



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen**

*En dokumentationsrapport*

Morelli, Martin; Vanhoutteghem, Lies; Rose, Jørgen; Svec, Oldrich; Villumsen, Casper; Andersen, Thomas Juul

*Publication date:*  
2015

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Morelli, M., Vanhoutteghem, L., Rose, J., Svec, O., Villumsen, C., & Andersen, T. J. (2015). *Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen: En dokumentationsrapport*. (1 udg.) SBI forlag. SBI Nr. 2015:12

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

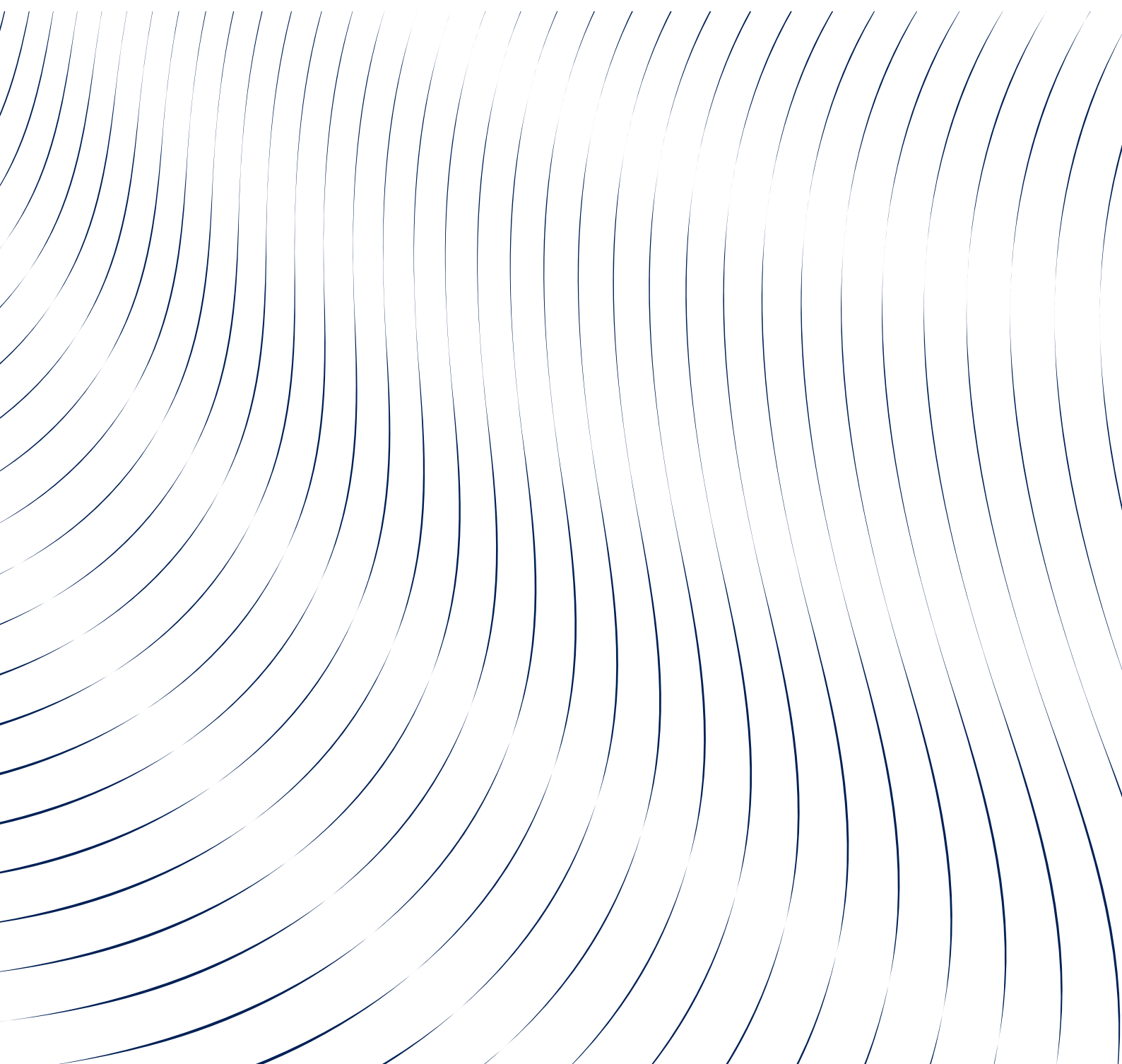


STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

# **ENERGIEFFEKTIV FUGTHÅNDBLING I BYGGEPROCESSEN**

## **EN DOKUMENTATIONSRAPPORT**

**SBI 2015:12**





# Energieeffektiv fugthåndtering i byggeprocessen

En dokumentationsrapport

Martin Morelli  
Lies Vanhoutteghem  
Jørgen Rose  
Oldrich Svec  
Casper Villumsen  
Thomas Juul Andersen

Titel	Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen
Undertitel	En dokumentationsrapport
Serietitel	SBi 2015:12
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2015
Forfattere	Martin Morelli, Lies Vanhoutteghem, Jørgen Rose, Oldrich Svec (Teknologisk Institut), Casper Villumsen (Teknologisk Institut), Thomas Juul Andersen (Teknologisk Institut)
Sprog	Dansk
Sidetal	81
Litteratur-henvisninger	Side 45-46
Emneord	Udtørring, byggefugt, energiforbrug
ISBN	978-87-563-1680-4
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post <a href="mailto:sbi@sbi.aau.dk">sbi@sbi.aau.dk</a> <a href="http://www.sbi.dk">www.sbi.dk</a>

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

# Forord

Denne rapport sammenfatter resultaterne af EL-FORSK projektet "Energiefektiv Fugthåndtering i Byggeprocessen".

Udtørring af bygninger er en energikrævende proces som anvendes ved fx nybyggeri, renovering og efter vandskader. Måden hvorpå fugt håndteres er yderst vigtig for at begrænse skader og sikre fremdriften i nybygnings- og renoveringsprojekter. Det er derfor vigtigt at kunne sammenligne forskellige udtørningsstrategier og tiltag for at minimere fugtophobning i materialer for at få et overblik over udtørringstider og energiforbrug.

Rapportens formål er at sammenfatte og formidle resultaterne fra fire delprojekter af EL-FORSK projektet. For at give et mere fuldstændigt billede af emnet "fugtudtørring", indeholder rapporten også afsnit med teoretisk baggrund for udtørningsprocesser og – metoder, beskrivelse af parametre af betydning for udtørringen fx geografisk placering, samt beregninger af fugtforholdene i forskellige byggematerialer afhængig af hvordan de opbevares på byggepladsen og deres udtørningsforhold. Projektet er også afrapporteret direkte til EL-FORSK.

Projektet er støttet af EL-FORSK og udført i perioden marts 2013 - marts 2015. Projektet havde deltagelse af tre parter:

Statens Byggeforskningsinstitut  
Teknologisk Institut  
Dansk Byggeri

Herudover deltog MT Højgaard og Skadesservice Danmark i en begrænset periode.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København  
Energi og Miljø  
April 2015

*Søren Aggerholm*  
Forskningschef

# Indhold

Forord .....	3
Indhold .....	4
Indledning .....	6
Projektets formål .....	7
Sammenfatning og resultater .....	8
Fugtviden .....	9
Fugtbinding .....	9
Fugttransport.....	11
Udtøringsforløb .....	12
Udtørings- og beregningsmetoder .....	13
Udtøringsmetoder .....	13
Simple metoder .....	13
Elektrokemiske processer .....	14
Forceret udtørring med varmekabler.....	14
Dokumentationsmetoder.....	17
Fugtfølere i borehuller .....	17
Beregningsmetoder.....	18
Aalborg Portland model.....	19
Byg-Erfa model.....	19
Match, WUFI, TorkaS.....	19
Byggefugt, udeklima og indeklima.....	20
Fugtkilder .....	20
Byggefugt .....	20
Udeklima.....	20
Indeklima .....	23
Situationer på byggepladsen .....	24
Byggematerialer .....	26
Betonelementer .....	26
Porebeton.....	30
Sandwichelementer.....	31
Letklinkerbeton .....	33
Andre materialer.....	36
Andre begrænsende flader.....	36
Beregningsværktøj .....	38
Gennemgang af beregningsværktøjet .....	38
Kontekst.....	39
Bygning.....	39
Konstruktion .....	40
Resultat .....	41
Beregningsgrundlag.....	41
Udtørringstid.....	41
Energiforbrug.....	43
Referencer .....	45
Bilag 1. Beregningseksempel.....	47
Beregningseksempel .....	47
Brugerdefineret information.....	47
Indtastning af data i beregningsværktøj.....	47
Beregnet udtørringstid og energiforbrug .....	52
Bilag 2. Luftskeftemålinger .....	54
Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen – målinger i boliger under opførelse.....	54
Bilag 3. Vandindtrængning .....	63

Bilag 4. Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg .....	65
Beregningsgrundlag i WUFI.....	65
Resultater.....	65
Relativ fugtighed og udtørningsperiode .....	65
Vandindhold .....	67
Bilag 5. Resultater for betonelementer.....	68
Bilag 6. Resultater for porebeton.....	72
Bilag 7. Resultater for sandwichelementer.....	74
Bilag 8. Resultater for letklinkerbeton .....	78



# Indledning

Byggeriet er i stigende grad blevet mere komplekst, og der kræves høj kvalitet og produktivitet med et øget pres på tid og økonomi. Det øgede pres på færdiggørelsen af byggerier udfordrer projekteringen, udførelsen samt den planlægning og koordinering, som er helt afgørende for alle parter succes i projektet. Et godt resultat opnås ved at fokusere på en række områder, som hver især kan bidrage til den ønskede kvalitet af byggeriet. Et af områderne er fugthåndteringen i byggeprocessen, der har stor indvirkning på både tid og økonomi samt kvaliteten af byggeriet. At udtørringen påvirker kvaliteten af byggeriet kan ses ved at såvel for kraftig, for hurtig som for langsom udtørring kan medføre unødvendige skader på bygningsdele og bygninger og så efter ibrugtagning.

Hurtig udtørring af konstruktioner er ofte forbundet med store omkostninger til selve udtørringsprocessen i form af el og varme. Det umiddelbare alternativ vil være udsættelse af indflytningen og evt. lang genhusning, hvilket er endnu dyrere. Det er derfor vigtigt at kunne vælge den korrekte udtørringsmetode, hvilket forudsætter indgående materialekendskab.

Udtørringstiden af opfugtede byggematerialer er svær at bestemme, da den afhænger af flere parametre, eksempelvis materialetype, start og slut fugtindhold, omgivende klima, etc. Der har gennem tiden været udviklet flere værktøjer og metoder til bestemmelse af udtørringstiden af byggematerialer eller specifikke konstruktioner. Disse mange parametre har desuden stor betydning for energiforbruget til fugtuddtørring.

Forudsætningerne for en markant energireduktion på danske byggepladser er en øget opmærksomhed og beskrivelse af eksisterende udtørringsteknologier, videreudvikling af udvalgte teknologier samt værktøjer, der sikrer en bred og hensigtsmæssig anvendelse af teknologierne. På den baggrund er projektet opdelt i følgende fem delprojekter, som strækker sig fra kortlægningsarbejde over udvikling af metoder og værktøj til bred formidling af projektets resultater.

- 1 Kortlægning af parametre, der har betydning for energiforbruget på byggepladsen.
- 2 Effektivisering og videreudvikling af teknologier og metoder til udtørring.
- 3 Demonstration af videreudviklede teknologier og metoder til udtørring.
- 4 Udvikling af webbaseret værktøj
- 5 Projektledelse og formidling

Denne rapport omhandler delprojekt 5, som samler alle projektets resultater fra kortlægning af parametre, som har betydning for fugtuddtørring til beskrivelse af beregningsværktøjet til bestemmelse af udtørringstid og energiforbrug for materialer indeholdende beton.

## Projektets formål

Formålet med projektet "Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen" var at skabe forudsætningerne for at opnå energibesparelser på de danske byggepladser i forbindelse med fugtudsugning af bygningskonstruktioner i byggeprocessen.

Dette mål skulle nås ved at udvikle og beskrive energieffektive udtørningsteknologier til anvendelse på byggepladser og indarbejde projektresultaterne i et webbaseret beregningsværktøj, som skulle regne på udtørningstid og energiforbrug til udtørring af bygninger eller konstruktioner.

### *Mål*

Besparelsespotentialet ønskedes synliggjort gennem forskellige aktiviteter fra kortlægning af vigtige parametre for fugtudsugning, videreudvikling og demonstration af udtørningsteknologier og -metoder til udvikling af et webbaseret beregningsværktøj.

Beregningsværktøjet skal anvendes i projekterings- og udførelsesfasen til optimal håndtering af byggefugten, og dette sammenholdt med efteruddannelse af rådgiverne og de udførende skal det give en afgørende mulighed for i fremtiden at kunne minimere energiforbruget markant på byggepladsen.

Beregningsværktøjet skal kunne estimere det forventede energi- og tidsforbrug til udtørring i forbindelse med et konkret byggeprojekt. Energi og tidsforbruget estimeres ud fra brugerens indtastninger om bygningen og de valg, der træffes omkring fugthåndtering på byggepladsen. Ved synliggørelse af den energimæssige betydning af konkrete valg, giver det brugeren bedre mulighed for at vælge energieffektive løsninger og dermed reducere energiforbruget og tid til udtørring.

### *Resultater*

Det webbaserede beregningsværktøj skal udbredes til – og anvendes af – hele byggebranchen for at minimere energiforbruget til udtørring i byggefasen. Værktøjet er offentligt tilgængeligt efter projektafslutning og Teknologisk Instituts vil stå for driften og videreudvikling af værktøjet.

# Sammenfatning og resultater

Gennem fem delprojekter blev der i projektet *Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen* kortlagt væsentlige parametre med betydning for energiforbruget ved udtørring, udviklet og demonstreret en energieffektiv udtørringsteknologi til anvendelse på byggepladser, samt udviklet et webbaseret beregningsværktøj. Resultaterne fra de forskellige delprojekter er medtaget i beregningsværktøjet, der kan bruges til at bestemme energibehovet og tiden til udtørringsprocessen af et råhus eller bygningsafsnit i større råhus.

Som baggrund for udvikling af beregningsværktøjet blev de forskellige parametre der har betydning for fugtudtørring, såsom byggefugt, udeklima og indeklima, undersøgt. Hver af disse parametre kræver forholdsregler i projektering, udførsel og vedligeholdelse.

Udeklima og indeklima har en stor påvirkning på mængden af byggefugt i et materiale, samt energiforbruget og tiden det tager at udtørre materialet til et acceptabelt fugtniveau for videre arbejde. Derfor blev der i projektet udført flere detaljerede undersøgelser af fugtindhold og udtørringsforløb i byggematerialer indeholdende beton under forskellige situationer for opbevaring på byggepladsen. Der blev betragtet syv forskellige situationer på byggepladsen, som afspejler forskellige afdæknings- og opbevaringsmetoder, samt krav for hvor tørre materialerne skal være før der ikke længere er noget udtørringsbehov. Disse forskellige situationer på byggepladsen er ikke inkluderet i det udviklede beregningsværktøj, men kan implementeres på et senere tidspunkt.

For at belyse udtørringsbehovet blev der udført 1-D hygrotermiske simuleringer for fire situationer for opbevaring af byggematerialerne på byggepladsen, hvor der blev skelnet mellem yder- og skillevejgge. Samtidig blev fugtindhold vurderet efter 3 og 6 måneder for at tage hensyn til opførelsestidspunkt samt randbetingelser for inde- og udeklima.

Som led i projektet nævnes der forskellige metoder til udtørring af byggematerialer. En af metoderne er en videreudvikling af en eksisterende udtørringsteknologi og er baseret på forceret udtørring med varmekabler, der placeres på overfladen af den opfugtede konstruktion, hvor der samtidig også placeres en diffusionsåben isolering. Afprøvning af metoden har vist, at metoden med fordel kan bruges til udtørring af beton, tegl og lignende materialer, der kan tåle høje temperaturer. Metoden skal dog benyttes med varsomhed på andre byggematerialer af hensyn til risikoen for revnedannelse.

Baseret på de ovennævnte undersøgelser, blev der i projektet udviklet et beregningsværktøj, der kan synliggøre konsekvenserne for energiforbrug og udtørringstid i forhold til de valg, der træffes i forbindelse med udtørringsprocessen af et råhus. Hensigten med beregningsværktøjet følger Bygningsreglementets tilskyndelse til at nedbringe energiforbruget, ikke kun i driftsfasen, men også i opførelsesprocessen.

Beregningsværktøjet kan også anvendes i renoveringssituationer, eller hvor eksisterende bygninger fx har været udsat for vandskade, og her vil det ofte være større fokus på en hurtig udtørring end en økonomisk billig løsning.

# Fugtviden

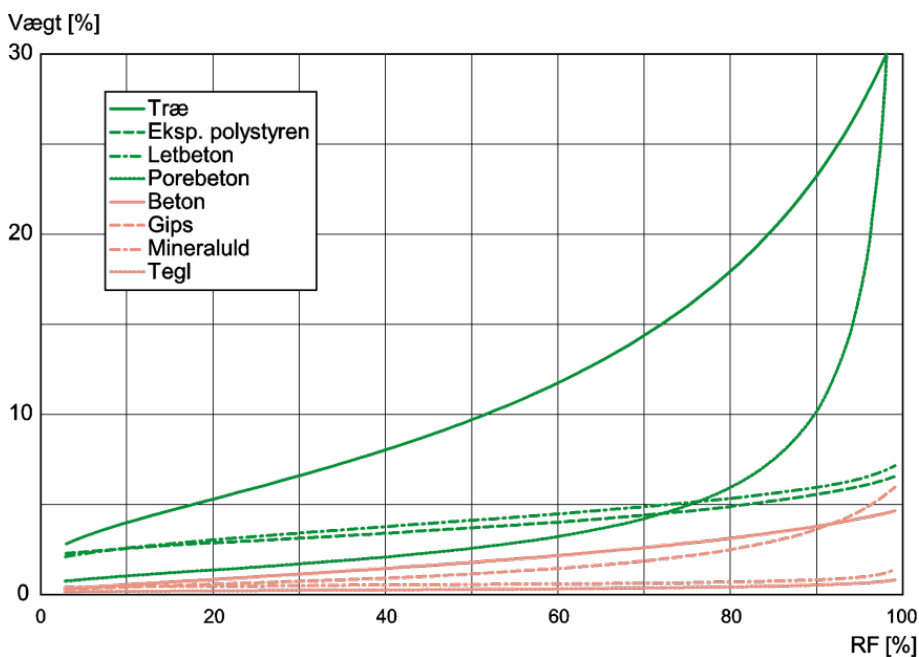
Følgende kapitel er baseret på bogen *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber* (Gottfredsen og Nielsen, 1997), og mere dybdegående viden om fugt kan findes i publikationen.

## Fugtbinding

Porøse byggematerialer er hygroskopiske, hvilket betyder, at de kan optage og afgive fugt til den omgivende luft. Når materialer er i ligevægt med omgivelserne vil porernes vanddamp tryk være lig med vanddampens partialtryk i den omgivende luft ved en given temperatur.

Vand i byggematerialer kan bindes på flere måder, men af praktiske grunde skelnes mellem kemisk - og fysisk bundet vand. Det fysisk bundne vand kan drives ud ved ca. 105 °C, mens kemisk bundet vand normalt kræver højere temperaturer for at drives ud. Vand som optages af hygroskopiske kræfter er bundet fysisk.

Materialers evne til at optage og afgive vand betegnes sorption. Absorption er materialers evne til at optage fugt, hvilket indbefatter såvel adsorption som kappilarkondensation. Adsorption er bindingen af vandmolekyler til porernes indre overflader. Tilsvarende betegnes materialers evne til at afgive vand desorption. Materialers egenskaber for sorption kan udtrykkes ved en sorptionsisoterm, som vist i Figur 1. Kurven beskriver ligevægten mellem relativ fugtighed og vandindhold ved en given, fastholdt temperatur.

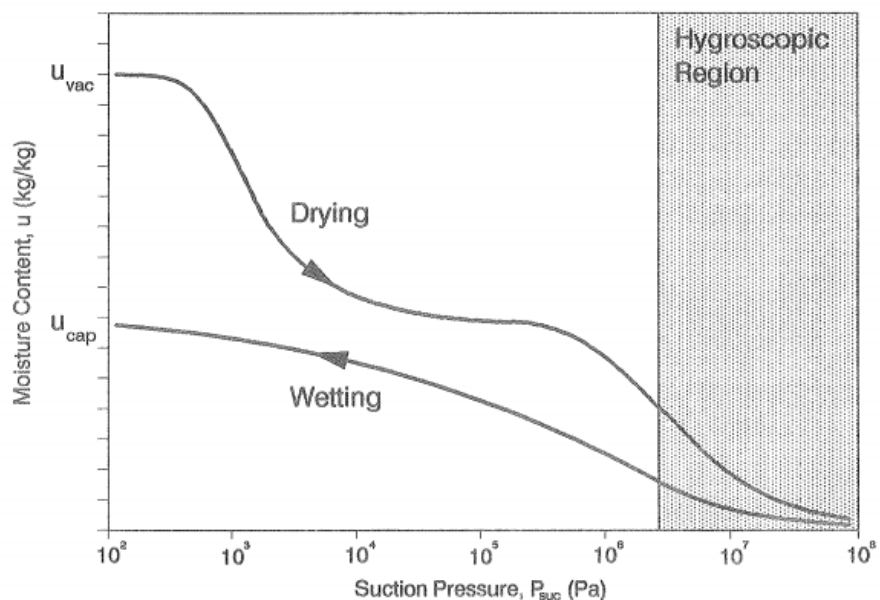


Figur 1. Eksempel på sorptionskurve for byggematerialer (Brandt, 2013).

Det er muligt at bestemme ligevægt under vandoptagelse og vandafgivelse, hvor det ofte ses at kurverne ikke er sammenfaldende. Dette fænomen kaldes hysteres, men behandles ikke nærmere, da der i stedet blot anvendes en enkelt sorptionskurve for hvert byggemateriale. Yderligere er sorptionskurven temperaturafhængig men i temperaturområdet for byggeri er der ikke store udsving på kurverne ved forskellige temperaturer.

