyrelsen, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Aalborg Universitet.

- Møller, E. B., Andersen, B., Rode, C., & Peuhkuri, R. (Juni 2017). Conditions for mould growth on typical interior surfaces. *11th Nordic Symposium on Building Physics*, s. 171-176. Hentet fra <https://pdf.sciencedirectassets.com/277910>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). *Global Monitoring Laboratory, Earth System Research Laboratories*. Hentet fra NOAA: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly.html>
- Nielsen, C. V., & Olsen, L. (2006). *Udtørring af beton i byggefasen, Afrapportering af udtørningsforsøg*. MILJØMINISTERIET, Miljøstyrelsen.
- Nielsen, K. F., Holm, G., Utrup, L., Nielsen, P., et, a., & et, a. (12. Maj 2004). Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. *International Biodeterioration & Biodegradation*(54), s. 325-336. doi:doi:10.1016/j.ibiod.2004.05.002
- Ojanen, T., & Salonvaara, M. (2000). Numerical simulation of mould growth in timber frame walls. *Proceedings of Healthy Building*.
- Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2011). *Classification of material sensitivity - New approach for mould growth modeling*. Tampere University of Technology.
- Pasanen, A.-L., Kasanen, J.-P., Rautiala, S., Ikäheimo, M., Rantamäki, J., Kääriäinen, H., & Kalliokoski, P. (September 2000). Fungal growth and survival in building materials under fluctuating moisture and temperature conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*(46), s. 117-127. doi:[https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00093-7)
- Peng, J., Tang, H., Zhang, J., & Cai, S. C. (2018). *Numerical Simulation on Carbonation Depth of Concrete Structures considering Time- and Temperature-Dependent Carbonation Process*. Forskningsartikel, Advances in Materials Science and Engineering. doi:<https://doi.org/10.1155/2018/2326017>
- Rasmussen, T. (2010). Udtørring af betongulve - en tilbagevendende problematik. *Beton* 2, 36-39.
- RBK - Rådet för ByggKompetens. (2019). *Manual - Fuktmätning i betong*. Hentet 09. 11 2020 fra www.rbk.nu: http://www.rbk.nu/ladda-ner-bestall/fuktmatningsmanual__36
- Sedlbauer, K. (2000). *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. PhH-thesis, Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Sedlbauer, K. (2001). *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Stuttgart: Der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart. Hentet fra https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/dissertationen/ks_dissertation_tcm45-30724.pdf
- Sedlbauer, K. (2002). Prediction of Mould Growth by Hygrothermail Calculation. *Journal of Building Physics*(25 (4)), s. 321-336.

- Simonovicová, A., Gódyová, M., & Sevc, J. (2004). Airborne and soil microfungi as contaminants of stone in a hypogean cemetery. *International Biodeterioration & Biodegradation*, s. 7-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2003.11.004>
- Stanaszek-Tomal, E. (2020). *Influence of pore structure on humidity parameters of cement-polymer mortars contaminated with filamentous fungi*. University of Technology, Cracow, Poland, Faculty of Civil Engineering. PLOS ONE. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231347>
- Statens Byggeforskningsinstitut. (2004). *Svigt i byggeriet - økonomiske konsekvenser og muligheder for en reduktion*. Erhvervs- og Byggestyrelsen.
- Stevenson, A., Hamill, P. G., O'Kane, C. J., Kminek, G., Rummel, J. D., Voytek, M. A., . . . Hallsworth, J. E. (2017). *Aspergillus penicillioides* differentiation and cell division at 0.585 water activity. *Environmental Microbiology*, s. 687-697. doi:[doi:10.1111/1462-2920.13597](https://doi.org/10.1111/1462-2920.13597)
- Sundhedsstyrelsen. (2015). *Skolesundhedsarbejde - håndbog til sundhedspersonale* (2. udgave udg.). (A. Poulsen, Red.) København S, Danmark: Sundhedsstyrelsen. Hentet 2020 fra <https://www.sst.dk/-/media/Udgivelser/2016/Skolesundhedsarbejde.ash>
- Thelandersson, S., & Isaksson, T. (March 2013). Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions. *Building and Environment*(65), s. 18-25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.016>
- Thirstrup, C., & Johannsen, S. R. (2017). *pH-MÅLING, Undervisning i Måleteknik*. Metrologi.dk, Styrelsen for Forskning og Innovation, GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology. Hentet 28. 09 2020 fra <http://metrologi.dk/wp-content/uploads/Laeremidler/Kemi/K1-pH-maaling.pdf>
- Thrane, L. N., Andersen, T. J., & Mathiesen, D. (2019). *Bæredygtigt Beton initiativ, Halvering af CO2-udledningen fra betonbygger - roadmap mod 2030*. Teknologisk Institut. Dansk Beton. Hentet fra https://www.innobyg.dk/media/75953/bbi_191104.pdf
- Thrane, U., & Andersen, B. (27. August 2018). Skimmelsvampe i danske bygninger. *Svampe*(78), s. 26-35.
- Thrane, U., Andersen, B., & Nielsen, K. F. (2001). Skimmelsvampe og indeklimakvalitet. *Dansk Kemi*(2), s. 33-35.
- Thrane, U., Olsen, K. C., & Ebbehøj, N. (2019). *Skimmelsvampe i bygninger - undersøgelse og vurdering*. København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Thrane, U., Olsen, K. C., Brandt, E., Ebbehøj, N., Gunnarsen, L., & et al. (2020). *SBi-Anvisning 274, Skimmelsvampe i bygninger - undersøgelse og vurdering*. (L. B. Raunkjær, & D. Gram, Red.) København, Danmark: BUILD, Aalborg Universitet.
- TIMBERMAN DENMARK A/S. (Marts 2020). *Timberman, Multiclic*. Hentet 23. 09 2020 fra <https://www.timberman.dk/media/76339/multiclic-montagevejledning.pdf>
- Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2020). *Bygningsreglementet BR18*. Hentet 23. 09 2020 fra <https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/14/Krav>

