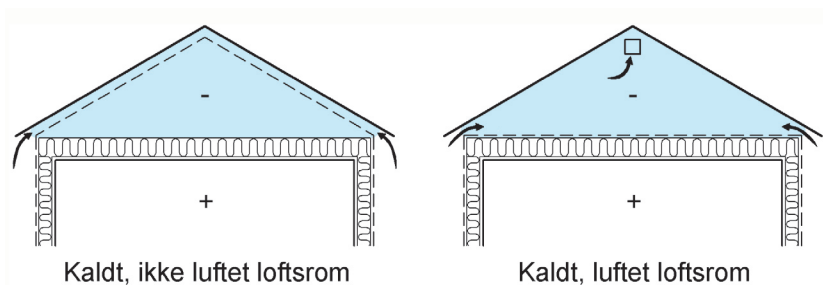


Sivert Uvsløkk

Tak med kaldt loft

Delrapport fra prosjekt 4 i FoU-programmet
«Klima 2000»



BYGGFORSK

Norges byggforskningsinstitutt

Sivert Uvsløkk

Tak med kaldt loft

Delrapport fra prosjekt 4 i FoU-programmet
«Klima 2000»

Prosjektrapport 396 – 2005

Prosjektrapport 396

Sivert Uvsløkk

Tak med kaldt loft

Delrapport fra prosjekt 4 i FoU-programet «Klima 2000»

Emneord: klimatilpasning, klimapåkjening, tak, fukt, temperatur, muggvekst, undertak, vindsperre, dampspærre, varmeisolasjon, ventilasjon, beregning

ISSN 0801-6461

ISBN 82-536-0902-7

150 eks. trykt av

AiT Edit

Innmat: 90 g Munken Lynx

Omslag: 200 g Munken Lynx

© Copyright Norges byggforskningsinstitutt 2005

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med Norges byggforskningsinstitutt er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

Adr.: Forskningsveien 3 B
Postboks 123 Blindern
0314 OSLO

Tlf.: 22 96 55 55

Faks: 22 69 94 38 og 22 96 55 08

www.byggforsk.no

Hovedsamarbeidspartnere

Forsvarsbygg, Norges forskningsråd (NFR), Husbanken, Finansnæringens Hovedorganisasjon (FNH), Oslo kommune Undervisningsbygg Oslo KF, Statsbygg, Statens bygningstekniske etat (BE), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)

Bransjepartnere

Brødr. Sunde AS, COWI AS, Dr. Techn. Kristoffer Apeland A/S, Glava A/S, Icopal as, Isola as, Isolitt as, Jotun A/S, Jackon AS, Løvolds Industrier AS, maxit as, Moelven ByggModul AS, Protan A/S, A/S Rockwool, Rambøll Norge AS, Skanska Norge AS, Vartdal Plastindustri AS, Aadnesen as

Bransjeforeninger

Boligprodusentenes Forening, Byggenæringens Landsforening (BNL), Byggevareindustriens forening, Isolasjonsprodusentenes forening (IPF), Norges Byggmesterforbund (Byggmesterforbundet), Plastindustriforbundet (PIF), Takprodusentenes forskningsgruppe (TPF), Ventilasjons- og blikkenslagerbedriftenes landsforbund (VBL)

Norske fagmiljøer

Arkitekthøgskolen i Oslo (AHO), CICERO Senter for klimaforskning, Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB), Meteorologisk institutt, Riksantikvaren, Standard Norge

Forord

Denne prosjektrapporten omhandler fukt og temperaturforhold på kalde loft med spesiell vekt på en ny variant: Kaldt, ikke luftet loft. Det kalde, uluftede loftet har ingen spalteåpninger fra friluft og inn til selve loftsrommet. Slike spalteåpninger ved raftutstikket er en mulig brannspredningsvei og kan derfor være uforenlig med krav til brannsikkerhet i bygninger med flere boenheter som for eksempel rekkehus. I stedet kan nødvendig lufting, for å transportere bort fukt fra takkonstruksjonen og for å hindre snøsmelting, oppnås ved at all lufting skjer gjennom luftspalten mellom undertaket og taktekningen. Løsningen betinger at undertaket er dampåpent slik at fukt fra loftet kan tørke ut ved diffusjon gjennom undertaket og opp til luftspalten under taktekningen for videre transport ut av taket ved luftstrømning gjennom denne spalten.

Rapporten redegjør for fukttekniske beregninger som er gjennomført, og viser hvilke forhold som påvirker fukt- og temperaturforhold i taket og dermed risikoen for vekst av mugg- og annen overflatesopp.

Arbeidet er utført innenfor prosjekt 4 *Studie av kompakte og luftede isolerte tak*. Prosjektet er en del av FoU-programmet *Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner* [1].