Byggematerialer består typisk af flere materialer fx beton som er cementpasta, sand og sten. For materialer bestående af flere materialer kan sorptionsisotermerne tilnærmet bestemmes som summen af de indgående materials sorptionskurver vægtet efter masseandelen af materialet. For beton er cementpastaen det materiale der binder mest vand. Evnen til at indeholde vand afhænger derfor af blandingsforholdet mellem vand og cement (v/c-tallet) i den oprindelige betonblanding. For beton afhænger sorptionsisotermerne yderligere af hydratiseringsgraden, hvilket vil sige mængden af omsat (hydratiseret) cement i forhold til den oprindelige mængde cement.

Da måden materialer kan optage vand afhænger af hvor fugtige omgivelserne er, skelnes der mellem det hygroskopiske og det overhygroskopiske område. Grænsen mellem de to områder er ved ca. 98% relativ fugtighed. Det hygroskopiske område kan groft betragtes som området for sorptionsisotermerne under 98% relativ fugtighed. Intervallet fra 98-100% relativ fugtighed er det overhygroskopiske område, hvor vandoptagelsen ikke kan beskrives præcis til trods for der stadig sker en ganske betydelig vandoptagelse. I det overhygroskopiske område, hvor porerne overvejende fyldes ved kappilarkondensation, er den drivende kraft det hydrostatiske undertryk i modsætning til damptrykket, der virker som den drivende kraft i det hygroskopiske område. For at kunne inkludere det overhygroskopiske område skal suctiontrykket bestemmes og dermed kan vandindholdet medtages i det overhygroskopiske område jf. Figur 2.

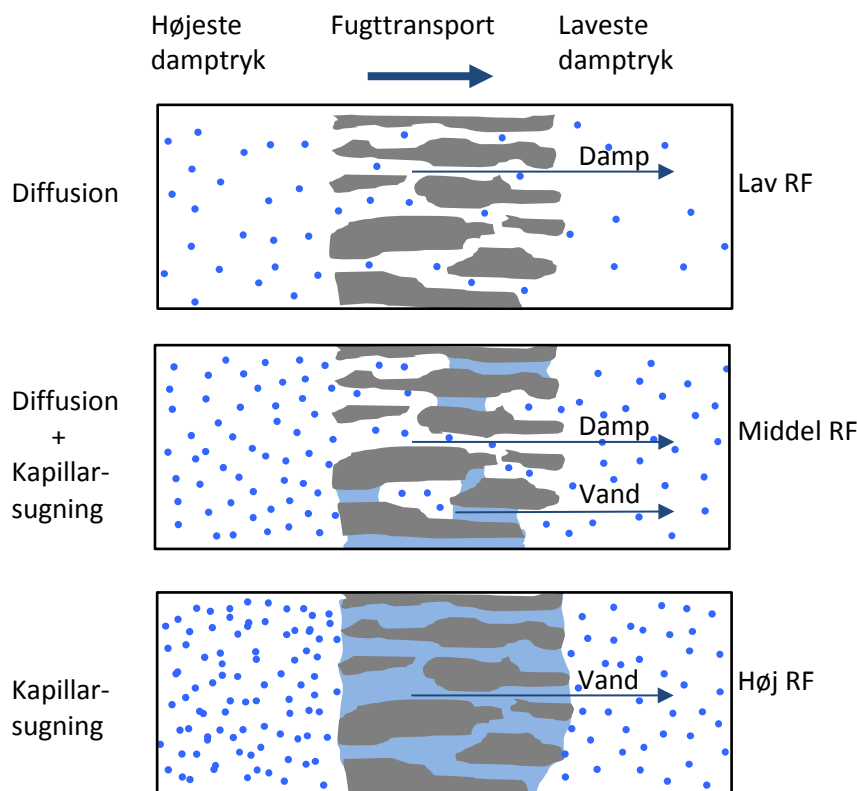


Figur 2. Eksempel på suctionkurve med vandindhold på y-aksen og suctiontryk på x-aksen. Den venstre del af figuren repræsenterer det overhygroskopiske område, mens det grå område repræsenterer det hygroskopiske område (Rode, 1990).

## Fugttransport

Vand kan transporteres gennem materialer på væske og dampform, hvor den drivende kraft kan være forskelle i vandtryk, damptryk eller temperaturer. Yderligere kan drivkraften være kapillarkræfter og lufttryksforskelle. Materialets porestruktur har stor betydning for den hastighed vand og damp drives gennem materialet. Store gennemgående porer i et materiale tillader hurtigere transport end fx materialer med små gennemgående porer. Desuden har porestrukturen også betydning, da vand- og damptransporten vil være lille i lukkede porer, selv for materialer med stor porøsitet.

Damptryksforskelle medfører, at der sker en diffusion fra et højere damptryk mod et lavere. Ved lave relative luftfugtigheder vil fugttransporten udelukkende foregå ved diffusion, ved højere relative fugtigheder kan der i finporøse materialer desuden ske transport ved kapillartransport. Det skyldes at vandmolekyler sætter sig på porevæggene, jo højere relativ luftfugtighed jo flere lag sætter sig, op til ca. 30 lag. I finporøse materialer vil vandmolekylerne fra porevæggene sider efterhånden udfylde poren, hvilket betyder at der kan ske vandtransport ved kapillarsugning. I grovporøse materialer vil porerne være for grove til at porerne fyldes med vand fra luften. På Figur 3 er princippet illustreret.



Figur 3. Fugttransportformer i porøse materialer afhænger af niveauet af den relative luftfugtighed i omgivelserne. Drivkraften for fugttransporten vil være den damptryksforskel på de to sider af et materiale. Ved høje relative luftfugtigheder sætter der sig flere lag vandmolekyler på porevæggene og i finporøse materialer kan det betyde, at der udover diffusion sker kapillarsugning.

I et finporøst materiale som beton vil vanddampperabilitetskoefficienten øges i takt med stigende relative fugtigheder, hvorimod for et grovporøst materiale som tegl vil vanddampperabilitetskoefficienten næsten være konstant.

For grovporøse materialer vil der ske en hurtig opsugning af vand, men med en lille maksimal stighøjde, hvorimod finporøse materialer suger langsomt men har en stor maksimal stighøjde. Kapillarsugning foregår fra vådt til mere tørt uanset retning, det kan således også ske vandret.

For konstruktioner hvor der foruden en damptrykforskel også er en temperaturforskel kan dampen kondensere inde i konstruktionen, som så tilbage-trækkes ved kapillarvirkning, og dermed kan vandet cirkulere lokalt i konstruktionen. Dette skyldes, at damptryk og temperatur driver vanddamp gennem materialet den ene vej, mens kapillarvirkningen suger vand den modsatte vej.

Luftryksforskelle er den sidste drivende kraft som kan skyldes naturligt forekommende vindtryk eller kunstig fremkaldt blæser-luft. Endvidere kan luften både i porer og rum cirkulere pga. trykforskelle der opstår ved varierende temperaturer og herved kan medvirke til at transportere fugt. I nyere bygninger er der ofte mekaniske ventilationsanlæg som kan fjerne den fugtige luft, hvilket også ofte er den teknik, som benyttes i forbindelse med udtørring af bygninger.

## Udtørningsforløb

Bygningskonstruktioner som gulve og vægge, udført i beton, tegl og træ kan indeholde store vandmængder, når de bygges ind i en bygning eller hvis de udsættes for store vandpåvirkninger fra fx oversvømmelser eller vandskader fra utætte installationer. Når konstruktionerne udtørres vil fugten transporteres fra konstruktionernes indre mod overfladerne, hvor fugten fordamper. Denne fugttransport drives af forskelle i fugtindholdet mellem det indre og det ydre. Fugttransporten sker under ikke-stationære forhold, idet situationen ændres med tiden af udtørringen.

Udtørningsperioden kan, afhængigt af materialet have stor betydning for udviklingen af styrke samt råd og svamp. Det har betydning for, hvor hurtigt konstruktionerne kan beklædes med dampstandsede lag som eksempelvis folier.

Udtørringstiden afhænger af flere betingelser, hvoraf flere ændrer sig gennem udtørningsperioden.

- Konstruktionens størrelse og form
- Vandindholdet
- Fugttransporthastigheden i materialet
- Overfladens art
- Maling og beklædning
- Omgivende klima (temperatur, relativ fugtighed og lufthastighed)

Udtørringen af byggematerialer afhænger i stor grad af materialets fugtkapacitet, som er materialets egenskab til at optage og afgive fugt i det hygroskopiske område. Fugtkapaciteten afhænger af materialets densitet og porerstruktur.

Eksempelvis for beton påvirkes udtørringstiden af cementindholdet, v/c-tallet, hydratiseringsgraden og tilslagets porøsitet. Porøs beton med et højt v/c-tal indeholder mere vand end en tæt beton med lavt v/c-tal, der er velhydratiseret. V/c-tallet relaterer sig til betons miljøklasser, hvor beton i passiv miljøklasse har et højt v/c-tal, og 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.

# Udtørings- og beregningsmetoder

Nærværende afsnit beskriver kendte udtøringsmetoder og beregningsmetoder for fugtudtørring, men indeholder også en mere detaljeret beskrivelse af en forceret udtørring med varmekabler der er afprøvet i projektet.

## Udtøringsmetoder

### Simple metoder

#### *Opvarmning og ventilation*

Affugtning kan ske ved opvarmning og ventilation, hvor ventileringen enten sker ved naturlig eller mekanisk ventilation. Udtørring med opvarmning og ventilering sker primært efter mindre og kortvarig vandpåvirkning. Normalt frarådes temperaturer over 30 °C på grund af risikoen for vridning og revnedannelser i materialer. Yderligere indebærer udtøringsmetoder med opvarmning og ventilation risiko for skimmelvækst.

Den korteste udtørringstid opnås ved tilførsel af varm, tør luft, hvilket nemmest opnås om vinteren, hvor udeluftens absolutte fugtindhold er lavt og kan optage store mængder fugt, ved samtidig at sikre god ventilation. Ved opvarmning fra radiator og ventilation via vinduer på klem vil den relative fugtighed i bygningen ligge på op til 90% relativ fugtighed, hvis der ventileres kraftig (Dansk Byggeri, 2014). Udtørring med naturlig ventilation anvendes oftest ved fredede bygninger, da det er en skånsom men også langsom metode. Naturlig ventilation er dog ikke egnet, hvis der er trængt vand ind i hulrum eller opfugtningen er dyberegående.

Udtørring med mekanisk ventilation følger samme princip som ved naturlig ventilation, men da lufthastighederne kan øges, er denne metode mere effektiv. Den øgede lufthastighed medfører, at der sker en større fordampning fra overfladerne, samtidig med at luftsiftet kan være 5-15 gange i timen. Ved mekanisk ventilation skal det sikres, at der ikke skabes overtryk i bygning som presser fugten ud i konstruktionen. Dette kan sikres ved at have åbninger til det fri eller udsugning.

Udtørring med naturlig eller mekanisk ventilation kan være energikrævende, og normalt anvendes der ikke varmegenvinding ved mekanisk ventilation. På grund af det potentielt høje energiforbrug kombineret med risikoen for skimmelvækst, anbefales det derfor at udtørring sker med sorptionsaffugtere, der fungerer ved lavere temperaturer (Byg-Erfa, 2010, 2012).

#### *Kondens- og sorptionsaffugtere*

Alternative udtøringsmetoder til opvarmning kombineret med ventilation er brugen af kondens- og sorptionsaffugtere med recirkulation (Byg-Erfa, 2012). Kondens- og sorptionsaffugtere anvendes, hvor store vandmængder er trængt dybt ind i materialer eller hulrum. Affugterne anvendt på mindre afgrænsede områder som fx bygningsafsnit, sikrer en effektiv affugtning året rundt. Ved brug af affugtere kan den affugtede luft sendes ind i hulrum, så der sker en ensartet udtørring på begge sider af konstruktionerne. For at undgå revner må affugtningen ikke ske for hurtigt, men på den anden side vil en for langsom affugtning øge risikoen for skimmelvækst.



I kondensaffugteren ledes den fugtige rumluft hen over en køleflade, hvor fugten kondenserer og opsamles eller afledes til afløb. Metoden baserer sig på 100% recirkulation, hvorfor bygningen skal holdes tæt lukket. Ved kondensaffugtning kan der opnås en relativ luftfugtighed på 40% i bygningen. Metoden fungerer dog dårligt ved temperaturer under 10 °C og ved lave relative luftfugtigheder.

Sorptionsaffugtning er mere effektiv ved 0-15 °C end kondensaffugtning, og så i dette tilfælde holdes bygningen tæt mens luften recirkuleres. Den fugtige rumluft ledes ind i en langsomtgående rotor, hvor fugten fra rumluften optages i en ad-sorbent. I et andet kammer/zone opvarmes ad-sorbenten, hvorfra fugten afgives til udefrakommende luft, inden den ledes til det fri. Der kan opnås en relativ luftfugtighed ned til 10% på indblæsningsluften i rummet. Sorptionsaffugtning kan fungere ved både meget lave og meget høje relative luftfugtigheder, og kan kombineres med varmegenvinding.

#### *Opvarmning med infrarød stråling*

Udtørningsmetoden med opvarmning med infrarød stråling egner sig bedst til små, partielle vandskader fx ved rørskader i uorganiske baderumsvægge. Udtørringen skal kombineres med ventilation som for de øvrige udtørningsmetoder med opvarmning.

#### **Elektrokemiske processer**

Til udtørring af fugtige konstruktioner kan elektroosmose også bruges, hvor vandets indhold af positive og negative ioner udnyttes til at transportere fugten. Metoden er typisk anvendt ved problemer med opstigende grundfugt, oversvømmelse i kældre og utætte tage.

For at få vandet til at "vandre" i konstruktionen skal der etableres et elektrisk felt, hvor vandet så "vandrer" fra den negative elektrode (katoden) mod den positive elektrode (anoden). Ved anoden skal det så være muligt at lede vandet bort, så der ikke opstår følgeskader af fugttransporten ud af konstruktionen. Det er ionernes bevægelse i konstruktionens våde porer der giver en fugttransport, fordi der er flest frie positive ioner.

En af fordelene med elektroosmose er at metoden ikke kræver indgreb i konstruktionerne. På den anden side er metoden nok mest kendt fra murværk, mens der ikke er store erfaringer med materialer som beton og natursten.

Desuden er det erfaringen, at metoden kun virker på meget våde materialer og derfor ikke kan forventes at tørre materialer ned til et niveau, der normalt anses for at være tilstrækkeligt tørt.

#### **Forceret udtørring med varmekabler**

I nogle tilfælde kan det være ønskeligt at sætte udtørningshastigheden kraftigt i vejret, fx ved vandskader, så perioden med genhusning kan forkortes eller i nybyggeri, hvor entreprenøren står overfor dagbøder, hvis projektet forsinkes.

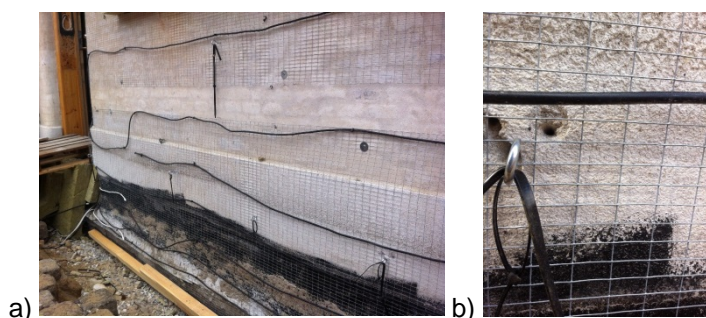
Ved en forceret udtørring med varmekabler opvarmes den opfugtede konstruktion betydeligt i forhold til omgivelsernes temperatur. Opvarmningen sker med varmekabler eller alternativt vandbårne varmeslanger med en effekt på 100-150 W/m<sup>2</sup> placeret på overfladen af den opfugtede konstruktion, hvorover der placeres en diffusionsåben isolering for at begrænse varmetabet.

Den påsatte varme driver fugten mod koldere områder, hvilket er årsagen til, at isoleringen skal være diffusionsåben, så fugten kan transporteres til overfladen og bortventileres. Yderligere sikrer isoleringen, at opvarmningen af konstruktionen bliver mere effektiv med et reduceret energiforbrug.

Metoden kan benyttes til både vægge og gulve, og benyttes fortrinsvis på beton, tegl og lignende materialer. Disse materialer kan tåle en del i forhold til opvarmning, men metoden skal stadig benyttes med varsomhed af hensyn til risikoen for revnedannelse.

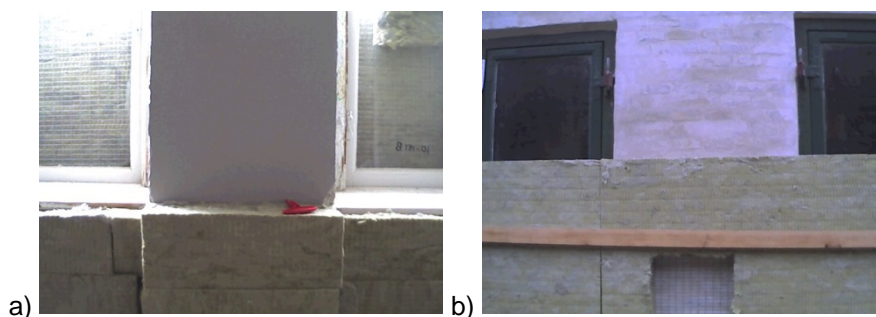
#### *Forsøg i praksis*

I *Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen* blev metoden med forceret udtørring med varmekabler afprøvet. I forbindelse med renoveringen af to Nyboder-stokke i København, som er et fredet byggeri med massive teglstensfacader, blev et demonstrationsforsøg udført. Efter facadeafrensning og indlagt fugtspærre og et ellers fornuftigt udtørningsforløb, var der stadig områder af facaderne med for høje fugtniveauer i forhold til det videre arbejde i renovering og i forhold til den ønskede indflytningsdato. Et prøveområde blev derfor stillet til rådighed for afprøvning til forceret udtørring med varmekabler. Forsøget blev afprøvet med vandrette elkabler placeret på facaden med plastik strips på trådnet. Kablerne blev placeret tættest ved fundamentet, hvor konstruktionen var mest fugtig og med større afstand længere oppe på væggen, som vist i Figur 4.



Figur 4. a) Varmekabler placeret vandret på facaden med stor tæthed ved fundamentet og øget afstand oppefter. b) Nærbillede af varmekabler fastgjort med strips til trådnet.

Varmekablerne blev styret ved brug af termostater, så temperaturen kunne fastholdes på 50 °C, hvilket i dagtimerne medførte en temperaturforskel på 25-30 °C. Den påsatte effekt hertil var 100 W/m<sup>2</sup> af facaden, dog 150 W/m<sup>2</sup> ved fundamentet. Figur 5 viser isoleringens placering indvendigt og udvendigt på facaden ovenpå varmekablerne.

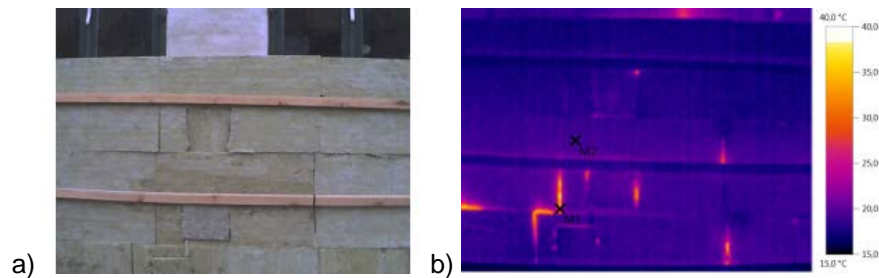


Figur 5. a) Indvendigt er isoleret op til underkanten af vinduerne. b) Det ses, at der udvendigt er isoleret længere op end den indvendige isolering. Et felt af den udvendige isolering er fjernet i forbindelse med termograferingen.

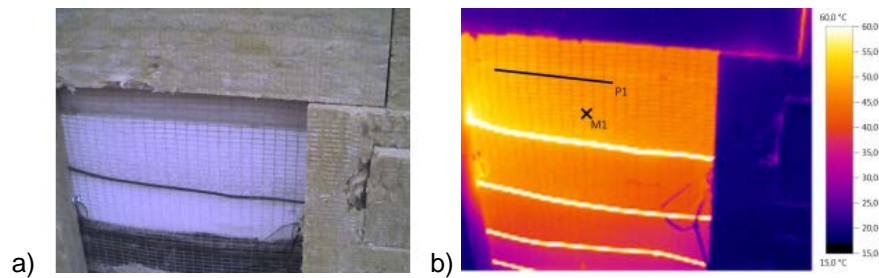
I forsøgsperioden blev fugtmålinger af facaderne udført med en neutronkildemåler (Troxler). Neutronkildemåleren giver et "tælleantal" baseret på neutroner som sendes ind i materialet og reflekteres ved sammenstød med

atomkerner. Hvis atomkernerne er tunge, reduceres hastigheden af neutronerne kun lidt, men hastigheden reduceres kraftigt ved sammenstød med de lette brintkerner, der er bundet i vand. Neutronkildemåleren tæller kun de langsomme neutroner, der reflekteres, og det vil i det væsentligste kun være de neutroner, der har haft sammenstød med brint i vandform. Antallet af de reflekterede, langsomme neutroner måles og giver et udslag, der kaldes "tællertallet".

Ved forsøgets afslutning efter ca. 4 uger var "tællertallene" halveret, hvilket vurderedes til at være en tilfredsstillende udtørring. Der blev ikke udtaget sten til eksakt bestemmelse af vandindholdet, men udelukkende benyttet neutronkildemåler. Yderligere blev facaderne termograferet for at afsløre utilsigtede varmetab (Figur 6), og for at registrere den påsatte temperatur (Figur 7).



Figur 6. a) Udvendig isolering af facaden og b) termografering af a). Skala går fra 15-40 °C med spring på 5 °C. Bortset fra nogle steder med knap så tætte samlinger, sikrer isoleringen effektivt at varmen fra kablerne fordeles til væggen.



Figur 7. a) Hul i udvendig isolering af facaden og b) termografering af a) straks efter isoleringen er fjernet. Skala går fra 15-60 °C med spring på 5 °C.

Der blev ikke registreret nye revner eller andre skader på byggeriet som følge af opvarmningen.

Energiforbruget til forsøgene blev ikke registreret til trods for at der blev gjort en indsats herfor, da flere årsager på byggepladsen forhindrede dette. En overslagsberegning på energiforbruget til den forcerede udtørring er udført. Ved fx  $150 \text{ W/m}^2$  på ydervæggen og en gennemsnitlig døgn temperatur på ca.  $15 \text{ °C}$  (sommermåned) vil der være et varmetab fra væggenes inder- og yderside på  $20 \text{ W/m}^2$ . Det medfører et forbrug på ca.  $4 \text{ kWh/m}^2$  pr. døgn. Reelt må dog påregnes et lidt større forbrug på grund af varmetabet op mod de uisolerede vinduer samt ned mod jorden.