- Transport-, Bygnings- og Boligministeriet. (2007). *BEK nr 1292 af 24/10/2007 - Bekendtgørelse om byggeskadeforsikring*. Hentet fra <https://www.retsinformation.dk/eli/ta/2007/1292>
- Trechsel, H. R., & Bomberg, M. (1989). *Water vapor transmission through building materials and systems - Mechanisms and measurement*. Philadelphia: ASTM.
- Vadstrup, S. (2018). *Bevaringsværdige bygninger - sikring af bevaringsværdier*. Kolding: Aarhus School of Architecture. Hentet fra https://adk.elsevierpure.com/files/62630995/2_Bevaringsv_rdigeByg_okt_2018.pdf
- Valbjørn, O. (2003). *By og Byg Anvisning 204, Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger* (1. udgave udg.). Hørsholm, Danmark: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Valbjørn, O., Graversen, S., Skov, P., Olesen, B. W., Kristensen, J., Rindel, J., . . . Christophersen, E. (1993). *SBI-rapport 230, Indeklimaets påvirkninger*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Valbjørn, O., Laustsen, S., Høwisch, J., Nielsen, O., Nielsen, P. A., & et al. (2000). *SBI-Anvisning 196, Indeklimahåndbogen, 2. udgave*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A., Roques, C., et, a., & et, a. (2014). *A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods*. Université de Toulouse. Toulouse: Building and Environment. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.030>
- Vereecken, E., & Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*(51), s. 296-310. doi:[doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.003](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003)
- Vereecken, E., Vanoirbeek, K., & Roels, S. (2015). Towards a more thoughtful use of mould prediction models: A critical view on experimental mould growth research. *Journal of Building Physics* 39. doi:[doi:10.1177/1744259115588718](https://doi.org/10.1177/1744259115588718)
- Viitanen, H. (2004). *Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet - betonin homeenkesto*. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka . Hentet fra <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2004/W6.pdf>
- Viitanen, H., & Hukka, A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, s. 475-485. Hentet 23. 09 2020 fra <https://link-springer-com.zorac.aub.aau.dk/article/10.1007/s002260050131>
- Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., & Zirkelbach, D. (2015). Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. *Energy Procedia, Volume 78*, s. 1425-1430. Hentet 29. 09 2020 fra <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.165>
- Vogler, N., Lindemann, M., Drabetzki, P., Kühne, H.-C., et, a., & et, a. (2020). Alternative pH-indicators for determination of carbonation depth on cement-based concretes. *Cement and Composites*, 103565(109), s. 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103565>
- Vonau, W., & Guth, U. (2006). pH Monitoring: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry* volume(10), s. 746-752.

- Wang, J., Pindus, M., Janson, C., Sigsgaard, T., Kim, J.-L., Holm, M., . . . Norbäck, D. (May 2019). Dampness, mould, onset and remission of adult respiratory symptoms, asthma and rhinitis. *European Respiratory Journal*(Eur Respir J 2019; 53: 1801921), s. 1-10. doi:DOI: 10.1183/13993003.01921-2018
- Wheeler, K. A., Hurdman, B. F., & Pitt, J. I. (Februar 1991). Influence af pH on the growth of some toxigenic species of *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium*. *International Journal of Food Microbiology*(Volume 12, Issues 2-3), s. 141-150. doi:[https://doi.org/10.1016/0168-1605\(91\)90063-U](https://doi.org/10.1016/0168-1605(91)90063-U)
- Wiktor, V., De Leo, F., urzí, C., Guyonnet, R., Grosseau, P., & Garzia-Diaz, E. (2009). *Accelerated laboratory test to study fungal biodeterioration of cementitious matrix*. Delft University of Technology, Department of Life Sciences, Sect. of Microbiological, Genetic and Molecular Sciences, University of Messina, Department Poudres et Mate´riaux Multi-Composants, Ecole Nationale Supe´rieure des Mines de Saint-Etienne, Centre. International Biodeterioration & Biodegradation. Hentet fra <https://pdf.sciencedirectassets.com/271813>
- WUFI, Fraunhofer IBP. (2020). *WUFI Pro 6.5*. Hentet fra <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>
- WUFI® Bio*. (2020). Hentet fra <https://wufi.de/en/2017/03/31/wufi-bio/>
- WUFI® Mould Index VTT*. (2020). Hentet fra <https://wufi.de/en/2017/03/31/wufi-mould-index-vtt/>
- Aagaard, N.-J., Bunch-Nielsen, T., & Place Hansen, E. d. (2014). *SBi-anvisning 246, Granskning af byggeprojekter - Planlægning, gennemførelse og dokumentation af ekstern granskning* (1. udgave udg.). (N. S. Nielsen, Red.) København SV, Danmark: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Aagaard, N.-J., Emcon, K. H., & Møller, E. B. (2011). *Krav til fugtteknisk dokumentation samt fugtsagkyndig*. Vejledning til bygherrer, SBi, Afdeling for Byggeri og Sundhed, Journal nr. 721-160.

BILAGSFORTEGNELSE

BILAG 1..... 72

BILAG 2..... 79