Klima 2000 sitt hovedmål er gjennom forskning og utvikling å oppdatere prinsippløsninger for konstruksjoner som både gir økt bestandighet mot og økt pålitelighet ved ytre klimapåkjenninger, samt kartlegge mulige virkninger av klimaendringer på det bygde miljø - og hvordan samfunnet best kan tilpasse seg endringene. Hensikten er å definere klarere kriterier og anvisninger for prosjektering og utførelse av kritiske konstruksjonsdetaljer, hovedsakelig knyttet til bygningers ytre klimaskjerm. Det skal i tillegg utvikles retningslinjer for hvordan de ulike aktører i plan- og byggeprosessen kan medvirke til å unngå at en bygning får skader eller ulemper som er forårsaket av fukt.

Klima 2000 er et viktig ledd i arbeidet med utvikling og revisjon av anvisninger i Byggforskserien og produktdokumentasjon i form av tekniske godkjenninger og sertifiseringer. Programmet ledes av Norges byggforskningsinstitutt (Byggforsk) og gjennomføres i samarbeid med Forsvarsbygg, Husbanken, Statsbygg, Finansnæringens Hovedorganisasjon (FNH), Undervisningsbygg Oslo KF, Statens bygningsstekniske etat, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) og Norges forskningsråd, samt andre fagmiljøer og sentrale aktører i BAE-sektoren. Programmet som ble igangsatt i august 2000, og vil pågå frem til utgangen av år 2006, består av 14 ulike prosjekter.

Vi vil rette en takk til medarbeidere både ved Byggforsk og NTNU samt samarbeidspartnerne i Klima 2000 for verdifulle innspill om lufting av tak og tilgrensende problemstillinger. En spesiell takk til Trond Ø. Ramstad for nyttige råd både under veis og ved utarbeiding av rapporten.

Trondheim, desember 2005

Tore Kvande
Programleder
Norges byggforskningsinstitutt

Sivert Uvsløkk
Prosjektleder, prosjekt 4
Norges byggforskningsinstitutt

Sammendrag

Rapporten omhandler en teoretisk studie av fukt- og temperaturforholdene i tak over kalde loft og risikoen for muggvekst på undertaket. Beregningsresultatene er relevante også for tak med oppholdsrom på deler av loftet og for andre isolerte trectak.

Som andre skrå trectak i kaldt klima, må tak med kaldt loft luftes av to grunner. De må luftes for å transportere bort fukt for å hindre soppvekst og for å transportere bort varme for å hindre snøsmelting og ising.

Tradisjonelt har kalde loft blitt luftet ved luftgjennomstrømning gjennom selve loftet via åpninger ved raft og i møne eller i gavlveggene. Lufteåpninger inn til selve loftet kan imidlertid også ha negative konsekvenser. Nedbør, først og fremst i form av snø, kan blåse inn gjennom lufteåpningene og felles ut inne på loftet hvor det kan føre til fuktskader. På steder som er utsatt for snøinndrev frarådes det derfor å bygge hus med kalde luftede loftsrom. En annen svakhet med luftede loftsrom er at brann kan spre seg forholdsvis lett fra vindu og opp gjennom spalteåpningen under takutstikket, inn på loftet og videre til andre leiligheter i flermannsboliger.

Behovet for trectak med bedre sikkerheten mot brannspredning og redusert fare for inndrev av nedbør er bakgrunnen for denne teoretiske undersøkelsen av kalde loft. Best sikkerhet mot brannspredning i trectak får en når isolasjonen ligger i skråtaket, som i sperretak, hvor isolasjonen fyller alle hulrom i taket slik at minst mulig av treverket blir eksponert for flammene ved en brann.

I rapporten redegjøres det for en ny løsning som også gjør det mulig å bygge tak med kalde loft og tak med oppholdsrom på deler av loftet med akseptabel sikkerhet mot brannspredning. Det gjøres ved å bruke nye, dampåpne undertaksmaterialer og lukke selve loftsrommet slik at det ikke er noen åpninger fra det fri og inn på loftet. Det reduserer faren for at branngasser og flammer kommer inn på loftet via takutstikket. I tillegg må undertaksbelegget understøttes av isolasjon eller et taktrommateriale som gir minst ti minutters brannmotstand. All luftingen skjer ved luftgjennomstrømning i en luftspalte mellom det dampåpne undertaket og taktekningen. Taket får nødvendig uttørring ved at fukten diffunderer ut gjennom det dampåpne undertaket og transporteres videre ut av luften som strømmer gjennom luftespalten. For å hindre snøsmelting må luftespalten og spalteåpningene dimensjoneres på tilsvarende måte som for andre tak med kombinert undertak og vindsperre.