Forsøget viste, at det var muligt at opvarme en konstruktion lokalt og forcere udtørring af konstruktionen. Der vil være et vist energiforbrug til opvarmningen, men metoden har alligevel visse fordele, specielt når tiden bliver en vigtig faktor for et projekt.

## Dokumentationsmetoder

Neutronkildemåleren (Troxlere) som blev nævnt i *Forceret udtørring med varmekabler* er en relativ målemetode som kan give en fugtfordeling i en konstruktion. For at få et absolut fugtindhold kræves det, at der kan udtages prøver, hvor fugtindholdet kan bestemmes ved fx veje-tørre-veje-metoden (Brandt, 2013). I modsætning til neutronkildemålere findes der andre metoder, som oftere anvendes til at bestemme absolutte fugtforhold i konstruktioner som fx fugtfølere i borehuller.

### Fugtfølere i borehuller

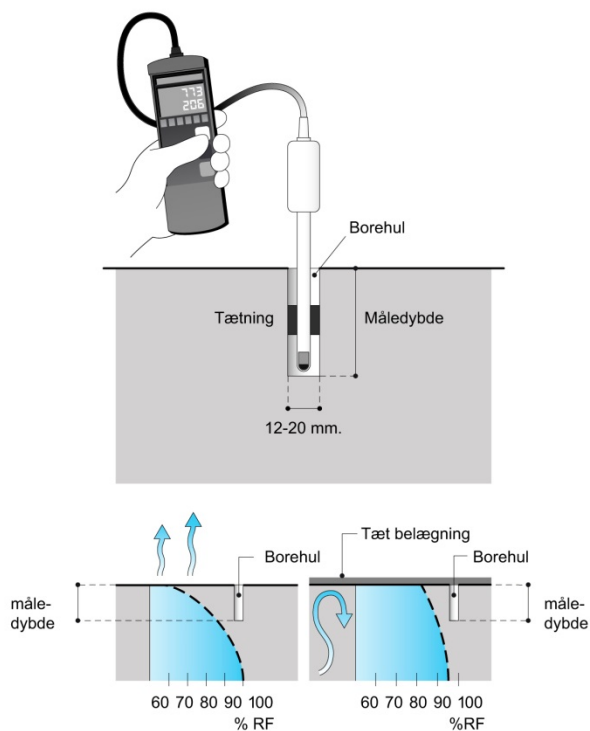
Den oftest anvendte metode til fugtmåling i uorganiske materialer som fx beton består i at anbringe en fugtføler i et tæt lukket borehul i konstruktionen. Herved vil fugtføleren måle den relative fugtighed i borehullet, som skal måles, når der er opnået ligevægt mellem konstruktionen og luften i borehullet. Ligevægten opnås typisk efter flere dage ved et lukket borehul (Brandt, 2013). Borehullets dybde er valgfri, men oftest bores der indtil midten af konstruktionen, se Figur 8-Figur 10. Dybden afhænger af om der er ensidig eller dobbeltsidig udtørring, hvor der måles i 40% af tykkelsen ved ensidig udtørring og 20% af tykkelsen ved dobbeltsidig udtørring. I SBI-anvisning 224 (Brandt, 2013) er flere fugtmålemetoder beskrevet, hvor der også fokuseres på andre byggematerialer end beton.



Figur 8. Forskellige modeller af målere til måling af fugt i borehuller mv. Th. en nyt typer udstyr hvor der kan anvendes flere forskellige følere på samme instrument; her vist med føler til borehuller (den blå) og isolerede stikben (længst til højre). Ved måling i borehuller kan der anvendes flere følerhoveder, som kan efterlades, indtil der er opnået ligevægt, mens instrumentet i mellemtiden kan anvendes til andre formål (Brandt, 2013).



Figur 9. Måling af ligevægtsfugt i borehul i betonvæg. Hullet skal renses godt, og der skal ventes i lang tid – flere døgn – før der er fugtligevægt mellem luften i borehullet og det omgivende materiale. Først når der er ligevægt, kan der måles korrekt (Brandt, 2013).



Figur 10. Fugtmåling i beton etc. kan ske ved måling af den relative luftfugtighed i et hul, som bores i betonen. Der måles normalt i 0,4-0,5 gange betonlagets tykkelse. Ved måling i forbindelse med gulvlægning svarer dette til, at det målte fugtindhold nogenlunde svarer til fugtindholdet under belægningen, når der er opnået ligevægt, se de to nederste figurer (Brandt, 2013).

## Beregningsmetoder

Beregningsmetoder til bestemmelse af fugtudtørring findes i simple beregningsmodeller og som mere komplicerede simuleringstvækketøjer. I de følgen-

de afsnit beskrives fem beregningsmetoder, der har forskellige forudsætninger ganske kort. Generelt for alle de beskrevne beregningsmetoder er, at de kun regner på en enkelt konstruktion, dvs. ikke regner på en hel bugning.

### Aalborg Portland model

Beregningsmodellen er udviklet af Aalborg Portland efter Nilsson (1977), og kan benyttes til at estimere udtørringstiden for et betongulv, og er alene baseret på empirisk viden. Metodens umiddelbare brug er til ensidet udtørring, men den kan også anvendes, med forsigtighed, til tosidet udtørring. Hvis det fx er et etagedæk, skal der i Aalborg Portland modellen vælges en pladetykkelse på det halve af konstruktionstykkelsen og underlaget vælges som folie. Modellen anvender visse forsimplinger og forudsætninger, som fx at der kun regnes endimensionel fugttransport og konstante temperatur- og fugtforhold i omgivelserne.

Et program baseret på Aalborg Portland modellen er udviklet til at beregne udtørringen efter beskrivelsen i Beton-Bogen, afsnit 3.4 (Nielsen, 1985). Dette program kan downloades fra Aalborg Portlands hjemmeside (Aalborg Portland, 2014).

### Byg-Erfa model

Byg-Erfa har udviklet en model, der ved en forenklet metode kan beregne udtørringstiden for forskellige byggematerialer. Modellen kan ikke benyttes til at regne på sammensatte konstruktioner med forskellige materialelag. Metoden kan dog give et overslag på udtørringstiden for isoleringen i en træskelet væg, hvis pladebeklædningen er fjernet. Beregningsmetoden er baseret på flere forsimplinger, fx kan nævnes, at der kun regnes på diffusion, fugttransporten er endimensionel, fugtindholdet i materialets overflade er konstant i udtøringsperioden, der er konstante temperaturforhold samt andre forudsætninger. Det fulde sæt af forudsætninger kan findes i BYG-ERFA blad (99) 100527.

### Match, WUFI, TorKaS

For mere udførlige beregninger af udtøringsforløbene end muligt med Aalborg Portland og Byg-Erfa modellerne kan anvendes simuleringstværværktøjer som fx Match (Bygge & Miljøteknik, 2014), WUFI (Fraunhofer, 2014) eller TorKaS (Fuktcentrum, 2014). Ved anvendelse af simuleringstværværktøjer kan der regnes på sammensatte og eventuelt flerdimensionale konstruktioner, men beregningerne vil altid være påhæftet med en usikkerhed omkring de valgte randbetingelser. Hvis der anvendes affugtere kan disse være med til at eliminere usikkerhederne omkring beregningernes randbetingelser.

- *Match* er et PC-program til ikke-stationære 1D beregninger af de indbyrdes afhængige transporter af fugt og varme gennem sammensatte bygningskonstruktioner.
- *WUFI* er et PC-program til beregning af koblede varme og fugttransport i bygningsdele og konstruktioner. WUFI kan udføre ikke-stationære beregninger i bygningsdele og konstruktioner bestående af flere lag og randbetingelser. Programmet findes til såvel 1D som 2D beregninger.
- *TorkaS* er et PC-program til at vurdere udtørringstider for nye betonkonstruktioner. Beregningerne baserer sig på kendte teorier samt et stort antal forsøg. Programmet tager konstruktionsopbygning, placering, tidsplan og betonkvalitet i vurderingen af udtørring. TorkaS er baseret på svenske cementtyper.

# Byggefugt, udeklima og indeklima

## Fugtkilder

Bygningers fugtpåvirkning kan deles op i fem områder, som hver især kræver sine forholdsregler i projektering, udførelse og vedligeholdelse:

- Byggefugt
- Udeklima
- Jordklima
- Indeklima
- Lækager

Byggefugt betragtes som den fugt, som tilføres byggeriet under arbejdet enten fra fugten i byggematerialer eller fra vejrlig. Oftest har udeklimaet en opfugtende påvirkning, mens indeklima vil have en positiv påvirkning på mængden af byggefugt, hvis fx materialer opbevares indendørs i stedet for udendørs.

Lækager omtales ikke, da det defineres som vandholdige installationer fx vand og afløbsinstallationer, der antages at være tætte eller først i brug ved ibrugtagning af bygningen. Det vil dog være en anden situation, hvis der er tale om renovering, men dette er ikke medtaget i denne rapport.

## Byggefugt

Mange byggematerialer tilføres fugt under produktionen, hvilket er særligt ved beton, porebeton, cementholdig mørtel, gipsprodukter og mange malinger og pudsprodukter. I processerne har vand flere funktioner, fx indgår det som en kemisk bestanddel eller som "smøremiddel" for at give produkterne passende bearbejdelse. Vand som "smøremiddel" er overskudsvand set i forhold til bygningens brug.

Træ er et andet materiale, som kan leveres med forskellige fugtindhold, hvilket kan betyde, at det leveres med et højere fugtindhold end hvad der er hensigtsmæssigt.

Byggefugt kan desuden tilføres byggematerialer under oplagring på produktionssted eller byggeplads. Især er byggerier særligt udsatte for øget byggefugt, hvis de ikke kan beskyttes mod vandpåvirkning. Det er derfor også af særlig stor interesse, at bygninger kan lukkes hurtigst muligt, og at de anvendte produkter er i ligevægt med det fremtidige brugsklima.

## Udeklima

Udeklimaet beskrives blandt andet ved temperatur, relativ fugtighed, nedbør, vind og solstråling. Nedbør og vind har stor betydning for byggefugten i konstruktioner under opførelse.

Ved konstruktioner der vender mod jord, vil jorden være udeklimaet. Her afhænger klimaet i vid udstrækning af nedbøren i udeklimaet og jordens porøsitet men også af vandopløselige salte, som med fugten kan transporteres ind i porøse materialer. Herved kan det være sværere at opnå en udtørring af byggeriet.

Danmark er et land med et relativt ensartet klima, hvilket også gør sig gældende ved at der findes ét design reference år (DRY), men der kan dog være store lokale forskelle til trods herfor.

### Graddøgn

Graddøgn har betydning for varmetabet fra konstruktioner og varierer afhængig af bygningens placering i Danmark. Tabel 1 angiver forskellige graddøgn for Danmark samt gennemsnittet for landet.

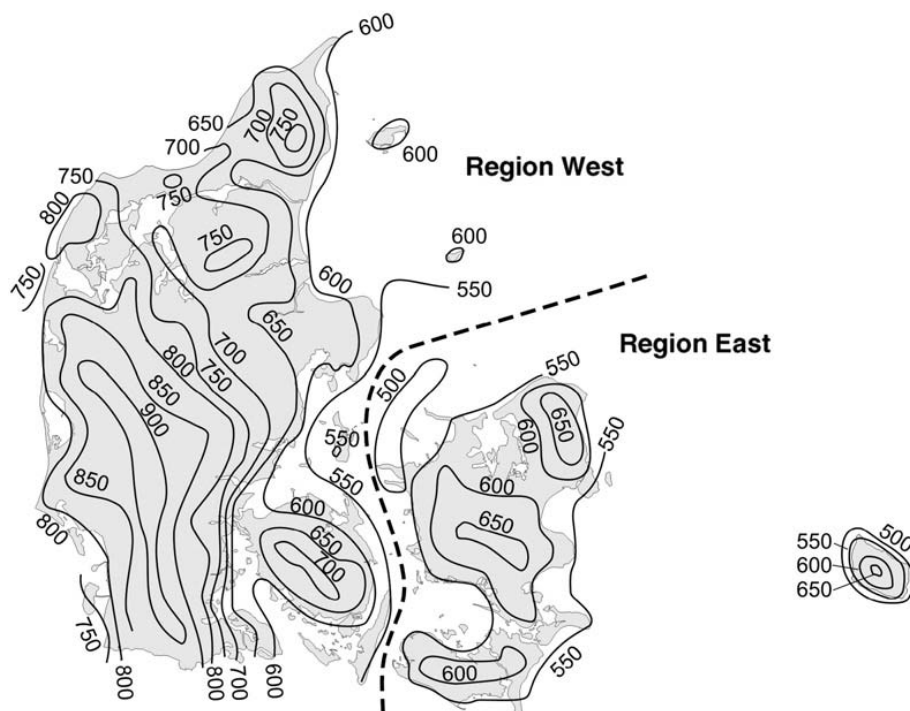
Tabel 1. Graddøgn for Danmark inddelt efter geografisk placering samt forholdet,  $D_i$ , mellem landsgennemsnittet og den geografiske placering.

Geografisk placering	Graddøgn	$D_i$
Nordjylland	3466	1,033
Midt- og Vestjylland	3552	1,058
Østjylland	3361	1,001
Syd- og Sønderjylland	3385	1,008
Fyn	3291	0,980
Vest- og Sydsjælland samt Lolland-Falster	3279	0,977
København og Nordsjælland	3197	0,952
Bornholm	3324	0,990
Landsgennemsnit	3357	1,000

### Nedbør, vind og slagregn

Mængden af slagregn på bygninger afhænger både af nedbørsmængde og vindpåvirkning, disse dele bestemmes i høj grad af af geografisk placering, placering i landskabet (terrænklasser) i forhold til vindpåvirkning og af bygningens orientering og geometri. Fx er høje bygninger mere udsatte for store mængder slagregn end lave bygninger.

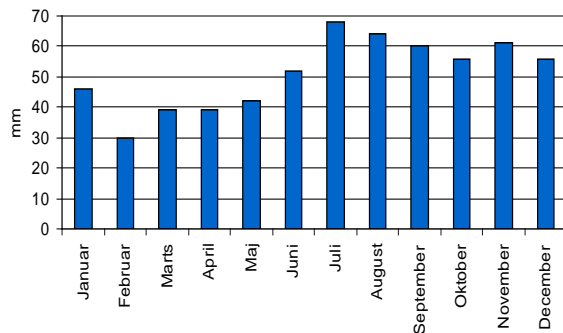
Figur 11 viser den gennemsnitlige nedbør i Danmark, og det ses tydeligt, at der er lokale variationer.



Figur 11. Gennemsnitlig årlig nedbør i mm for standard års perioden 1961-1990, fordelt på øst og vest Danmark (Madsen, Arbjerg-Nielsen & Mikkelsen, 2009).

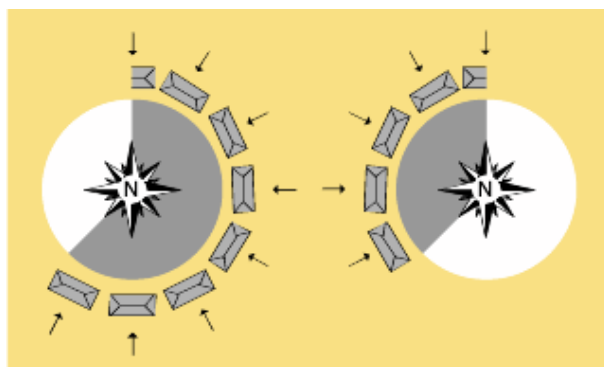
Udover en regional forskel i nedbøren, er der også årsvariationer som vist for København på Figur 12.





Figur 12. Månedsmiddelværdierne for nedbør i københavnsområdet i perioden 1961-90 hentet fra DMI.

Klimaskærmens vindpåvirkning afhænger i stor grad af orienteringen af facaden. I Byg-Erfa (2009) oplyses det, at klimaskærme, som er orienteret mod retninger fra nord-øst-sydsydvest regnes udsat for cirka 20 % mindre vindkræfter end ved orientering mod sydvest-vest-nord (se Figur 13).



Figur 13. Vind belastningen og dermed sandsynligvis også slagregnsbelastningen kan regnes for cirka 20 % mindre på facader orienteret som vist til venstre i forhold til orienteringer som fremgår af figuren til højre (Byg-Erfa, 2009).

Yderligere nævner Byg-Erfa (2009), at i en 25 km bred randzone langs Jyllands vestkyst og Ringkøbing Fjord regnes vindkræfterne for cirka 20 % større end andre steder i Danmark. Vindpåvirkningen afhænger desuden af terrænklasse som bygningen er placeret i, hvilket skal vurderes i det konkrete tilfælde. Eksempler på terrænklasser kan ses i Byg-Erfa (2009).

Tabel 2. Brugerdefineret landskabsfaktor,  $D_{land}$ , der tager hensyn til terræn.

Landskab	$D_{land}$
Bymæssig	1
Åben	2
Højhus	3

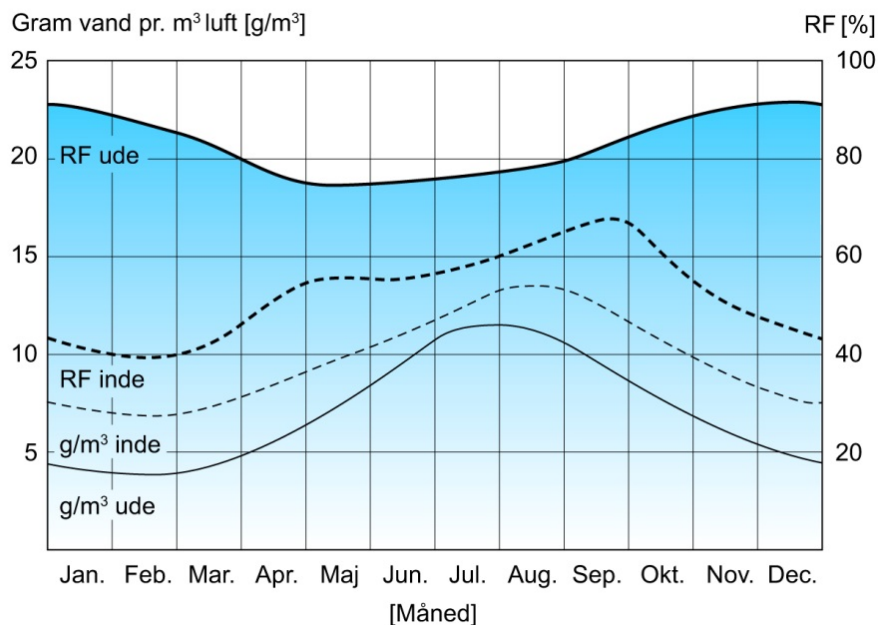
Slagregnsens påvirkning af nedbør og vindstyrke og retning er illustreret i Tabel 3, hvor oplysninger om slagregnsmængder for København og Fanø er angivet.

Tabel 3. Slagregnsmængder i København og Fanø fordelt på forskellige orienteringer.

mm/år	S	SV	V	NV	N	NØ	Ø	SØ
København	90	129	115	59	34	38	42	47
Fanø	275	391	355	186	84	80	107	146

## Indeklima

I forhold til byggefugt kan indeklimaet have en reducerende effekt på byggefugt. Byggematerialer opbevaret i fuldt eller delvist opvarmede bygninger og beskyttet mod nedbør, kan forventes at have mindre byggefugt end materialer opbevaret afdækkede eller under åben overdækning. Figur 14 viser den gennemsnitlige variation i ude- og indeklimaets luftfugtighed, mens Tabel 4 angiver sammenhængen mellem månedsmiddel temperatur og relativ fugtighed for udeklimaet i henhold til test referenceåret (TRY).



Figur 14. Typisk variation af vandindhold og den relative luftfugtighed ud og inde gennem året for boliger. Indetemperaturen er regnet til 23°C i juli og august, 22°C i juni og september, og 20°C i resten af året (Brandt, 2013).

Tabel 4. Månedsgennemsnit af udeluftens temperatur og relativ fugtighed iht. referenceåret TRY (Brandt, 2013). Værdierne er anvendt i beregningsværktøjet udviklet i projektet.

Måned	Temperatur °C	Relativ fugtighed %
Januar	-0,6	94
Februar	-1,1	91
Marts	2,6	91
April	6,6	82
Maj	10,6	78
Juni	15,7	67
Juli	16,4	74
August	16,7	71
September	13,7	85
Oktober	9,2	87
November	5,0	91
December	1,6	88

# Situationer på byggepladsen

Byggematerialer fugtindhold har stor betydning på energiforbruget og tiden det tager at udtørre fx et nybyggeri til et acceptabelt fugtniveau for videre arbejde. Fugtindholdet afhænger som tidligere nævnt af den tilførte vandmængde i produktionsprocessen, men også i stor grad af opbevaringen på byggepladsen. For at belyse fugtindholdet under forskellige situationer på byggepladsen er der udført hygrotermiske simuleringer af fire situationer (nr. 2-5) for opbevaring af materialer. Yderligere er fugtindholdet for 3 andre situationer også bestemt (nr. 1 samt 6-7). Situationerne afspejler forskellige afdæknings- og opbevaringsmetoder samt krav til hvor tørre materialerne skal være før der ikke længere er noget udtørningsbehov. Følgende tidspunkter og situationer anses for at være relevante:

## 1 *Levering på byggeplads*

Fugtindholdet i byggematerialer ved levering på byggeplads afhænger i høj grad af materialet. For et betonelement vurderes det fx at elementet leveres efter hydratiseringen har fundet sted. Fugtindholdet i materialet afhænger desuden af mængden af tilsat vand under fremstilling eller vand tilført efter produktion, hvilket ofte er under opbevaring.

## 2 *Efter regnpåvirkning*

Det forventes, at fugtindholdet i forskellige byggematerialer er højere efter længere tids regnpåvirkning end ved levering på byggepladsen. Hvor følsomt et materiale er overfor vandindtrængning efter regnpåvirkning er afhængig af materialets egenskaber.

## 3 *Opbevaring under ventileret overdækning (vinter/sommer)*

Når materialer opbevares under en ventileret overdækning forventes det, at materialerne vil opnå ligevægt med omgivelserne. Hvor hurtigt de opnår ligevægt med omgivelser er dog materialeafhængige og påvirkes af opførelsesperiode (sommer/vinter) samt udeklimaet.

## 4 *Opbevaring i en opvarmet bygning med 30% RF inde (vinter/sommer)*

Når materialer opbevares i en bygning, som kan være delvist eller helt opvarmet, forventes materialerne efter et stykke tid at opnå en ligevægt med den relative fugtighed i indeklimaet for hhv. en sommer- og vintersituation. Ligesom situation 3 er dette afhængig af materialeegenskaber og randbetingelser for indeklimaet.

## 5 *Opbevaring i en opvarmet bygning med 50% RF inde (vinter/sommer)*

Som situation 4 men med anden relativ fugtighed i indeklimaet.

## 6 *Videre arbejde*

Normalt vil den relative fugtighed være fastsat til 75% for videre arbejde. For beton kan der bruges 85% relativ fugtighed, da beton ikke er følsomt overfor fugt på samme måde som organiske materialer. Der skal være øget opmærksomhed på, hvilke krav der sættes til de materialer som betonen bygges sammen med i bygningen. For eksempel kræver trægulvproducenterne at den relative fugtighed ikke overstiger 65% i rumluften.

## 7 *Driftssituation (i brug)*

Driftssituationen er sat til 50% relativ fugtighed som vil optræde efter længere tids ophold i/brug af bygningen.

For situationerne på byggepladsen beskrevet under punkt 3-5, er der udført 1D hygrotermiske simuleringer i WUFI Pro på ydervægge og skillevægge til bestemmelse af den relative fugtighed i forskellige byggematerialer. Resultaterne fra simuleringerne danner baggrund for bestemmelse af vandindholdet i de forskellige byggematerialer, baseret på sorptionskurver, som fx findes i WUFI Pro (Fraunhofer, 2014), SBI-anvisning 224 (Brandt, 2013) eller i et sorptionskatalog (Hansen 1986).

Ved simuleringer af situation 3-5, beregnes der en relativ fugtighed efter 3 og 6 måneder for at tage hensyn til opførelsestidspunkt hhv. sommer og vinter samt randbetingelser for inde- og udeklima. Tabel 5 viser de forskellige scenarier af randbetingelser for simuleringerne af ydervægge og skillevægge.

Tabel 5. Randbetingelser for en ydervæg og skillevæg ved situation 3, 4 og 5 på byggepladsen. a betegner en vintersituation, mens b betegner en sommersituation.

Situation	Ydervæg		Skillevæg	
	Ude	Inde	Ude	Inde
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>
4a	Udeklima	20 °C, 30% RF	20 °C, 30% RF	20 °C, 30% RF
4b	Udeklima	20 °C, 30% RF	20 °C, 30% RF	20 °C, 30% RF
5a	Udeklima	20 °C, 50% RF	20 °C, 50% RF	20 °C, 50% RF
5b	Udeklima	20 °C, 50% RF	20 °C, 50% RF	20 °C, 50% RF

<sup>1)</sup> Hvis Udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen, eller på begge sider af en skillevæg, bliver der regnet uden sol og regn.

Der er regnet på betonelementer, porebeton, betonsandwichelementer samt letklinkerbeton, hvor de overordnede resultater er gengivet i *Byggematerialer*.

# Byggematerialer

I Danmark anvendes typisk cementbaserede byggematerialer fx beton som in-situ støbt eller elementer men også letklinkerbeton og porebeton. I mindre grad er bygninger opført udelukkende med lette konstruktioner. Dertil er et begrænset antal nyere bygninger med for- og bagmur af tegl, dog hovedsageligt i en-familieboliger. I følgende afsnit fokuseres hovedsageligt på byggematerialer indeholdende beton:

- Betonelementer
- Porebeton
- Sandwichelementer
- Letklinkerbeton

Nærværende afsnit indeholder udvalgte resultater for ovenstående materialers relative fugtighed afhængig af levering og opbevaring på byggepladsen efter 3 måneder. I bilagene findes desuden beregningsresultater efter 6 måneders udtørring og forskellige tykkelser af konstruktionerne. Yderligere findes i *Bilag 4 – Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg* et beregningseksempel udført i WUFI for en beton ydervæg og skillevæg med et v/c-tal på 0,6. Rapportens bilag indeholder også data og resultater for de andre konstruktionsopbygninger:

- *Bilag 5 – Resultater for betonelementer*
- *Bilag 6 – Resultater for porebeton*
- *Bilag 7 – Resultater for sandwichelementer*
- *Bilag 8 – Resultater for letklinkerbeton*

## Betonelementer

Beton kan leveres med mange forskellige materialeegenskaber som afhænger af anvendelsesområde. Det givne anvendelsesområde er med til at bestemme miljøklasse, v/c-tal og styrkeklasse. I produktionen af beton anvendes store mængder vand, hvor en beton i passiv miljøklasse har størst vandindhold og en ekstra aggressiv beton mindst vand ved produktion.

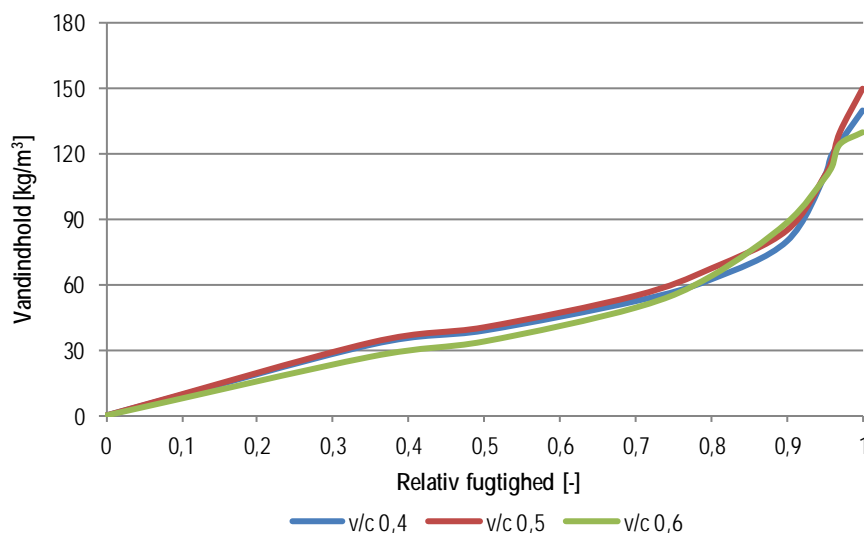
Eksempelvis er mængden af frit vand som skal udtørres i en beton afhængig af betonens v/c-tal, da cementen vil binde ca. 40% af sin vægt som kemisk og fysisk bundet vand. En beton med et v/c-tal på 0,5 (150 liter vand i forhold til 300 kg cement) indeholder 30 liter frit vand pr. m<sup>3</sup> (150-300 x 0,4 = 30 liter). Tilsvarende indeholder en beton med et v/c-tal på 0,4 (120 liter vand i forhold til 300 kg cement) 0 liter frit vand. Det betyder, at et v/c-tal på 0,4 giver en beton, der er selvudtørrende, og ikke indeholder overskydende vand, der kræver udtørring.

Tabel 6 og Figur 15 angiver egenskaberne for 4 typer af beton, der vurderes at være repræsentative for de fire miljøklasser; passiv, moderat, aggressiv og ekstra aggressiv. Da der ikke er materialeegenskaber for ekstra aggressiv beton i WUFI er denne slået sammen med aggressiv beton. For aggressiv og ekstra aggressiv beton vil det overskydende vand blive brugt ved hydratiseringen af cementen, hvilket betyder, at der ikke er noget ekstra vand at udtørre.

Simuleringer i WUFI (se fx *Bilag 3 – Vandindtrængning og Bilag 4 – Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg*) har vist at ydervægge i beton udsat for det danske klima har en vandindtrængningen i det yderste 1 cm af et betonelement. For vandrette betondæk må det formodes, at der opstår vandpytter, og dermed sker der en større indtrængning i elementet end 1 cm. Vandindtrængningsdybden har stor betydning for, hvor meget fugt der skal udtørres. Det vil ikke være realistisk at forvente, at hele tykkelsen af betonelementet bliver opfugtet og skal udtørres efter en regnpåvirkning hverken for vægge eller dæk.

Tabel 6. Materialeegenskaber for fire beton i forskellige miljøklasser (WUFI, 2014).

Miljøklasse	v/c	Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porøsitet, p [%]	Varmekapacitet, $c_p$ [J/kg K]	Varmeledningsevne, $\lambda$ [W/m K]
Passiv	0,60	2291	0,15	850	1,7
Moderat	0,50	2308	0,15	850	1,7
Aggressiv	0,40	2322	0,14	850	1,7
Ekstra aggressiv	0,35				



Figur 15. Sorptionskurver for beton angivet i Tabel 6 (WUFI, 2014).

For beton som leveres til byggepladsen, vurderes det, at betonelementer har opnået deres 28 døgns styrke, og at det meste af hydratiseringen har fundet sted. Den relative fugtighed ved levering af betonelementer er angivet i Tabel 7-Tabel 12 jf. værdier fra Fabriksbetongruppen (2013). Den relative fugtighed for passiv beton er ekstrapoleret ud fra de øvrige.

Vandindholdet i en ydervæg,  $w$  [kg/m<sup>3</sup>] ved regnpåvirkning bliver tilsvarende beregnet efter formel 1 gennem en lagdeling af konstruktionen, hvor den yderste 1 cm opfugtes til 99,5% RF, mens det underliggende lag har samme fugtforhold som ved levering på byggeplads. Betonelementets samlede tykkelse betegnes  $d$  [m].

$$W_{\text{element}} = \frac{0,01 w (99,5 \text{ RF}) + (d - 0,01) w (RF_{\text{levering}})}{d} \quad (1)$$

Tabel 7-Tabel 12 angiver den relative fugtighed og vandindholdet for 10 cm tykke yder- og skillevægge i forhold til situationer på byggepladsen. I *Bilag 5 – Resultater for betonelementer* findes yderligere relative fugtigheder for 10 cm og 20 cm tykke betonelementer for scenarierne 3-5 efter 3 og 6 måneders simulering af udtørring.

### Miljøklasse: Passiv

Tabel 7. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,6. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	95	109
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	111,2 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	93	101
3b. Ventileret overdækning, sommer	90	89
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	85	76
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	82,5	70
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	92	97
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	85,5	87
6. Videre arbejde	75	57
7. Driftssituation	50	34

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middel-værdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 130,8 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 8. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,6. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	95,0	109,0
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	93,5	103,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	89,5	87,0
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	82,5	70,0
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	82,5	70,0
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	85,0	76,0
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	84,5	75,0
6. Videre arbejde	75,0	57,0
7. Driftssituation	50,0	34,0

### Miljøklasse: Moderat

Tabel 9. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,5. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	92,0	95,0
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	100,2 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	91,5	93,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	88,0	82,0
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	82,0	71,0
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	80,0	68,0
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	90,5	93,0
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	83,0	73,0
6. Videre arbejde	75,0	61,0
7. Driftssituation	50,0	41,0

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middel-værdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 146,7 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 10. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,5. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	92,0	95,0
2. Efter regnpåvirkning (yderste 1 cm)	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	92,5	98,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	89,5	84,0
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	75,0	61,0
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	79,0	66,0
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	79,5	67,0
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	82,5	72,0
6. Videre arbejde	75,0	56,8
7. Driftssituation	50,0	34,0

### Miljøklasse: Aggressiv og Ekstra aggressiv

Tabel 11. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,4. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	90,0	80
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	85,8 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	89,5	79
3b. Ventileret overdækning, sommer	85	71
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	82	66
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	80	63
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	89	78
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	84	70
6. Videre arbejde	75	58
7. Driftssituation	50	39

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middel-værdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 137,5 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 12. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,4. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	90	80
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	90	80
3b. Ventileret overdækning, sommer	87	75
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	75	58
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	79	62
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	79,5	62
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	82	66
6. Videre arbejde	75	56,8
7. Driftssituation	50	34



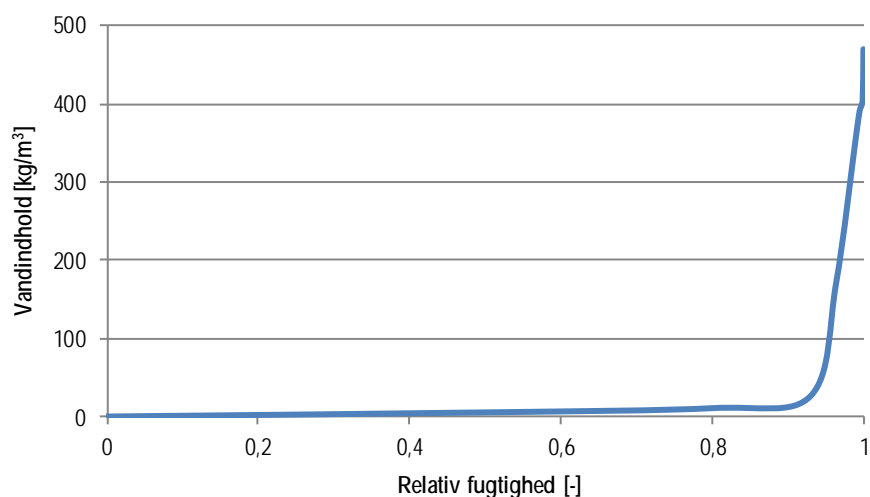
## Porebeton

Porebeton er et lettere og mere porøst materiale end traditionel beton. Det betyder også, at porebeton er mere følsom over for opfugtning ved regn. Simuleringer af regnens betydning for opfugtning af porebeton viste, at der sker en fuldstændig opfugtning af 10 cm porebeton. Det forudsættes derfor, at porebetonen beskyttes mod regnpåvirkning så de ikke opfugtes. Resultaterne præsenteret i Tabel 14 for en 10 cm porebeton ydervæg er der ikke inkluderet sol og regnpåvirkningen, da det forudsættes at disse skal være beskyttede mod regn.

De generelle materialeegenskaber for porebeton er angivet i Tabel 13 og Figur 16. Fra en producent af porebeton er det oplyst, at det typiske middelfugtindhold ved levering på byggepladsen er 30 vægt%.

Tabel 13. Materialeegenskaber for porebeton (WUFI 1D, 2014).

Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porøsitet, $p$ [%]	Varmekapacitet, $c_p$ [J/kg K]	Varmeledningsevne, $\lambda$ [W/m K]
600	0,72	850	0,14



Figur 16. Sorptionskurve for porebeton angivet i Tabel 13 (WUFI, 2014).

Tabel 14. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Det forudsættes at porebetonen beskyttes mod sol og regn.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, $w$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads <sup>1)</sup>	96,5	180,3
2. Efter regnpåvirkning <sup>2)</sup>	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	95	111,3
3b. Ventileret overdækning, sommer	93	26
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	40,5	4,3
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	41,0	4,4
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	68,0	8,5
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	60,0	7,1
6. Videre arbejde	75,0	9,8
7. Driftssituation	50,0	5,3

<sup>1)</sup> Ved levering på byggeplads er middelfugtigheden 30 vægt%. <sup>2)</sup> Vandindholdet er på 391,0 kg/m<sup>3</sup> ved 99,5% RF.

Tabel 15. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads <sup>1)</sup>	96,5	180,3
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	95,0	111,3
3b. Ventileret overdækning, sommer	93,0	26,0
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	30,0	3,2
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	30,0	3,2
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	50,0	5,3
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	50,0	5,3
6. Videre arbejde	75,0	9,8
7. Driftssituation	50,0	5,3

<sup>1)</sup> Ved levering på byggeplads er middelfugtigheden 30 vægt%.

## Sandwichelementer

Der tages udgangspunkt i sandwichelementer med for- og bagmur af beton med v/c-tal på 0,4-0,6. Betonen anvendt til sandwichelementerne svarer til den angivet for beton, hvor sorptionskurverne er identisk med betonelementernes i Figur 15. Sandwichelementerne er isoleret med 300 mm mineraluld med  $\lambda = 0,043$  W/mK. Tykkelsen af isolering er fastsat for at opnå en U-værdi af sandwichelementerne på omkring 0,14 W/m<sup>2</sup>K.

*Miljøklasse: Passiv*

Tabel 16. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,6 og 1-sidig udtørring. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	95,0	109,0
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	111,2 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	94,5	107,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	94,0	104,9
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	89,0	86,1
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	92,5	98,8
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	90,0	88,5
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	91,5	94,7
6. Videre arbejde	75,0	57,0
7. Driftssituation	50,0	34,0

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middelværdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 130,8 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 17. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevej, v/c-tal 0,6 og 1-sidig udtørring. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevejægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	95,0	109,0
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	94,5	107,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	93,0	100,8
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	90,5	90,6
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	90,5	90,6
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	91,0	92,6
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	91,0	92,6
6. Videre arbejde	75,0	57,0
7. Driftssituation	50,0	34,0

### Miljøklasse: Moderat

Tabel 18. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10cm ydervæg, v/c-tal 0,5 og 1-sidig udtørring. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	92,0	95,0
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	100,2 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	92,0	95,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	91,0	90,0
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	87,5	80,6
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	87,5	80,6
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	88,0	81,5
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	88,0	81,5
6. Videre arbejde	75,0	61,0
7. Driftssituation	50,0	41,0

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middelværdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 146,7 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 19. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10cm skillevej, v/c-tal 0,5 og 1-sidig udtørring. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevejægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	92,0	95,0
2. Efter regnpåvirkning (yderste 1 cm)	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	92,0	95,0
3b. Ventileret overdækning, sommer	91,5	92,5
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	89,0	83,3
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	88,0	81,5
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	89,0	83,3
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	89,0	83,3
6. Videre arbejde	75,0	56,8
7. Driftssituation	50,0	34,0

Tabel 20. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10cm ydervæg, v/c-tal 0,4 og 1-sidig udtørring. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	90,0	80,0
2. Efter regnpåvirkning (yderste 1 cm)	99,5 <sup>1)</sup>	85,8 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	89,0	78,3
3b. Ventileret overdækning, sommer	89,5	79,1
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	86,0	73,0
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	86,0	73,0
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	86,5	73,9
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	87,0	74,8
6. Videre arbejde	75,0	58,0
7. Driftssituation	50,0	39,0

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middel-værdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 137,5 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 21. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10cm skillevæg, v/c-tal 0,4 og 1-sidig udtørring. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	90,0	80,0
2. Efter regnpåvirkning (yderste 1 cm)	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	89,0	78,3
3b. Ventileret overdækning, sommer	89,0	78,3
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	87,0	74,8
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	87,0	74,8
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	87,0	74,8
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	87,0	74,8
6. Videre arbejde	75,0	56,8
7. Driftssituation	50,0	34,0

## Letklinkerbeton

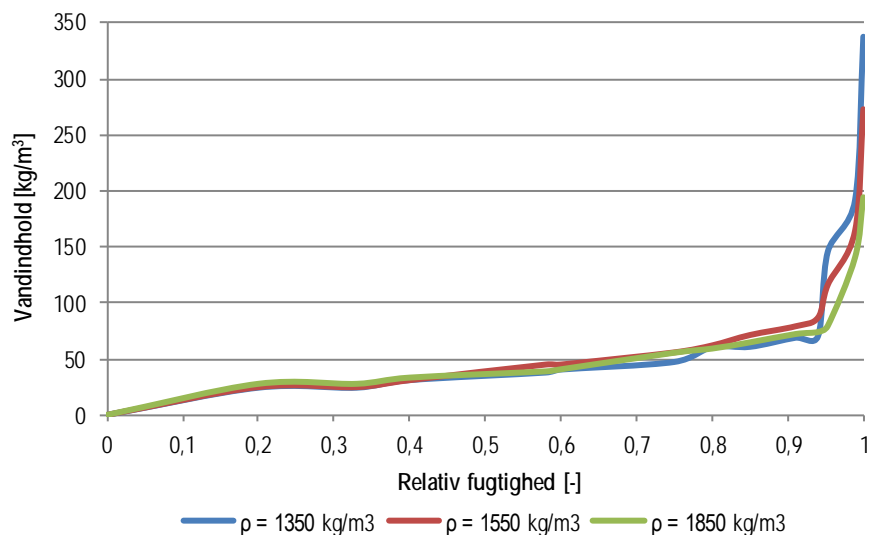
Letklinkerbeton er karakteriseret ved en beton tilsat lette porøse tilslag. I Danmark er det typisk ekspanderet ler i form af letklinker, der anvendes. Dette gør letklinkerbeton mere porøs og lettere end traditionel beton men tungere og mindre porøs end porebeton. Derfor forventes det, at letklinkerbeton er mere følsomt over for opfugtning ved regn end beton, men mindre følsomt end porebeton. Simuleringer af regnpåvirkning af letklinkerbeton viste, at vandindtrængningen efter regnpåvirkning er i samme størrelsesorden som beregnet for betonelementer. Årsagen hertil kan forklares ved egenskaberne for beton samt tilslaget vandafvisende egenskaber. I beregningerne af letklinkerbeton er der således regnet med regn- og solpåvirkning. Samtidig beregnes vandindhold efter regnpåvirkning med 1cm opfugtet.

Materialeegenskaber for letklinkerbeton med tre forskellige densiteter er angivet i Tabel 22 og Figur 17. De anvendte data for letklinkerbeton er bestemt ud fra Nilsson (2009) og Letbetonelementgruppen (2008) samt for sorptionskurverne som vægtning mellem indholdet af beton og letklinker, da der i WUFI ikke er data for letklinkerbeton.

Værdierne for fugtindhold ved levering på byggepladsen er baseret på Nilsson (2009), hvor fugtindholdet ligger mellem 8,5-14,5 vægt% for densiteter fra 1350-1850 kg/m<sup>3</sup>. Dette svarer til en relativ fugtighed på omkring 99%.

Tabel 22. Materialeegenskaber for tre letklinkerbetoner med forskellige densiteter som implementeret i WUFI (2014).

Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porøsitet, p [%]	Varmekapacitet, $c_p$ [J/kg K]	Varmeledningsevne, $\lambda$ [W/m K]
1350	0,45	850	0,46
1550	0,45	850	0,61
1850	0,45	850	0,81



Figur 17. Sorptionskurve for letklinkerbeton (Tabel 13) som er implementeret i WUFI baseret på Nilsson (2009).

### Densitet 1350 kg/m<sup>3</sup>

Tabel 23. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg,  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ . Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	99,0	195,8
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	203,4 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	94,5	99,3
3b. Ventileret overdækning, sommer	90,5	68,2
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	75,0	47,3
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	60,0	40,5
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	88,5	65,5
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	76,0	50,0
6. Videre arbejde	75,0	47,3
7. Driftssituation	50,0	34,8

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middelværdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 272,0 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 24. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg,  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ . Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regn.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	99,0	195,8
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	94,0	70,2
3b. Ventileret overdækning, sommer	94,0	70,2
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	53,0	35,9
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	50,0	34,8
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	70,0	45,0
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	70,0	45,0
6. Videre arbejde	75,0	47,3
7. Driftssituation	50,0	34,8

### Densitet 1550 kg/m<sup>3</sup>

Tabel 25. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg,  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ . Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	99,0	186,0
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	189,8 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	86,0	72,6
3b. Ventileret overdækning, sommer	82,5	66,7
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	70,0	52,2
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	56,0	43,4
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	80,0	62,0
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	71,0	52,9
6. Videre arbejde	75,0	55,8
7. Driftssituation	50,0	38,8

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middel-værdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 224,0 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 26. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg,  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ . Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regn.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	99,0	186,0
2. Efter regnpåvirkning (yderste 1 cm)	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	89,5	77,1
3b. Ventileret overdækning, sommer	86,0	72,6
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	50,0	38,8
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	50,0	38,8
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	65,0	48,6
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	65,0	48,6
6. Videre arbejde	75,0	55,8
7. Driftssituation	50,0	38,8

Densitet 1850 kg/m<sup>3</sup>

Tabel 27. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg,  $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ . Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	99,0	157,3
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	158,5 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	81,0	60,3
3b. Ventileret overdækning, sommer	83,0	62,5
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	60,0	40,7
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	49,5	36,2
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	72,5	53,0
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	66,0	46,6
6. Videre arbejde	75,0	55,5
7. Driftssituation	50,0	36,4

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middelværdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 170,1 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 28. Fugtindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg,  $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ . Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regn.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	99,0	157,3
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	83,0	62,5
3b. Ventileret overdækning, sommer	85,0	64,8
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	40,0	33,3
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	40,0	33,3
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	58,0	38,9
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	57,5	38,7
6. Videre arbejde	75,0	55,5
7. Driftssituation	50,0	36,4

## Andre materialer

Byggematerialer som ikke er inkluderet i det udviklede værktøj er fx tegl, træ og gips. Hvis disse materialer skal inkluderes, kræves indsamling af data svarende til dem der foreligger for beton. Hvad angår tegl og træ er det materialer som ikke anvendes i samme omfang som beton for bærende konstruktioner, men måske er mest udbredt i mindre bygninger på 1-2 etager.

Gips er et meget anvendt byggemateriale, men det er også meget følsomt overfor store vandpåvirkninger, hvor gips vil deformere og ændre egenskaber. Hvis gips udsættes for stor vandpåvirkning vil det normalt blive skiftet ud. Gips' store følsomhed overfor vand gør, at det ikke betragtes i denne rapport.

## Andre begrænsende flader

I store råhuse er det ikke muligt at lukke alle afsnit, før der skal udtørres for at opnå et arbejdsflow i byggeriet. Derfor bliver der ofte lavet interimsaflukninger af bygningsafsnit med fx presenninger. Beregningsværktøjet tager løsningerne angivet i Tabel 29 i betragtning for afskærmninger mod vejrliget, men har størst betydning på energiforbruget.

Tabel 29. Afdækningstyper af åbninger som vinduer og ved afgrænsninger af udtøringsområder. D<sub>åbning</sub> er en brugerdefineret faktor for afdækningstypen.

Afdækning	D <sub>åbning</sub>
Ingen	20,0
Plast på lægter	2,5
2 lag plast på lægter	2,0
Isolerede interimsaflukning	1,5
Blivende fx vinduer	1,0



# Beregningsværktøj

Ambitionen med beregningsværktøjet har været at skabe et værktøj, der er skræddersyet til bestemmelse af tid og energiforbrug til fugtuds tørringen i byggeprocessen. Det udviklede beregningsværktøj kan regne på hele byggeriet eller dele af et større byggeri når udtørringstid skal vurderes. For eksempel tager beregningsværktøjet højde for geografi, terrænklasser, rumfang, inddækning mv. Ud over at beregningsværktøjet kan regne på dele af eller hele byggerier, så regner det også på energiforbruget til forskel fra de andre eksisterende modeller som primært regner på enkelte konstruktioner. Ved anvendelse af beregningsværktøjet kan der laves estimater over udtørringstid og energiforbrug for en enkelt konstruktion, en sektion af en bygning eller en hel bygning, når udtørringen skal opnå et givent fugtniveau.

Beregningsværktøjet har gennemgået en række udviklingstrin, hvor de mange faktorer, der spiller ind i fugtuds tørringen, er blevet vægtet, behandlet og beregnet, for til sidst at indgå i et samspil som kan give et realistisk slutresultat. I den seneste version har beregningsværktøjet gennemgået en transformation fra et Microsoft Excel værktøj til en applikation, som både kan bruges på Apple produkter samt via internettet. Applikationen kan downloades via App-store (søg på energieffektiv fugtuds tørring eller teknologisk) og beregningsværktøjet kan tilgås på <http://www.teknologisk.dk/beregning-af-energiforbrug-til-udtoerring/32795>.

Beregningsværktøjet fokuserer på byggematerialer der indeholder beton, da beton er et af de hyppigst anvendte byggematerialer i større såvel som mindre byggerier i Danmark. Yderligere er beton et af de materialer som indeholder mest fugt i forbindelse med en almindelig byggeproces, hvor der ikke utilsigtet tilføres fugt til byggeriet.

## Gennemgang af beregningsværktøjet

Beregningsværktøjet er opbygget således, at brugeren bliver bedt om at tage stilling til en række forhold omkring de bygningskonstruktioner, som skal udtørres. Disse forhold er inddelt i tre hovedniveauer – kontekst, bygning og konstruktion, se Figur 18. Resultatet, som angives i estimeret antal dage og energiforbrug, opdateres i forbindelse med indtastningerne, men vises også til sidst på en samlet resultatside. Beregningerne kan gemmes og hentes ind på et senere tidspunkt.



Figur 18. Hovedniveauer for inputparametre i beregningsværktøjet.

## Kontekst

Det første brugeren bliver bedt om er at angive nogle forhold om konteksten, dvs. beliggenheden af de konstruktioner som skal udtørres. Der bliver stillet 2 spørgsmål:

- 1 *Hvor i landet findes konstruktionerne?* Den geografiske placering tager højde for, at der statistisk er mere nedbør nogle steder i landet end andre, se *Udeklima*.
- 2 *Hvilken terrænklasse befinder konstruktionerne sig i?* Terrænklasserne er inddelt i "bymæssig", "åben" og "højhus". Valget af terrænklasse fortæller noget om, hvor eksponeret bygningen ligger og har dermed betydning for luftskiftet. Hvis byggeriet ligger i åbent land eller det er et højhus, så forventes det også at forøge luftskiftet.

## Bygning

På bygningsniveau skal brugeren indtaste en række forhold om den bygning eller den sektion af bygningen, der skal udtørres.

- 1 *Hvilket rumfang har bygningen eller sektionen som skal udtørres?* Rumfanget angiver, hvor stor en mængde luft, der skal opvarmes. Dette har en betydning for det samlede energiforbrug, da volumenet indgår i ventilationstab.
- 2 *Hvordan lukkes åbninger i konstruktionerne?* Konstruktioner der vender mod vejrliget vil normalt have et antal åbninger, som i større eller mindre grad afdækkes for at holde på varmen (både af hensyn til bygningsarbejdere og fugtudtørring). I beregningsværktøjet kan de typisk anvendte afdækningsmetoder vælges. Disse afdækninger har en betydning for især energiforbruget i form af transmissionstab. Valgmulighederne for afdækning er listet efter deres isoleringsevne fra høj mod lav U-værdi:
  - Ingen
  - Plast på lægter
  - 2 lag plast på lægter
  - Isolerende interimsaflukning
  - Blivende fx vinduer
- 3 *Hvilken temperatur forventes opretholdt i bygningen/sektionen?* Temperaturen i bygningen/sektionen er både afgørende for, hvor lang tid udtørringen forventes at tage, samt hvor stort energiforbruget bliver. Som udgangspunkt vil lav temperatur resultere i lang udtørringstid og lavt energiforbrug og omvendt.
- 4 *Hvilken luftfugtighed forventes opretholdt i bygningen/sektionen?* Normalt tilstræbes et reguleret niveau for den indvendige relative fugtighed. Typisk vil høj relativ fugtighed betyde længere udtørringstid og højere energiforbrug, mens lav relativ fugtighed betyder kortere udtørringstid og lavere energiforbrug. Det skal bemærkes, at udtørring ved lav relativ fugtighed ofte kræver ekstra udstyr i form af affugtere eller etableret ventilationsanlæg med fugtstyring, hvilket dermed betyder højere energiforbrug til dette udstyr. Dette ekstra energiforbrug er ikke en del af beregningsgrundlaget i beregningsværktøjet.
- 5 *I hvilken måned forventes aktiv udtørring påbegyndt?* Ofte vil dette være tidspunktet, hvor bygningen eller sektionen er lukket, hvorefter den aktive fugtudtørring kan påbegyndes.

## Konstruktion

På konstruktionsniveau fokuseres på de konstruktioner, som skal udtørres. Konstruktionerne i en bygning eller sektion af en bygning består ofte af flere forskellige materialetyper, og er eksponeret forskelligt. Derfor er der mulighed for at oprette flere konstruktioner, for at få det samlede billede. Udslagsgivende for den samlede udtørringstid og det samlede energiforbrug er den konstruktion, som kræver længst udtørringstid. Derfor kan man i værktøjet nøjes med at oprette denne konstruktion, hvis man er helt sikker på, at det er denne konstruktion, der kræver længst udtørring. Det skal dog bemærkes, at det totale energiforbrug så ikke beregnes men kun energiforbruget til den konstruktion.

Konstruktionerne er inddelt i 4 kategorier (gulv, væg mod udeklima, skillevæg og loft), og der kan oprettes flere konstruktioner inden for hver kategori, hvis det er relevant. I det følgende gennemgås de krævede input for hver konstruktionsdel.

- 1 *Opret en titel for konstruktionsdelen.* Dette giver især bedre overskuelighed, hvis der er mange konstruktionsdele.
- 2 *Hvilket materiale består konstruktionen af?* Forskellige materialer har forskellige materialeparametre som har betydning for udtøringshastighed og energiforbrug. I beregningsværktøjet er der mulighed for at vælge en række materialer baseret på beton, der typisk indgår i byggeprocessen af råhuse. Listen af materialer afhænger af, hvilken konstruktionstype, der er oprettet. Bruttolisten for alle konstruktionstyper ser således ud:
  - Beton, in-situ, passiv (v/c 0,6)
  - Beton, in-situ, moderat (v/c 0,5)
  - Beton, in-situ, aggressiv (v/c 0,4)
  - Beton, in-situ, selvudtørrende (v/c 0,35)
  - Betonelement, massivt (v/c 0,5)
  - Betonelement, huldæk (v/c 0,5)
  - Letbetonelement
  - Porebetonblokke
- 3 *Hvilken tykkelse har konstruktionen?* Tykkelsen af konstruktionen er med til at definere rumfanget af konstruktionen, og dermed den vandmængde der skal udtørres. Ved sandwichelementer er det kun tykkelsen på bagmuren der skal indtastes.
- 4 *Hvad er overfladearealet af konstruktionen?* Overfladearealet af konstruktionen er med til at definere rumfanget af konstruktionen, og dermed vandmængden der skal udtørres. Der indtastes kun det overfladeareal som udgør en flade i det område som skal udtørres. For skillevægge vil der ofte være flere flader som vender mod det udtørrede rum, og der kan derfor enten medtages hele overfladearealet, eller indtastes en reduceret tykkelse.
- 5 *Hvad støder konstruktionen op til?* Det er en vigtig parameter at vide, hvad konstruktionen støder op til, dvs. om den støder op til udeklimaet, isolering, andre rum i bygningen osv. Bruttolisten af muligheder som varierer afhængig af konstruktionstype er:
  - Udeklima – uden isolering
  - Udeklima – med isolering
  - Jord
  - Opvarmet rum
  - Uopvarmet rum

## Resultat

Resultatsiden i beregningsværktøjet angiver udtørringstiden og energiforbruget for de indtastede data. Resultatet for de enkelte konstruktioner vises, og konstruktionerne med længst udtørringstid og størst energiforbrug angives. Det skal bemærkes, at energiforbruget ikke inkluderer energiforbrug til udtørringsmaskiner og ventilationsanlæg, men kun varmetab.

## Beregningsgrundlag

Nærværende afsnit gennemgår beregningsgrundlaget for henholdsvis udtørringstid og energiforbruget i beregningsværktøjet.

### Udtørringstid

Udtørringstid er beregnet for hver enkelt brugerdefineret konstruktion. Den beregnede udtørringstid er lig med udtørringstiden for den konstruktion, som har længst udtørringstid. Beregningen af udtørringstiden er baseret på det teoretiske grundlag præsenteret i Beton-Bogen for ikke stationær transport (Nielsen, 1985).

Udtørringstid beregnes dag efter dag, og start fugtindholdet sættes til 100% mens slut fugtindholdet sættes til 0%, og udtørringen af konstruktionen fortsætter til fugtindholdet er 0%. Beregningsværktøjet beregner så udtørringstid for den første dag med dagens givne parametre som illustreret i formel 2.

$$\phi_{rest} = 100\% - 100\% \frac{1 \text{ dag}}{x \text{ dage}} = 99\% \quad (2)$$

Hvor x er det antal dage man beregner udtørringen vil tage ved en givet temperatur.

På denne måde fortsætter man dag efter dag indtil det resterende fugtindhold falder til  $\phi_{rest} = 0\%$ .

Eksempelvis hvis en udtørring starter 31. januar 2015 beregnes udtørringstiden til fx 148 dage ved -2 °C. Den 1. februar 2015 er udtørringstid ved -5 °C fx 182 dage. Den første dag udtørres kun 1/148 del af konstruktionen, og hvis udtørringen varede 148 dage ved -2 °C ville hele konstruktionen udtørres. I eksemplet varede udtørringen kun 1 dage ved -2 °C. Derfor udtørrede man kun 1/148 del af konstruktion, og dermed resterer der 147/148 del af konstruktion som skal udtørres. Den næste dag dvs. 1. februar er temperatur ude faldet til -5 °C, og med denne konstant temperatur tager det 182 dage at udtørre konstruktionen. Igen udtørres en dag ved den temperatur og her udtørres så 1/182 del af konstruktionen. Efter to dages udtørring er konstruktionen dermed udtørret med 1/148 + 1/182 del af konstruktionen og  $1 - (1/148 + 1/182)$  del restere i at blive udtørret. Således fortsættes indtil  $1 - (1/148 + 1/182 + \dots) < 0$ . Antal af led i parenteser giver dermed det antal af dage det tager at udtørre konstruktionen.

### Temperaturafhængig udtørringstid

Beregningen af den temperaturafhængige udtørringstid afhænger af flere parametre som fx dato, temperatur, relativ fugtighed mv. som beskrevet i formel 3 – formel 11. Funktionen forudsætter at temperaturen er konstant under hele udtørringsperioden. Den totale udtørringstid,  $t_{sek}$ , ved en given temperatur er beregnet efter formel 3.

$$t_{sek} = \frac{F_0 L^2}{k} \quad (3)$$

hvor  $t_{sek}$  er udtørringstid i sekunder,  $F_0$  er Fouriertallet,  $L$  er den karakteristiske dimension af konstruktionen, og  $k$  er transportkoefficienten beregnet fra Arrhenius' ligning, formel 4.

*Transportkoefficienten*

$$k = A_d e^{\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273,15+20} - \frac{1}{273,15+T_{kon}} \right)} \quad (4)$$

hvor  $A_d$  er diffusionskoefficienten ( $5,25 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ) defineret for  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  og for hver brugerdefineret materiale type.  $E_a$  er aktiveringsenergi ( $30 \text{ kJ/mol}$ ),  $R$  er gaskonstanten ( $8,314 \text{ J/(mol K)}$ ) og  $T_{kon}$  er konstruktionens temperatur i  $^\circ\text{C}$ .

Den gennemsnitlige temperatur,  $T_{kon}$ , i konstruktionen beregnes som midelværdien af temperaturerne på yder- og indersiden af konstruktionen. Temperaturen på indersiden sættes lig indendørs temperaturen. Temperaturen på ydersiden afhænger af omgivelsen og varmeisoleringen af konstruktionen. Er der udeklima på ydersiden af konstruktionen anvendes denne temperatur, men hvis der er varmeisolering på konstruktionen, antages ydersidens temperatur at være lig med indendørs temperaturen. Hvor konstruktionen vender mod jord, anvendes gennemsnittet mellem udendørs og indendørs temperaturen, dvs. at ydersiden af konstruktionen har samme temperatur som udendørs luften.

Den korrigerede udendørstemperatur,  $T_{region}$ , bestemmes ud fra måneds-middeltemperaturen,  $T_{ude}$ , givet i Tabel 4 som korrigeres for graddøgn (Tabel 1) afhængig af region, jf. formel 5.

$$\begin{aligned} T_{region} &= T_{ude} D_t, \text{ hvis } T_{ude} < 0 \\ T_{region} &= \frac{T_{ude}}{D_t}, \text{ hvis } T_{ude} > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$D_t$  er en faktor der bruges til at beskrive hvordan graddage er afhængigt af regionen, jf. Tabel 1.

*Fouriertallet*

Fouriertallet er baseret på ligning 6 tilpasset til kurven præsenteret i Figur 3.4-22 af Beton-Bogen (Nielsen, 1985).

$$F_0 = -0,4 \ln(1,21 \Delta u) + 0,5 (\max(\Delta u - 0,64; 0))^2 \quad (6)$$

hvor  $\Delta u$  er fugtpotentialet. Fugtpotentialet kan man beregne fra formel 7.

$$\Delta u = \frac{u_{slut} - u_\infty}{u_{start} - u_\infty} \quad (7)$$

hvor  $u$  er det dimensionsløse vandindhold ved udtørringens start,  $u_{start}$ , og slutning,  $u_{slut}$ , samt ligevægtsvandindholdet,  $u_\infty$ . Det dimensionsløse vandindhold beregnes ud fra den relative fugtighed,  $\phi$ , ved brug af materialernes sorptionskurver for hver af de tre situationer med hhv.  $\phi_{start}$ ,  $\phi_{slut}$  og  $\phi_\infty$  efter formel 8.

$$u = u_h \left( 1 - \frac{\ln(\phi)}{a} \right)^{-1/n} \quad (8)$$

hvor  $u_h$ ,  $a$  og  $n$  er materiale parametre.

Den relative fugtighed ved udtørringens slutning er defineret af brugeren, mens den relative fugtighed ved udtørringens start beregnes efter formel 9.

$$\phi_{start} = \phi_{strukt,min} + (\phi_{strukt,max} - \phi_{strukt,min}) D_{dw} \quad (9)$$

hvor  $\phi_{strukt,min}$ ,  $\phi_{strukt,max}$  er minimum og maksimum relativ fugtighed defineret for hvert materiale type. Tør-fugtig faktoren,  $D_{dw}$ , er brugerdefineret og tager hensyn til materialernes beskyttelse mod vejrlig med fx afdækning jf. Tabel 30.

Tabel 30. Beskrivelse af afdækning af konstruktioner som udtrykkes ved tør-fugtig faktoren.

Beskyttelse	$D_{dw}$
Ingen	0,00
Dårlig	0,25
Middel	0,50
God	0,75
Fuldstændig	1,00

Ligevægtsvandindholdet,  $u_{\infty}$ , er beregnet på baggrund af den indendørs relative fugtighed. Den indendørs relative fugtighed er beregnet fra udendørs temperatur, udendørs fugtighed og indendørs temperatur jf. formel 10 og formel 11. Det mættede vanddamptryk,  $P_{ude}$ , for udendørs temperatur er beregnet ved formel 10.

$$P_{ude} = P_{\infty} e^{\frac{\Delta H_{vap}}{R(T_{region} + 273,15)}} \quad (10)$$

Hvor  $P_{\infty}$  er vanddamptrykket ved uendelig temperatur,  $R$  er gaskonstanten,  $\Delta H_{vap}$  er fordampningsvarme og  $T_{region}$ , er den korrigerede udendørs temperatur i °C.

På den samme måde som beregnet for det udendørs mættede vanddamptryk,  $P_{ude}$ , beregnes det mættede vanddamptryk,  $P_{inde}$ , for indendørs temperatur,  $T_{inde}$ .

Det udendørs og indendørs mættede vanddamptryk skal være i ligevægt, hvor  $\phi_{inde}$  er den minimum relative fugtighed gulvet kan opnå efter uendelig udtørring. Den indendørs relative fugtighed efter uendelig udtørring kan derfor beregnes efter formel 11.

$$\phi_{\infty} = \phi_{inde} = \frac{P_{ude} \phi_{ude}}{P_{inde}} \quad (11)$$

## Energiforbrug

Det samlede energiforbrug er beregnet på baggrund af det samlede varmetab som summen af ventilationstab og transmissionstab. Ventilationstab er beregnet for den del af bygningen som udtørres, og tilsvarende er transmissionstabet beregnet for hver enkelt konstruktion i den del af bygningen. Ventilationstab [W],  $\Phi_{vent}$ , er beregnet efter formel 12.

$$\Phi_{vent} = 0,34Vn\Delta T \quad (12)$$

hvor  $V$  er volumen [ $m^3$ ] af det udtørrede område af bygning,  $n$  er luftskifte [ $h^{-1}$ ] og  $\Delta T$  er den gennemsnitlige temperatur forskel [ $^{\circ}C$ ] mellem inde- og udeklima i udtørningsperioden. Luftskifte er beregnet iht. formel 13.

$$n = 0,5D_{land}D_{\text{åbning}} \quad (13)$$

hvor  $D_{land}$  er en landskabsfaktor som tager hensyn til bygningens placering i fx by eller land (Tabel 2),  $D_{\text{åbning}}$  er en faktor som tager hensyn afdækningen af åbninger (Tabel 29).

Transmissionstab [W],  $\Phi_{trans}$ , for hver konstruktion beregnes som i formel 14.

$$\Phi_{trans} = \sum U A \Delta T \quad (14)$$

hvor  $U$  er konstruktionens transmissionskoefficient [ $W/(m^2K)$ ],  $A$  er konstruktionens areal [ $m^2$ ] og  $\Delta T$  er den gennemsnitlige temperaturforskil [K] mellem inde- og udeklima i udtørningsperioden.

Energiforbruget [MWh],  $E_{total}$ , til udtørringen af konstruktionerne er beregnet efter formel 15, hvor faktoren  $2,78 \cdot 10^{-10}$  indeholder omregningen fra W til MW og udtørringstiden fra sekunder til dage.

$$E_{total} = 2,78 \cdot 10^{-10} t_{sek} (\Phi_{vent} + \Phi_{trans}) \quad (15)$$

# Referencer

Aalborg Portland. (2014). Udtørring af betongulve program kan hentes fra <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=4&i=468&pi=1&pr=1>

Brandt, E. (2013). *Fugt i bygninger* (SBI-anvisning 224). København, Danmark: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Byg-Erfa. (2009). *Bygninger med udsat beliggenhed – klimaskærmens tæthed mod vind, slagregn og fygesne*. (BYG-ERFA blad (99) 09 11 06). Ballerup, Danmark.

Byg-Erfa. (2010). *Udtørring af byggematerialer - forenklet metode til vurdering af udtørringstid*. (BYG-ERFA blad (99) 100527). Ballerup, Danmark.

Byg-Erfa. (2012). *Udtørring efter vandskade*. (BYG-ERFA blad (99) 120723). Gilleleje, Danmark.

Bygge & Miljøteknik. (2014). PC-program MATCH kan hentes fra [www.match-box.dk](http://www.match-box.dk).

Dansk Byggeri. (2014). Hentet fra <http://www.tolerancer.dk/letbeton/tolerancer+for+overflader/udt%C3%B8rring+af+elementer>

Fabriksbetongruppen. (2013). *Selvudtørrende beton til gavn for byggeriet*. København, Danmark: Dansk Beton.

Fraunhofer. (2014). PC-program WUFI kan hentes fra [www.wufi.de](http://www.wufi.de).

Fuktcentrum. (2014). PC-program TorkaS kan hentes fra [www.fuktcentrum.lth.se](http://www.fuktcentrum.lth.se).

Gottfredsen, F.R., & Nielsen, A. (1997). *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber*. 1. udgave. Polyteknisk Forlag, Lyngby, Danmark.

Hansen, K.K. (1986). *Sorption Isotherms. A Catalogue*. Technical report 162/86. Lyngby, Danmark: Danmarks Tekniske Universitet. Kan hentes fra <http://www.materials.dk/links/A7x8%20Sorptionsisotermer.pdf>.

Letbetonelementgruppen (2008). Hentet fra <http://bef.dk/files/Servicebutik/Dansk%20Beton%20publikationer%20til%20servicebutik-ken/Letbeton/37101.1.helv%C3%A6gge%20og%20d%C3%A6k%20af%20letbeton.pdf>

Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., & Mikkelsen, P.S. (2009). Update of regional intensity-duration-frequency curves in Denmark: Tendency towards increased storm intensities. *Atmospheric Research*, 92, 343-349.

Nielsen, A. (1985). Fugtmekanik. Fra Herholdt, A.D., Justesen, C.F.P., Christensen, P.N. & Nielsen, A., *Beton-Bogen* (pp. 165-204), 2. udgave. Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, Aalborg Portland A/S. Kan hentes fra <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=2&i=503>.



Nilsson, L.-O. (1977). *Fuktproblem vid betonggolv* (Rapport TVBM-3002). Lund, Sverige: Lund Tekniska Högskola.

Nilsson, L.-O. (2009). Fuktegenskaper hos lättballastbetonger från Expan A/S – beräkningar och mätningar. Sensobyg – delprojekt D4. (Rapport TVBM-7199). Lund, Sverige: Lund Tekniska Högskola.

Pedersen, C.R. (1990). *Combined heat and moisture transfer in building constructions* (Ph.d. afhandling, BYG rapport LFV-214). Lyngby, Danmark: Danmarks Tekniske Universitet.

WUFI. (2014). PC-program WUFI Pro version 5.1.

# Bilag 1. Beregningseksempel

## Beregningseksempel

I de følgende afsnit gennemgås et eksempel på anvendelse af beregningsværktøjet. Først gives der en oversigt over brugerdefineret information. Dernæst indsættes skærmbilleder fra indtastning af data i beregningsværktøjet. Slutteligt angives resultater i forhold til udtørringstid og energiforbrug.

### Brugerdefineret information

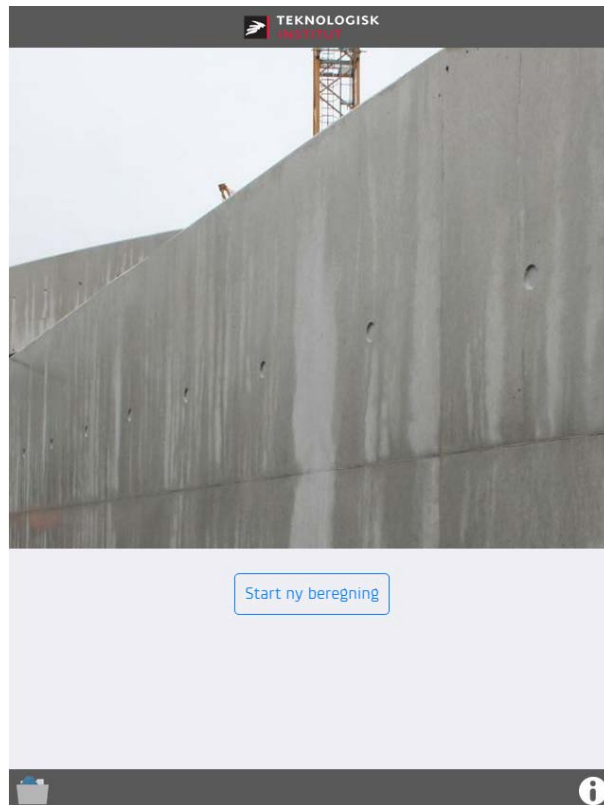
Et råhus med volumen på  $320 \text{ m}^3$  bliver opført i region Syd- og Sønderjylland på åbent terræn. Råhuset har forskellige flader, men der ønskes kun at beregne udtørringstiden i betongulvet, da det forventes, at gulvet har den længste udtørringstid.

Gulvet har et areal på  $130 \text{ m}^2$  og er opført med en tykkelse på 150 mm direkte på jord. Der blev brugt beton med v/c-tal 0,6, svarende til en beton i passiv miljøklasse.

Der regnes med at udtørringen af hele råhuset starter den 1.1.2015. For at fremskynde udtørringen opvarmes bygningen til  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Samtidig dækkes vinduesåbninger af med 2 lags plast på lægter. Under opførelsen af bygningen har materialerne også været godt beskyttet og afdækket mod vejrlig (svarende til en tør-fugtig faktor på 0,75). Den ønskede relativ fugtighed i betongulvet efter udtørring er 70 %, hvilket svarer til en relativ fugtighed egnet til videre arbejde.

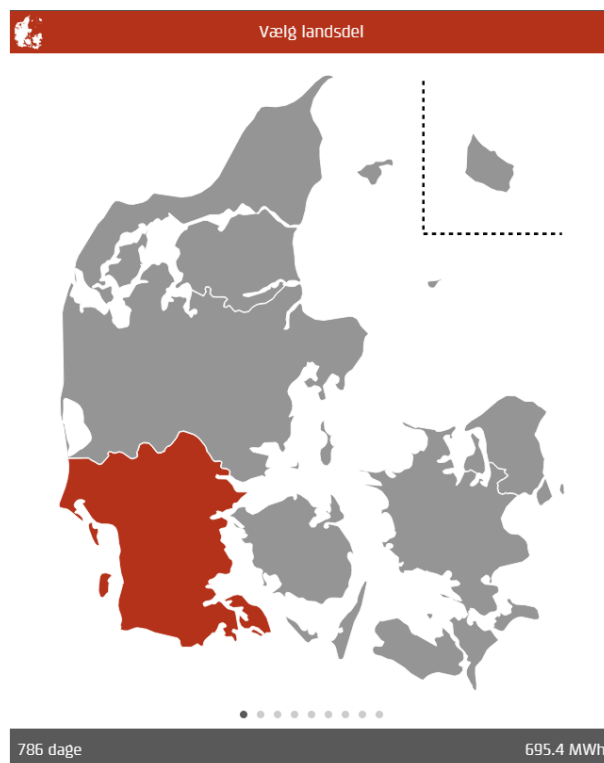
### Indtastning af data i beregningsværktøj

Ved åbning af beregningsværktøjet (webservice) kan man vælge at starte en ny beregning, se Figur 19. Men det er også muligt at åbne en tidligere beregning ved at klikke på ikonet med mappen, se Figur 19.

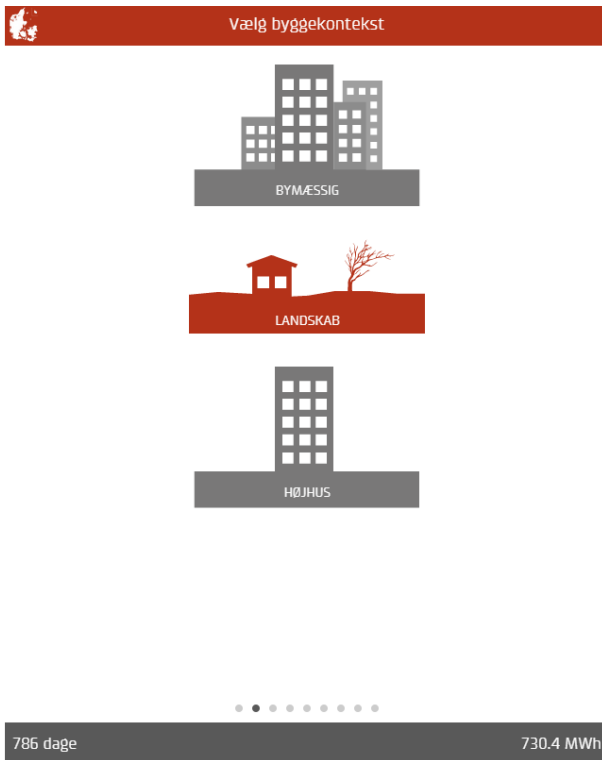


Figur 19. Startbillede ved åbning af beregningsværktøjet.

Ved start af en ny beregning vælges landsdel og byggek kontekst, se Figur 20 og Figur 21. Efter valg af landsdel, kan man se en udtørringstid samt energiforbrug til udtørring nederst i beregningsværktøjet (grå bjælke). Disse resultater tager udgangspunkt i en reference bygning og bliver løbende opdateret når brugeren indtaster flere data.

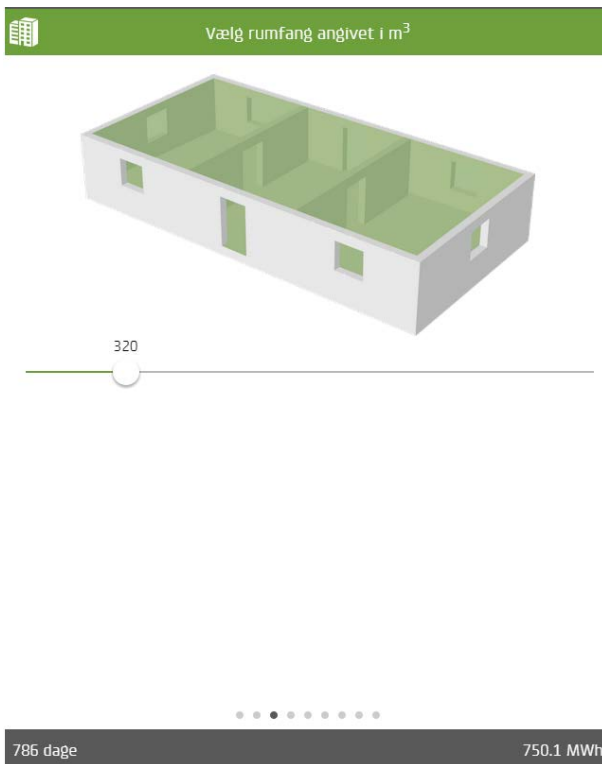


Figur 20. Valg af landsdel.

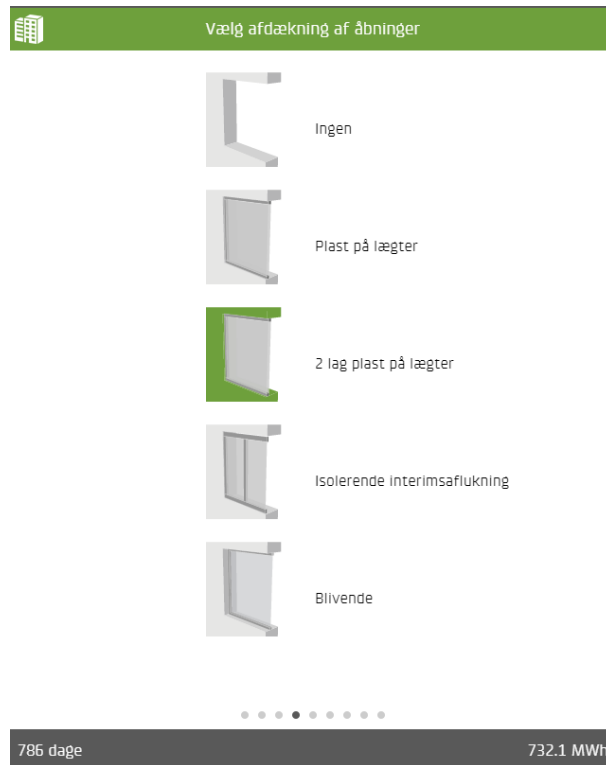


Figur 21. Valg af byggek kontekst.

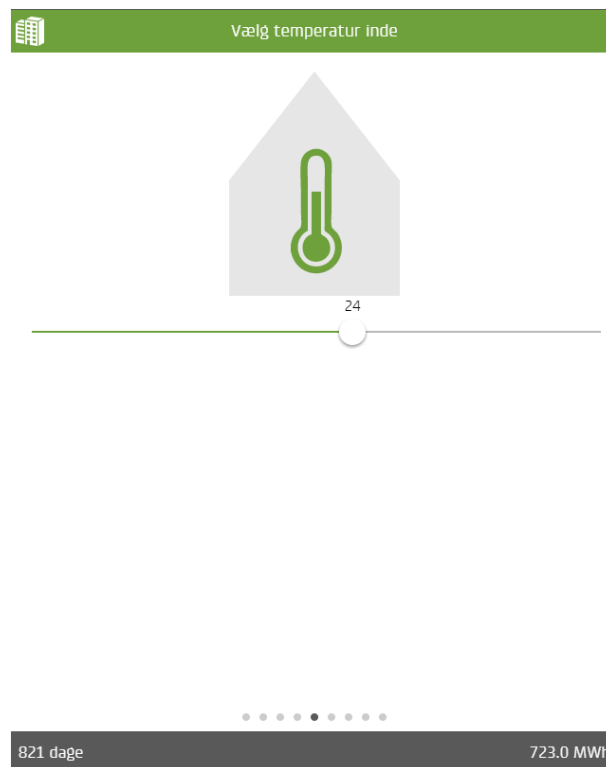
Når de udeklimamæssige forhold (landsdel og byggek kontekst) er valgt, defineres volumen (rumfang) af bygningen, samt afdækning af åbninger, se Figur 22 og Figur 23. Samtidig bestemmes temperatur i bygningen, startmåned for udtørring, og det ønskede fugtniveau efter udtørring, se Figur 24- Figur 26.



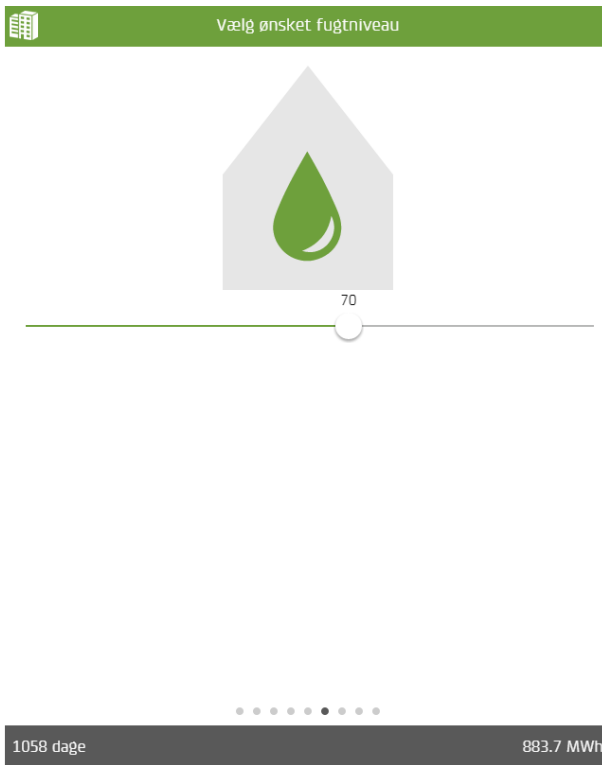
Figur 22. Definition af volumen af bygningen (rumfang).



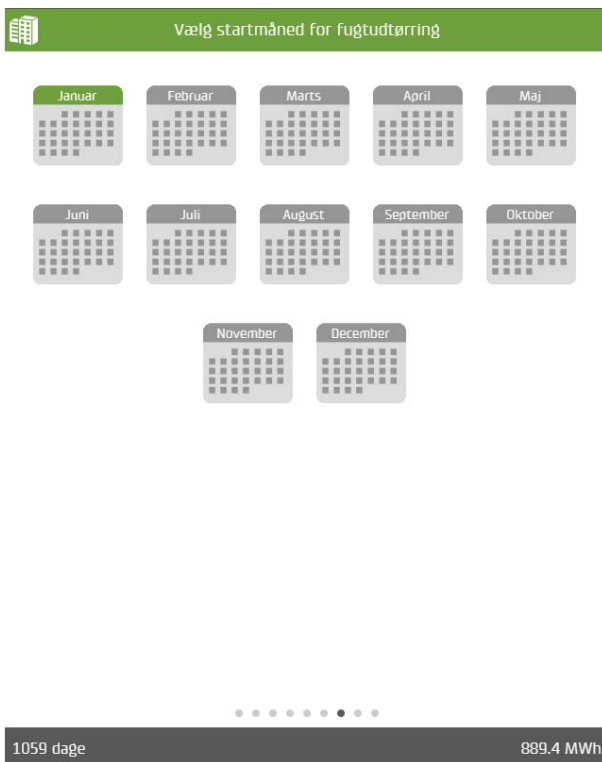
Figur 23. Valg af afdækning for åbninger.



Figur 24. Valg af bygningens indetemperatur (°C).

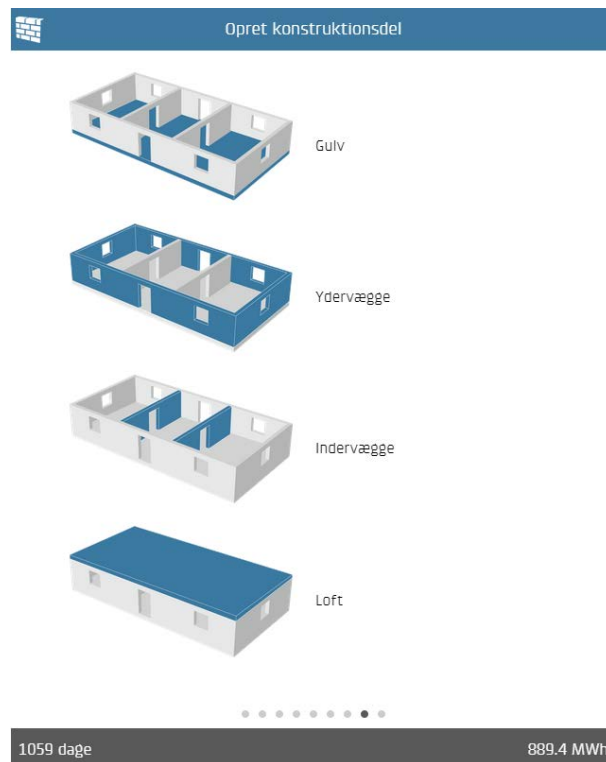


Figur 25. Valg af ønsket fugtniveau efter udtørring (%).

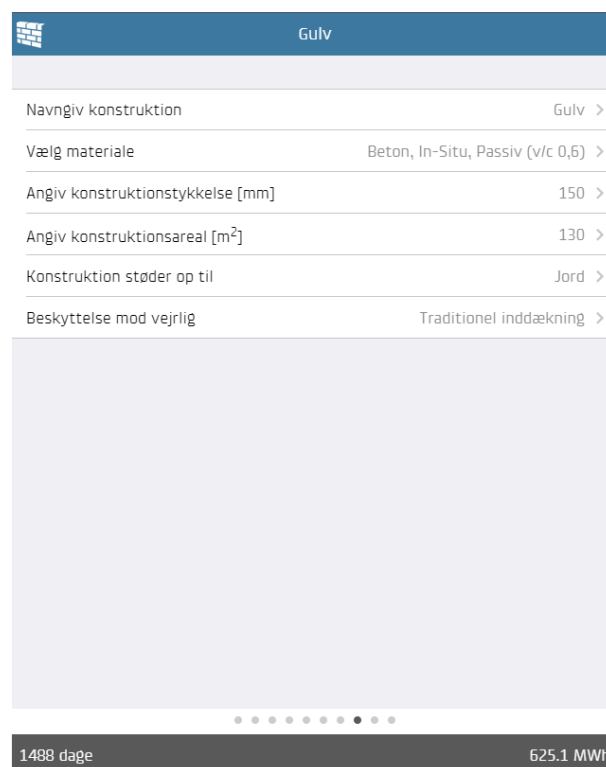


Figur 26. Valg af startmåned for fugtugtørring.

Derefter kan brugeren oprette en eller flere konstruktionsdele, se Figur 27, hvorefter materiale, konstruktionstykkelse, dimension, og randbetingelser såsom beskyttelse med vejrlig kan vælges, se Figur 28



Figur 27. Oprettelse af konstruktionsdele.



Figur 28. Illustration af definition af forskellige parametre for hver konstruktionsdel, her gulv.

### Beregnet udtørringstid og energiforbrug

Efter valg af udeklima og indeklima, samt oprettelse af en eller flere konstruktionsdele gives der en oversigt over brugerens inputdata, samt den endelige udtørringstid og energiforbruget. Den totale udtørringstid for gulvet er i eksemplet på 1488 dage. Det totale energiforbrug (ventilationstab og varmetab) svarer til 625,1 MWh for udtøringsperioden.



Figur 29. Oversigt over inddata, samt endelig resultat for udtørringstid og energiforbrug.



## Bilag 2. Luftskiftemålinger

Følgende bilag er et udkast til en artikel i HVAC magasinet, og handler om bestemmelsen af ventilationsforholdene i en bygning under opførelse.

### Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen – målinger i boliger under opførelse

#### *Manchet*

Anvendelse af effektive udtørringsteknologier under opførelsen af et byggeri er én af forudsætningerne for en markant reduktion af energibehovet på danske byggepladser. SBI har i forbindelse med gennemførelse af et projekt om "Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen" foretaget målinger i ét af de på daværende tidspunkt kommende beboelsestårne i Havneviggen på Islands Brygge.

#### *Indledning*

I byggebranchen stræbes der generelt efter at kunne opretholde byggeaktiviteterne hele året, herunder at forcere byggeprocessen om muligt. Samtidig er det imidlertid påkrævet, at energibehovet til opvarmning og udtørring begrænses. Begrænsning af energibehovet kan selvsagt være vanskeligt at efterleve i vinterhalvåret, hvor det i særlig grad er nødvendigt at anvende energiforbrugende udstyr til opvarmning og ventilation.

I henhold til bygningsreglementet må bygningskonstruktioner og byggematerialer ikke have et fugtindhold, der ved indflytning i bygningen indebærer risiko for vækst af skimmelsvamp (BR10, kap. 4.1, stk. 6). Til eftervisning af overholdelse af bestemmelsen kan der i byggetilladelsen stilles krav om, at der foretages målinger, eller at en fugtsagkyndig leverer anden form for dokumentation (BR10, kap. 1.4, stk. 2).

Nyopførte og renoverede bygninger skal derfor udtørres, så materialernes egenskaber opretholdes, og så risikoen for fugtproblemer, når bygningen tages i brug, minimeres. Det er navnlig risikoen for forekomst af skimmelsvamp i kombination med den stadig kortere byggetid, der har medført øget behov for opvarmning og ventilation under opførelsen af bygninger. Håndtering af fugt under opførelsen af bygninger og deraf afledte forbrug tegner sig for op til 70 % af energiforbruget på byggepladser (Elsparefonden, 2009).

Nogle af målene i det Elforsk-støttede projekt "Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen" er at udvikle og dokumentere energieffektive udtørringsteknologier til anvendelse på byggepladser. I den forbindelse har SBI foretaget målinger under opførelsen af en ny etageboligbebyggelse på Islands Brygge. Denne artikel beskriver målinger og resultater. Inden for det nævnte projekt udvikles desuden et web-baseret beregningsværktøj, som vil kunne anvendes i projekterings- og udførelsesfasen til optimal håndtering af byggefugt. Beregningsværktøjet vil give rådgivere og udførende bedre muligheder for i fremtiden at kunne reducere energiforbruget på byggepladsen.

#### *Formålet med målingerne*

Den typiske metode til udtørring af bygningskonstruktioner og byggematerialer er baseret på en kombination af opvarmning og ventilation. For at kunne

vurdere effektiviteten af en iværksat udtørningsproces i en bygning er det nødvendigt at temperatur- og ventilationsforholdene er kendt. Det er ofte muligt at estimere indeluftens temperatur med nogen nøjagtighed, og det er en forholdsvis enkel opgave at måle temperaturen.

Derimod er det vanskeligt at estimere ventilationens størrelse, og det er betydeligt mere tidskrævende at gennemføre ventilationsmålinger end temperaturmålinger. Endvidere kan det være problematisk at måle ventilation i en bygning, mens denne er under opførelse. Viden om niveauet for ventilationens størrelse i bygninger under opførelse er mangelfuld.

SBi har foretaget målinger i udvalgte boliger i en etageboligbebyggelse, som er under opførelse. Formålet med målingerne har været at opnå orienterende viden om ventilationsforholdene i rum i en bygning, som er så langt i opførelsesprocessen, at bygningen er lukket, dvs. døre og vinduer er monteret, hvorimod facaderne endnu ikke har den endelige tæthed.

### *Havneviggen*

Havneviggen er et område på det yderste Islands Brygge. Når det står helt færdigt i løbet af 2015, vil det omfatte mere end 200 ejerboliger og en kunstig vig. Boligerne indbefatter blandt andet lejligheder i tre tårne på henholdsvis 16 etager (vesttårnet), 14 etager (nordtårnet) og 11 etager (østtårnet). NCC og Arkitema står bag projektet.



Figur 30. Oversigtstegning af NCC byggepladsplanche (Foto: Niels Christian Bergsøe).

### *Metoder*

Det er gennemført målinger af udeluftens temperatur og relative fugtighed, og i udvalgte lejligheder i nordtårnet er der gennemført målinger af indeluftens temperatur og relative fugtighed. Målingerne er gennemført ved hjælp af programmerbare dataloggere fabrikat Gemini Data Loggers type TinyTag Ultra 2 og med registreringsinterval på 5 minutter.

I de samme lejligheder er udelufttilførslen målt ved hjælp af sporgasteknik og ved anvendelse af pulsdoseringsmetoden.

Sporgasteknik går ud på at tilføre og opblande en kendt og målbar luftart, såkaldt sporgas, til indeluften. Ved at måle tilførslen af sporgas og den resulterende sporgaskoncentration, kan udelufttilførslen bestemmes. Pulsdosering er én af flere metoder til at tilføre sporgas, og princippet i metoden er, at sporgas tilføres i form af en kortvarig, kraftig puls. Sporgaskoncentrationen i

indeluftten vil stige omtrent momentant, og derefter aftage eksponentielt i afhængighed af tilførslen af udeluft. Udelufttilførslen (luftskiftet) bestemmes på basis af en omskrivning af fortyndingsligningen til:

$$n = 2,3 \cdot \frac{\log\left(\frac{c_1 - c_i}{c_2 - c_i}\right)}{\tau_2 - \tau_1}$$

Hvor  $n$  er luftskiftet [ $\text{h}^{-1}$ ]

$c_1$  og  $c_2$  er sporgaskoncentrationen henholdsvis til tiden  $\tau_1$  og  $\tau_2$  [h]

$c_i$  er baggrundskoncentrationen

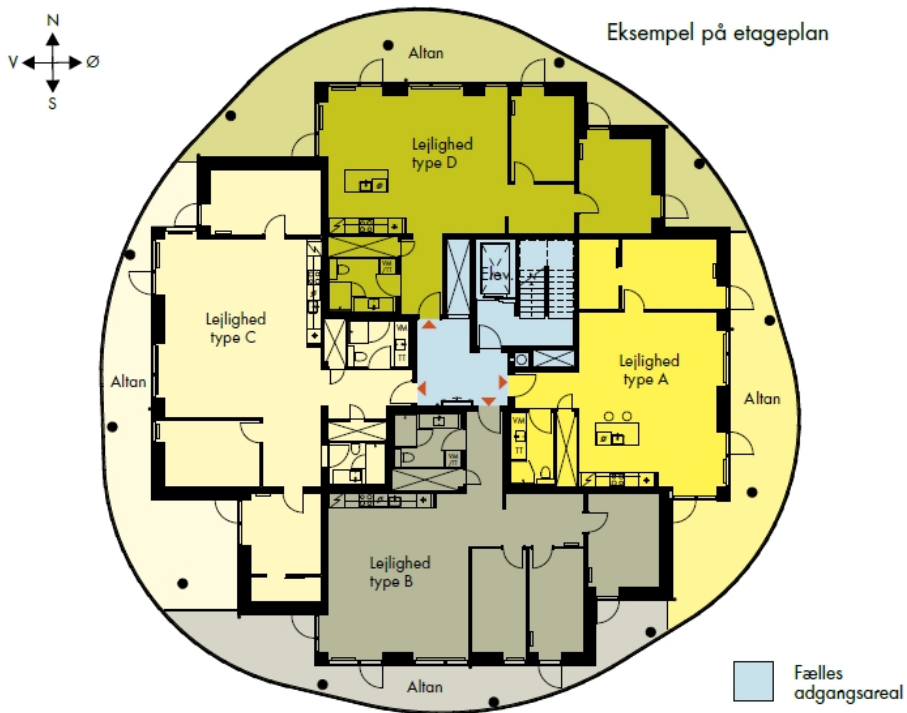
Sporgasmålingerne er gennemført med  $\text{N}_2\text{O}$  som sporgas. Bestemmelse af sporgaskoncentrationen i indeluften er sket ved hjælp af B&K multigas analysator type 1302.

I seks lejligheder i nordtårnet, er der gennemført målinger i lejlighedens største rum, dvs. det rum, der til sin tid vil være stuen. Lejlighederne er ufærdige, men der er isat vinduer. Vinduerne er dog uden færdig fuge omkring, og altandøre er midlertidige træfinerdøre. Der er fire lejligheder på hver etage, og adskillelsen mellem den enkelte lejlighed og fælles repos udgøres af en vintermåtte. Figur 31 viser østtårnet og nordtårnet under opførelse. Figur 32 viser en typisk etageplan i nordtårnet. Figur 33 viser et eksempel på en midlertidig dør til det fri.

Målingerne er gennemført onsdag den 26. februar 2014.



Figur 31. Østtårnet (tv.) og nordtårnet (th.). [NCB-foto]



Figur 32. Eksempel på etageplan, nordtårnet. (Foto: NCC-brochure).



Figur 33. Eksempel på midlertidig dør til det fri (Foto: Niels Christian Bergsøe).

### Resultater og kommentarer

Under målingerne var udeluftens temperatur og relative fugtighed om formiddagen henholdsvis ca. 6 °C og 80-85 %RF. Først på eftermiddagen var udetemperatur og relativ luftfugtighed henholdsvis ca. 10 °C og 60-65 %RF.

Tabel 31 viser for hver af de seks kommende lejligheder resultaterne af målingerne af luftskifte, indeluftens temperatur og relative fugtighed samt en kort kommentar til omstændighederne i lejligheden under målingen.

Tabel 31. Resultater af målinger af udelufttilførslen ved hjælp af sporgasteknik og pulsdosering samt resultater af målinger af indeluftens temperatur og relative luftfugtighed ved hjælp af programmerbare dataloggere.

Lejlighed	Luftskifte [h <sup>-1</sup> ]	T-inde [°C]	RF inde [%RF]	Kommentarer
1. sal (nord)	1,3	17,1	44,7	Varme på radiatorer. Håndværkere i lejligheden under målingerne.
1. sal (øst)	3,7	16,9	45,6	Varme på radiatorerne. Håndværkere i lejligheden benyttede altandøren under målingerne.
2. sal (vest)	1,9	19,2	38,0	Elektrisk varmeblæser med udeluftindtag i nabolejlighed.
2. sal (syd)	1,4	18,6	41,2	Elektrisk varmeblæser med udeluftindtag i nabolejlighed.
3. sal (nord)	2,0	18,4	39,4	På denne etage var der en elektrisk varmeblæser i det central adgangsrum til lejlighederne.
3. sal (syd)	2,1	18,9	38,0	På denne etage var der en elektrisk varmeblæser i det central adgangsrum til lejlighederne.

Indeluftens temperatur og relative fugtighed i de undersøgte lejligheder er målt til henholdsvis ca. 18 °C og 40-45 %RF. Tilstanden svarer til ca. 7 gH<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> luft.

Luftskiftet i lejlighederne er målt til ca. 2 h<sup>-1</sup>. Lejligheden på 1. sal, øst adskiller sig fra de øvrige lejligheder såvel hvad angår luftskiftet som temperatur- og fugtforholdene. Luftskiftet er noget højere, idet håndværkere i lejligheden benyttede en midlertidig altandør hyppigt under målingerne. Af samme grund er indeluftens temperatur og relative fugtighed i den pågældende lejlighed henholdsvis lidt lavere og lidt højere end i de øvrige lejligheder.

Sammenlignes de målte luftskifter med både bygningsreglementets krav og typiske luftskifter i nye, færdige lejligheder, er luftskiftet i de undersøgte lejligheder selvsagt højt. Imidlertid, i betragtning af at lejlighederne ikke var færdige, og at temperaturforskellen inde/ude var i størrelsesordenen 10 °C, må de målte luftskifter betegnes som værende på et moderat niveau. I relation til fugtfjernelse i vinterperioden er de målte luftskifter på et acceptabelt niveau.

Den typiske metode til udtørring af bygningskonstruktioner og byggematerialer er kombinationen opvarmning og ventilation. Udtørring ved opvarmning alene er ikke muligt. Metoden med opvarmning og ventilation er først og fremmest effektiv om vinteren, hvor udeluftens affugtningspotentiale er størst på grund af lavt absolut vanddampindhold. Når opvarmning og ventilation anvendes i kombination, er opgaven at sikre, at ventilationen har den tilstrækkelige og nødvendige størrelse til at sikre affugtning. Hvis ventilationen er for stor, vil metoden være unødvendigt energikrævende, idet der vil være et misforhold mellem energibehovet til opvarmning og den mængde fugt, der fjernes ved ventilationen. Hvis ventilationen er for lille, vil metoden indebære en risiko for, at opvarmningen medfører en øget luftfugtighed, som trænger ud i konstruktionen. En almindelig anbefaling til det nødvendige luftskifte i bygninger med henblik på udtørring om vinteren er 2-3 h<sup>-1</sup> (Møller, 2010), hvilket er på niveau med det målte.

Fotos fra byggepladsen



Figur 34. Vesttårnet set fra nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 35. Vesttårnet (tv.) og østtårnet (th.), set fra nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 36. Østtårnet set fra nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 37. Østtårnet set fra nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 38. Lejlighed I nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 39. Lejlighed I nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 40. Lejlighed I nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 41. Lejlighed I nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).





Figur 42. Lejlighed I nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).



Figur 43. Lejlighed I nordtårnet (Foto: Niels Christian Bergsøe).

#### Referencer

Elsparefonden. (2009). *Gør byggepladsen energirigtig*. ISBN 978-87-92080-99-8. Lokaliseret på:  
<http://nilstad.dk/Bibliotek/Root/EI-installation/Byggeplads%20energirigtig%20-%20elsparefonden.pdf>

Møller, E.B. (red.). (2010). *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. Lokaliseret på:  
[http://bygningsreglementet.dk/file/154179/vejledning-fugt\\_i\\_byggeriet.pdf](http://bygningsreglementet.dk/file/154179/vejledning-fugt_i_byggeriet.pdf)

## Bilag 3. Vandindtrængning

For at undersøge dybden af vandindtrængning i forskellige betonkonstruktioner er der udført 1D simuleringer i WUFI Pro. Simuleringerne er udført på ydervægge med tykkelser på hhv. 100mm, 200mm og 300mm. Ydervæggen var orienteret mod syd-vest, og slagregnen er indregnet for en høj bygning, men for middelområdet på bygningen, hvilket betyder, at slagregnen er medregnet omkring midten af bygningens facade, som altså ikke er den kritiske placering på facaden.

Vandindtrængningen er undersøgt for nedenstående materialer, hvor sandwichelementer er sammenlignelige med resultaterne for beton. Materialeegenskaberne er beskrevet i tidligere afsnit.

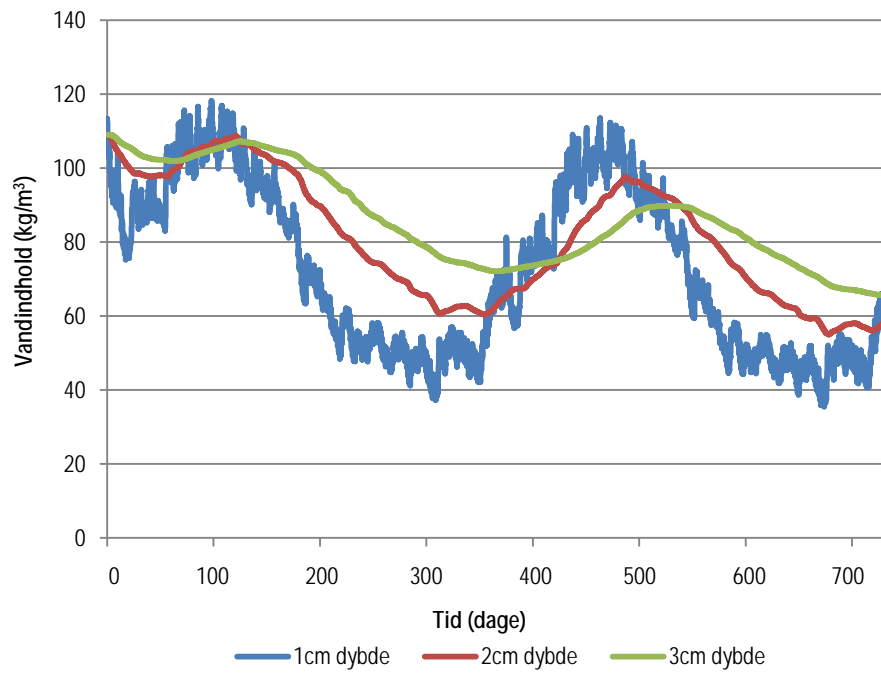
Byggematerialer:

- Beton med v/c tal på 0,4-0,7
- Porebeton
- Letklinkerbeton med densitet på 1350-1850 kg/m<sup>3</sup>

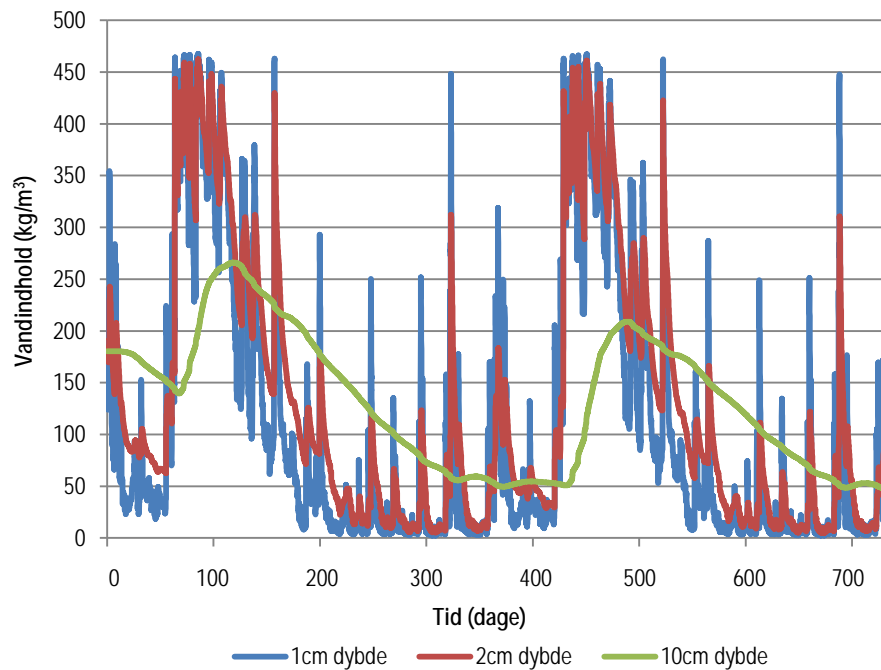
Vandindtrængningsdybden har stor betydning for hvor meget fugt, der skal udtørres. I en ydervæg af beton vil det ikke være realistisk at forvente at hele tykkelsen bliver opfugtet, og skal udtørres efter en regnpåvirkning. Vandindholdet er derfor undersøgt i de yderste 4 cm af betonen, hvor der har været anvendt udeklima for Lund LTH, Sverige. Som indeklima er der anvendt udeklima for temperatur og relativ fugtighed, hvilket svarer til en ydervæg under opførelse, som står i det fri og har et dækelement eller anden afskærmning over. Er ydervæggen derimod fremstillet af porebeton, kan det godt være at hele tykkelsen bliver opfugtet pga. porøsiteten. Indtrængningsdybden efter en regnpåvirkning er derfor undersøgt for hele tykkelsen af porebetonvæggen. Vandindtrængningsdybden i en ydervæg af letklinkerbeton forventes at ligge et sted imellem. Resultaterne har dog vist at vandindtrængningsdybden kan sammenlignes med vandindtrængningsdybden i en ydervæg af beton. Dette tilskrives de egenskaber af betonen i et letklinkerbetonelement, samt tilslagets vandafvisende egenskaber.

Resultaterne for regnens indtrængning i ydervægge af betonelementer og porebeton er vist i Figur 44 - Figur 45 for 200 mm tykke konstruktioner. Resultaterne er også repræsentative ved andre tykkelser af konstruktionerne, dog med undtagelse af 300 mm porebeton, hvor regnen kun trængte ca. 140 mm ind i konstruktionen. Dybden er bestemt ud fra at fugtindholdet i konstruktionen ikke overstiger startfugtindholdet i konstruktionen.

For betonelementet, samt letklinkerbetonelementer og sandwichelementer ses det af fugtindholdet kun overstiger startbetingelserne i den yderste centimeter af konstruktionen. Omvendt ses det for porebeton at hele tykkelsen af konstruktionen opfugtes. Dette understreger at elementer af porebeton bør opbevares overdækket og beskyttet mod regn under opførelsen.



Figur 44. Vandindhold ( $\text{kg/m}^3$ ) på forskellige dybder i en 20cm ydervæg af beton med v/c-tal 0,6. Startfugtiveauet var på  $109 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 45. Vandindhold ( $\text{kg/m}^3$ ) på forskellige dybder i en 20cm ydervæg af porebeton. Startfugtiveauet var på  $180,3 \text{ kg/m}^3$ .

## Bilag 4. Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg

Betonelementer kan leveres med mange forskellige materialeegenskaber som afhænger af anvendelsesområde. Det givne anvendelsesområde er med til at bestemme miljøklasse, v/c og styrkeklasse. I dette eksempel tages der udgangspunkt i hhv. en ydervæg og en skillevæg bestående af 10 cm beton med v/c-tal på 0,6 (passiv miljøklasse).

### Beregningsgrundlag i WUFI

Ydervæg og skillevæg er begge orienteret mod syd-vest. På ydervæggen er slagregnen indregnet som værende for en høj bygning men for middelområdet på bygningen (10-20 m over terræn), hvilket betyder, at slagregnen ikke er medregnet som den mest kritiske værdi.

Simuleringer foretages for ydervæggen og skillevæggen opført hhv. om vinteren (1/1) og om sommeren (1/8), og for situation 3-5 på byggepladsen beskrevet i afsnit *Situationer på byggepladsen*. Som udgangspunkt i simuleringerne bruges den relative fugtighed betonelementet har ved levering på byggepladsen, For betonelementer med v/c-tal 0,6 bruges en relativ fugtighed på 95%.

Fugtforholdet er undersøgt i de yderste 2 cm af betonen svarende til den krævede dybde ved tosidig udtørring, hvor der har været anvendt udeklima inklusiv regn og sol for Lund LTH, Sverige på ydersiden af ydervæggen. Som indeklima i situation 3 (a/b) er der anvendt udeklima for temperatur og relativ fugtighed, dog uden regn og sol, hvilket svarer til, at det er en ydervæg, som under opførelse står i det fri og har et dækelement eller anden afskærmning over (opbevaring under ventileret overdækning). I situation 4 og 5 (a/b) antages det, at ydervæggen er opført i en opvarmet bygning. Derfor anvendes der indeklima på den ene side af betonelementet. Som indeklima anvendes der en konstant temperatur på 20 °C og relativ fugtighed på hhv. 30% og 50%. Betragtes skillevægge anvendes samme data for udeklima og indeklima. Dvs., i situation 3 (a/b) er der anvendt udeklima for temperatur og relativ fugtighed som ude- og indeklima. På den samme måde er et opvarmet indeklima anvendt på begge sider af skillevæggen i situation 4 og 5 (a/b).

### Resultater

#### Relativ fugtighed og udtørningsperiode

Resultaterne for den beregnede relative fugtighed for situation 3-5 på byggepladsen er vist i Tabel 32 og Tabel 33. Den relative fugtighed evalueres efter 3 og 6 måneder, da det ikke kan forventes at betonelementer vil opnå ligevægt med omgivelserne med det samme.

Tabel 32. Relativ fugtighed med forskellige randbetingelser for en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,6.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	93	91
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	90	90
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	85	77,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	82,5	79
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	92	85
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	85,5	93

<sup>1)</sup> For ydervægge hvor udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen, ses der bort fra sol og regn.

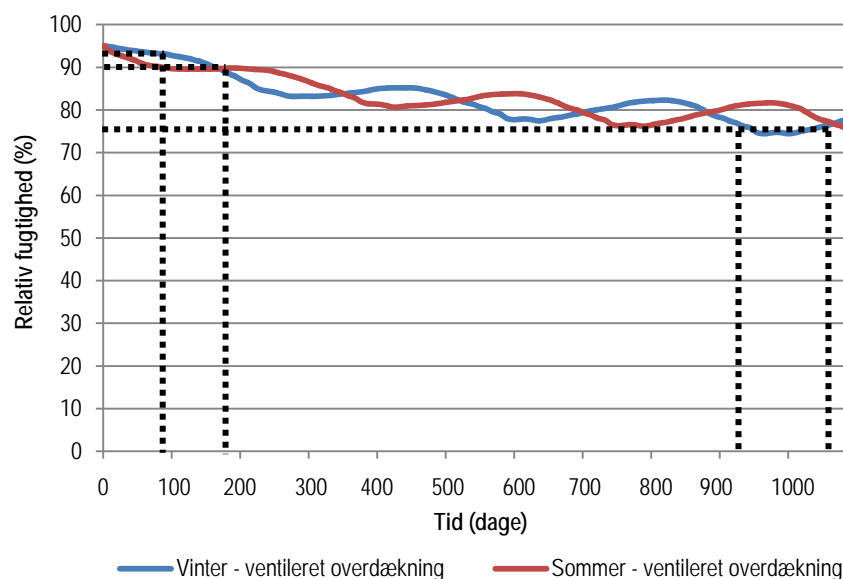
Tabel 33. Relativ fugtighed med forskellige randbetingelser for en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,6.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	93,5	90
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89,5	90
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	82,5	72
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	82,5	72,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	85	78,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	84,5	79

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Resultaterne viser, at der går lang tid før betonelementer med v/c-tal på 0,6 vil opnå ligevægt med omgivelserne i scenarie 3-5. Figur 46 og Tabel 31 viser at det tager længere tid for en betonydervæg opført under ventileret overdækning i en sommerperiode at tørre ud, end hvis det samme element blev opført i en vinterperiode. Det samme kan ses for situation 4.

På Figur 46 kan man aflæse den relative fugtighed betonydervæggen opnår 3 og 6 måneder efter opførelsen under en ventileret overdækning i hhv. vinter- og sommerperiode (scenarie 3 a/b). Derudover vises udtørningstid i dage for at opnå en relativ fugtighed på 75% for videre arbejde med betonelementet.



Figur 46. Relativ fugtighed i en 10 cm betonydervæg med v/c-tal 0,6 ved ventileret overdækning på byggepladsen.

For en skillevæg i beton tager det ligeledes længere tid at tørre ud, hvis den bliver opført under ventileret overdækning i en sommerperiode, end hvis det samme element blev opført i en vinterperiode. Det fremgår dog af Tabel 33 modsat en ydervæg af beton, at de samme fugtforhold opnås for et skillevæggsbetonelement opført i en sommer- og vinterperiode for de forskellige randbetingelser i situation 4 og 5.

## Vandindhold

Tabel 34 og Tabel 35 viser vandindholdet for en ydervæg og skillevæg af beton med forskellige randbetingelser efter 3 måneder.

Tabel 34. Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,6. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	95	109
2. Efter regnpåvirkning	99,5 <sup>1)</sup>	111,2 <sup>2)</sup>
3a. Ventileret overdækning, vinter	93	101
3b. Ventileret overdækning, sommer	90	89
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	85	76
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	82,5	70
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	92	97
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	85,5	87
6. Videre arbejde	75	57
7. Driftssituation	50	34

<sup>1)</sup> Værdi for yderste 1 cm af konstruktionen og resten af vandindholdet svarer til levering på byggepladsen. <sup>2)</sup> Middelværdi for vandindhold efter formel (1), mens 99,5% RF svarer til 130,8 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 35 Vandindhold under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,6. Værdierne i scenarie 3-5 er efter 3 måneders simulering i WUFI. Skillevægge er ikke udsat for sol og regnpåvirkning.

Situation	Relativ fugtighed [%]	Vandindhold, w [kg/m <sup>3</sup> ]
1. Levering på byggeplads	95	109
2. Efter regnpåvirkning	-	-
3a. Ventileret overdækning, vinter	93,5	103
3b. Ventileret overdækning, sommer	89,5	87
4a. Opvarmet bygning, vinter (RF 30%)	82,5	70
4b. Opvarmet bygning, sommer (RF 30%)	82,5	70
5a. Opvarmet bygning, vinter (RF 50%)	85	76
5b. Opvarmet bygning, sommer (RF 50%)	84,5	75
6. Videre arbejde	75	57
7. Driftssituation	50	34

Vandindhold for de forskellige situationer blev fastlagt ud fra den relative fugtighed (beregnet for situation 3-5) og sorptionskurven for betonelementer med v/c-tal 0,6 for de forskellige situationer beskrevet i rapportens afsnit *Situationer på byggepladsen*. Til bestemmelse af vandindhold efter regnpåvirkning i betonydervæggen regnes der kun med at de yderste 1 cm af betonydervæggen bliver opfugtet efter regnpåvirkning. For en betonydervæg med v/c-tal 0,6 beregnes vandindhold, w [kg/m<sup>3</sup>] ved regnpåvirkning efter formel 16.

$$W_{element} = \frac{0,01 w (99,5 RF) + (d - 0,01) w (95 RF)}{d} \quad (16)$$

## Bilag 5. Resultater for betonelementer

Der tages udgangspunkt i hhv. en ydervæg og en skillevæg bestående af 10 cm og 20 cm beton med v/c-tal på 0,4-0,6. Simuleringer foretages med start i sommer og vinter (1/1 og 1/8) og beregnes over mindst 2 år.

Data er fremskaffet som beskrevet i *Bilag 4 – Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg og afsnit Byggematerialer - Betonelementer*.

Den relative fugtighed og vandindholdet er undersøgt i de yderste 2 cm af betonelementer med en tykkelse på 10 cm, og i de yderste 4 cm af betonelementer med 20 cm tykkelse ved tosidig udtørring. Den relative fugtighed i betonen ved start af simuleringer er fastsat ud fra fugtindhold i betonelementet ved levering på byggeplads efter 4 uger, hvor det meste af hydratiseringen er sket.

I det følgende vises resultaterne for relativ fugtighed efter 3 og 6 måneder for situationer 3-5 (a/b), opbevaring/opførelse på byggepladsen, som defineret under afsnit *Situationer på byggepladsen*. Det tilhørende vandindhold kan findes ud fra sorptionskurver for betonelementer med v/c-tal på 0,4-0,6, og er også illustreret i rapporten for en 10 cm ydervæg og skillevæg af beton med v/c-tal 0,4-0,6.

*Miljøklasse: Passiv*

Tabel 36. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,6

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	93	91
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	90	90
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	85	77,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	82,5	79
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	92	85
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	85,5	93

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 37. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,6.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	93,5	90
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89,5	90
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	82,5	72
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	82,5	72,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	85	78,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	84,5	79

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 38. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg, v/c-tal 0,6.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	93,5	91,5
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	93,5	93
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	92	88
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	91,5	87
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	90	86
5b	udeklima	20°C, RF 50%	92	88

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 39. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg, v/c-tal 0,6.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94,5	93,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	93,5	93,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	92	84
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	92	84
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	92	90
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	92	89,5

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

### Miljøklasse: Moderat

Tabel 40. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,5.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	91,5	87
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	88	88,5
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	82	71,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	80	76
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	91,5	82,5
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	83	94

<sup>1)</sup> Hvis Udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 41. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,5.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	92,5	88,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89,5	90
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	75	64
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	79	72
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	79,5	72,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	82,5	78

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.



Tabel 42. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg, v/c-tal 0,5.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	92	88
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	91,5	91
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	92	90
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	88,5	85
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	88,5	84
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	90	87,5

<sup>1)</sup> Hvis Udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 43. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg, v/c-tal 0,5.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	92	91,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	91,5	91
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	89	86
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	88,5	86,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	89,5	87
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	90	87,5

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

### Miljøklasse: Aggressiv og Ekstra aggressiv

Tabel 44. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg, v/c-tal 0,4.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	Inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	89,5	84
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	85	85
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	82	71
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	80	76
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	89	80,5
5b	udeklima	20°C, RF 50%	84	87

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 45. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg, v/c-tal 0,4.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	90	86,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	87	87,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	75	64,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	79	71
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	79,5	72,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	82	79

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 46. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg, v/c-tal 0,4.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	89	87,5
3b	udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	87,5	87
4a	udeklima	20°C, RF 30%	88	85
4b	udeklima	20°C, RF 30%	87	83,5
5a	udeklima	20°C, RF 50%	87	81,5
5b	udeklima	20°C, RF 50%	87	85,5

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 47. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg, v/c-tal 0,4.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	90	89,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89	88,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	87	82,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	86,5	82,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	87	84
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	87	84

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

## Bilag 6. Resultater for porebeton

Der tages udgangspunkt i hhv. en ydervæg og en skillevæg bestående af porebeton med en tykkelse på 10 cm og 20 cm. Simuleringer foretages med start i sommer og vinter (1/1 og 1/8) og beregnes over mindst 2år.

Ydervæg og skillevæg er opbygget som i eksemplet beskrevet i *Bilag 4 – Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg*. Modsat betonelementer, er slagregnen ikke indregnet på ydervæggen af porebetonelementer, da det har vist sig at regnen trænger helt inde i porebetonelementer (op til 14 cm), og derfor bør de opbevares overdækket og beskyttet mod regn under opførelsen.

Den relative fugtighed og vandindholdet er undersøgt i de yderste 2 cm af porebetonelementer med tykkelse 10 cm, og i de yderste 4 cm af porebetonelementer med 20 cm tykkelse ved tosidig udtørring. Startbetingelserne for den relative fugtighed i porebetonen er fastsat ud fra fugtindholdet i porebetonen ved levering på byggeplads, svarende til 30 vægt%.

I det følgende vises resultaterne for relativ fugtighed efter 3 og 6 måneder for situationer 3-5 (a/b), opbevaring/opførelse på byggepladsen, som defineret under afsnit *Situationer på byggepladsen*. Det tilhørende vandindhold kan findes ud fra den sorptionskurve for porebeton, og er også illustreret i rapporten for en 10 cm ydervæg og skillevæg af porebeton.

Tabel 48. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>2)</sup>	95	88
3b	udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>2)</sup>	93	97
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	40,5	39,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	41	41
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	68	55,5
5b	udeklima	20°C, RF 50%	60	63

<sup>1)</sup> Regn og sol bliver ikke medregnet for udeklima, da elementer bliver fuldt opfugtet ved regnpåvirkning og bør beskyttes mod regn. <sup>2)</sup> Regn og sol er negligeret.

Tabel 49. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	Inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	95	88
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	93	97
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	30	30
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	30	30
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	50	50
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	50	50

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 50. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>2)</sup>	95,5	94
3b	udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>2)</sup>	94	95
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	93	67,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	93	60
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	93	85
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	93	85

<sup>1)</sup> Regn og sol bliver ikke medregnet for udeklima, da elementer bliver fuldt opfugtet ved regnpåvirkning og bør beskyttes mod regn. <sup>2)</sup> Regn og sol er negligeret.

Tabel 51. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	95,5	94
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94	95
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	90	31
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	90	31
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	93	66
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	93	65

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

## Bilag 7. Resultater for sandwichelementer

Der tages udgangspunkt i hhv. en ydervæg og en skillevæg bestående af sandwichelementer med for- og bagmur af beton med v/c-tal på 0,4-0,6. Som isolering bruges 30 cm mineraluld med  $\lambda = 0,043 \text{ W/m K}$ . Tykkelsen af isoleringen er fastsat for at opnå en U-værdi af sandwichelementerne på omkring  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Som formur bruges der en tykkelse på 7 cm beton, og som bagmur bruges der en tykkelse på 10 cm beton. Derudover laves der også simuleringer for en formur med tykkelse på 10 cm og en bagmur med tykkelse på 15 cm. Simuleringer foretages med start i sommer og vinter (1/1 og 1/8) og beregnes over mindst 2 år. Simuleringerne er udført som beskrevet i *Bilag 4 – Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg*.

Den relative fugtighed og vandindholdet er undersøgt i de yderste 4 cm af sandwichelementer med 10 cm bagmur, og i de yderste 6 cm af sandwichelementer med 15 cm bagmur, da der er tale om ensidig udtørring pga. isoleringen. Startbetingelserne for den relative fugtighed i betonen er fastsat ud fra fugtindhold i betonelementet ved levering på byggeplads efter 4 uger, hvor der for betonelementer vurderes at det meste af hydratiseringen er sket.

I det følgende vises resultaterne for relativ fugtighed efter 3 og 6 måneder for situationer 3-5 (a/b), opbevaring/opførelse på byggepladsen, som defineret under afsnit *Situationer på byggepladsen*. Det tilhørende vandindhold kan findes ud fra sorptionskurver for betonelementer med v/c-tal på 0,4-0,6, og er også illustreret i rapporten for et sandwichelement med 10 cm bagmur af beton med v/c-tal 0,4-0,6.

*Miljøklasse: Passiv*

Tabel 52. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm bagmur som ydervæg, v/c-tal 0,6 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	94,5	93
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	94	94
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	89	83
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	92,5	87
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	90	85
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	91,5	87

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 53. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm bagmur som skillevæg, v/c-tal 0,6 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	Ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94,5	93
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	93	92,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	90,5	86,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	90,5	87,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	91	88
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	91	88

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 54. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm bagmur som ydervæg, v/c-tal 0,6 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	95	94,5
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	94,5	94,5
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	92,5	90,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	93	91,5
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	92,5	90
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	93	92

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 55. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm bagmur som skillevæg, v/c-tal 0,6 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	95	94,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94	94
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	93	91,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	92,5	91,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	93	92
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	93	92

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

### Miljøklasse: Moderat

Tabel 56. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm bagmur som ydervæg, v/c-tal 0,5 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	92	91,5
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	91	91
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	87,5	81,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	87,5	83
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	88	83
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	88	85

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 57. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm bagmur som skillevæg, v/c-tal 0,5 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	92	91,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	91,5	91
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	89	84,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	88	84,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	89	86
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	89	86,5

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 58. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm bagmur som ydervæg, v/c-tal 0,5 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	92	91,5
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	92	91,5
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	92	89
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	92	89
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	92	90
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	92	90

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 59. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm bagmur som skillevæg, v/c-tal 0,5 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	92,5	92,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	92,5	92
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	92,	89,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	91	89,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	92	90
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	92	90

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

### Miljøklasse: Aggressiv og Ekstra aggressiv

Tabel 60. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm bagmur som ydervæg, v/c-tal 0,4 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	89	87,5
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	89,5	89
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	86	78,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	86	80,5
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	86,5	82
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	87	83

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 61. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm bagmur som skillevæg, v/c-tal 0,4 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89	87
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89	88,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	87	81
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	87	81
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	87	83
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	87	83

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 62. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm bagmur som ydervæg, v/c-tal 0,4 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	90	89
3b	Udeklima	Udeklima <sup>1)</sup>	90	89,5
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	89	87,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	89	87,5
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	89,5	87,5
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	89	88

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 63. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm bagmur som skillevæg, v/c-tal 0,4 og 1-sidig udtørring.

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	90	90
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	90	90
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	89,5	87,5
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	89	87,5
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	89	87,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	89	88

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.



## Bilag 8. Resultater for letklinkerbeton

Der tages udgangspunkt i hhv. en ydervæg og en skillevæg bestående af 10 cm og 20 cm letklinkerbeton med densitet på 1350, 1550 og 1850 kg/m<sup>3</sup>. Simuleringer foretages med start i sommer og vinter (1/1 og 1/8) og beregnes over mindst 2 år.

Ydervæg og skillevæg er opbygget som i eksemplet beskrevet i *Bilag 4 – Betonelementer – et eksempel på en ydervæg og skillevæg*. Data er fremskaffet som beskrevet i afsnit *Byggematerialer - Letklinkerbeton*.

Den relative fugtighed og vandindholdet er undersøgt i de yderste 2 cm af letklinkerbetonelementer med en tykkelse på 10 cm, og i de yderste 4 cm af letklinkerbetonelementer med 20 cm tykkelse ved tosidig udtørring. Fugtindholdet i letklinkerbetonen ved start af simuleringer er forskellig afhængig af dens densitet og er fastsat ud fra (Nilsson, 2009).

I det følgende vises resultaterne for relativ fugtighed efter 3 og 6 måneder for situationer 3-5, opbevaring/opførelse på byggepladsen, som defineret under afsnit *Situationer på byggepladsen*. Det tilhørende vandindhold kan findes ud fra sorptionskurver for letklinkerbetonelementer med densitet på 1350, 1550 og 1850 kg/m<sup>3</sup>, og er også illustreret i rapporten for en 10 cm ydervæg og skillevæg af letklinkerbeton med densitet på 1350, 1550 og 1850 kg/m<sup>3</sup>.

### Densitet 1350 kg/m<sup>3</sup>

Tabel 64. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg,  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3	RF efter 6
	ude	inde	måneder (%)	måneder (%)
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	94,5	78
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	90,5	90
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	75	43
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	60	52
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	88,5	62,5
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	76	75

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 65. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg,  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3	RF efter 6
	Ude	inde	måneder (%)	måneder (%)
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94	82
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94	94
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	53	33
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	50	33
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	70	52,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	70	53

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 66. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg,  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	95	94
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	94,5	94,5
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	94	85
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	94	85
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	94	91,5
5b	udeklima	20°C, RF 50%	94	92,5

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 67. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg,  $\rho = 1350 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	95	94,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94,5	94,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	94	78
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	94	78
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	94	87,5
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	94	87,5

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

### Densitet 1550 kg/m<sup>3</sup>

Tabel 68. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg,  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	86	75,5
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	82,5	85,5
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	70	44,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	56	53
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	80	60
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	71	76

<sup>1)</sup> Hvis Udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 69. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg,  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	89,5	81
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	86	88
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	50	36
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	50	36
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	65	53
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	65	53

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 70. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg,  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	94	88
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	92,5	92
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	87	80
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	84	79
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	90	82
5b	Udeklima	20°C, RF 50%	87	83

<sup>1)</sup> Hvis Udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 71. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg,  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	94,5	91
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	93	93
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	83	74
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	83	73
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	86	80
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	86	80

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

### Densitet 1850 kg/m<sup>3</sup>

Tabel 72. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm ydervæg,  $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	Inde		
3a	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	81	72,5
3b	Udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	83	87
4a	Udeklima	20°C, RF 30%	60	40,5
4b	Udeklima	20°C, RF 30%	49,5	52
5a	Udeklima	20°C, RF 50%	72,5	59
5b	udeklima	20°C, RF 50%	66	76,5

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 73. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 10 cm skillevæg,  $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	83	77,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	85	87,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	40	32
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	40	32
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	58	51
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	57,5	51

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.

Tabel 74. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm ydervæg,  $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	86,5	78,5
3b	udeklima	udeklima <sup>1)</sup>	84	86,5
4a	udeklima	20°C, RF 30%	76	64
4b	udeklima	20°C, RF 30%	72	66
5a	udeklima	20°C, RF 50%	80	71
5b	udeklima	20°C, RF 50%	76	74,5

<sup>1)</sup> Hvis udeklima bliver brugt på indersiden af ydervæggen negligeres sol og regn.

Tabel 75. Relativ fugtighed under forskellige situationer i en 20 cm skillevæg,  $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ .

Situation	Randbetingelser		RF efter 3 måneder (%)	RF efter 6 måneder (%)
	ude	inde		
3a	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	87,5	82,5
3b	Udeklima <sup>1)</sup>	Udeklima <sup>1)</sup>	86,5	87,5
4a	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	71	55
4b	20°C, RF 30%	20°C, RF 30%	70	55
5a	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	75	67
5b	20°C, RF 50%	20°C, RF 50%	75	67

<sup>1)</sup> For skillevægge tages der ikke højde for sol og regn, når der er angivet udeklima.





Udtørring af bygninger er en energikrævende proces, som bidrager til et væsentligt energiforbrug ved fx nybyggeri, renovering og efter vandskader. Projekt Energieffektiv fugthåndtering i byggeprocessen har gennem fem delprojekter kortlagt væsentlige parametre med betydning for energiforbruget ved udtørring, udviklet og demonstreret en energieffektiv udtørringsteknologi til anvendelse på byggepladser, samt udviklet et webbaseret beregningsværktøj.

Resultaterne fra de forskellige delprojekter er inkluderet i beregningsværktøjet, som skal hjælpe med at minimere energiforbruget til udtørring i byggefasen.

1. udgave, 2015  
ISBN 978-87-563-1680-4