For å unngå oppfukting og fare for muggvekst på undertaket er det svært viktig at undertaket har lav vanddampmotstand. Det er imidlertid også mange andre forhold som har betydning for fukt- og temperaturforholdene og dermed risikoen for muggvekst i taket. For å kunne undersøke dette på en helhetlig og systematisk måte har Byggforsk utviklet et eget beregningsprogram. Det spesielle ved beregningsprogrammet er at det beregner fukt og varmetransport på grunn av luftlekkasjer gjennom golv, vegger og tak som følge av ”skorsteinseffekten” på en detaljert måte. Det er viktig ettersom luftlekkasjer er en dominerende transportmekanisme for fukt til og fra loftet samtidig som luftlekkasjer også kan ha en gunstig virkning ved at de inngår i bygningens samlede ventilasjon. I rapporten redegjøres det for øvrig for de viktigste klimatiske, bygningstekniske og brukerbestemte forhold som har betydning for fukt- og temperaturforholdene i taket og som programmet tar hensyn til.

Det er satt opp forenklede sammenhenger mellom veksthastighet for muggsopp og henholdsvis temperatur og relativ luftfuktighet, RF og det er definert et muggvekstpotensial som er et relativt mål på muggvekstfaren i en tidsperiode, vanligvis et år.

Det er gjennomført en rekke beregninger for å kvantifisere hvilken betydning blant annet materialegenskaper, konstruksjonsoppbygging, antall etasjer, arbeidsutførelse, friskluftventilasjon i huset og brukernes fuktproduksjon har for fukt- og temperaturnivået og dermed for muggvekstrisikoen på loftet.

Av bygningstekniske forhold er det i følge beregningene undertakets motstand mot vandampdiffusjon og bygningens lufttetthet som har størst innvirkning på muggvekstforholdene for tak uten luftede loftsrom. Basert blant annet på disse beregningene anbefaler Byggforsk at samlet s_d -verdi for undertaksbelegg og eventuell taktro er så lav som mulig og ikke over 0,5 m. Det er samme grenseverdi for dampmotstand som anbefalt for vindsperrer. Grenseverdien gir i de fleste tilfeller tilfredsstillende uttørkingsevne og akseptabel sikkerhet mot muggvekst på undertaket.

Av brukerstyrte forhold er god ventilasjon i forhold til fuktproduksjonen i en bygning et effektivt tiltak for å hindre fuktskader og muggvekst på undertaket. Anbefalt minimumsventilasjon for å sikre god inneluftkvalitet i boliger er ca. 0,5 luftvekslinger i timen og det er normalt også nok ventilasjon til å sikre lav fukttilførsel til loftet.

Beregningene som er gjennomført for ni forskjellige steder i Norge viser at risikoen for muggvekst på undertaket varierer en del med uteklimaet. Muggvekstfaren er størst om våren mens det ennå er fuktig på loftet og samtidig høy nok temperatur til at muggsoppen kan vokse. Muggvekstfaren avtar utover forsommeren etter hvert som fukten på loftet tørker ut. Størst fare for muggvekst på undertaket er det i kyststrøk som i Kristiansund N, på grunn av høy RF i utelufta på forsommeren. På kalde steder som Karasjok og Røros kan det bli høyt fuktinnhold på loftet, men lave temperaturer begrenser muggveksten.

Beregningene viser for øvrig at tradisjonelle kalde, luftede loft har bedre uttørkingsevne enn lukkede, uluftede loft. Når midlere vindhastighet er over ca. 2 m/s er det i følge beregningene nok med en kontinuerlig spalteåpning på noen få millimeter ved hvert takutstikk for å få tilstrekkelig uttørkingsevne. På steder hvor snø blir liggende på taket er det imidlertid nødvendig med vesentlig større lufteåpninger for å hindre snøsmelting.

Soloppvarming av taktekningen gjør at også undertaket og loftet kan få vesentlig høyere temperatur enn uteluften i perioder. Dette er det ikke tatt hensyn til i beregningene, men denne oppvarmingen kan ha stor betydning på flere måter. På ettervinteren kan soloppvarmingen føre til økt muggvekst, men etter hvert også til raskere uttørking. Om sommeren kan temperaturen på undertaket bli så høy at muggsoppen dør, noe som sannsynligvis er med på å begrense muggveksten i mange tak.

Innhold

FORORD	3
SAMMENDRAG	4
INNHold.....	6
1 INNLEDNING.....	7
1.1 FORMÅL	7
1.2 BAKGRUNN	7
2 TRADISJONELT KALDT, LUFTEt LOFT	10
2.1 GENERELT	10
2.2 GOD UTtØRKINGSEVNE	10
2.3 FARE FOR SNØINNDREV	10
2.4 KALDLUFTINNTREGNING I ISOLASJONEN	11
2.5 KALDLUFTINNTREGNING I ISOLASJONEN I TRADISJONELLE A-TAKSTOLTAK	11
2.6 RISIKO FOR BRANNSPREDNING	13
2.7 BEHOV FOR ALTERNATIVE LØSNINGER	14
3 NY TAKLØSNING – KALDT, IKKE LUFTEt LOFT	15
3.1 KONSTRUKSJONSPRINSIPP	15
3.2 NYE DAMPÅPNE MATERIALER	16
3.3 NY ANBEFALT ØVRE GRENSEVERDI FOR VANNDAMP MOTSTAND	16
3.4 REDUSERT RISIKO FOR BRANNSPREDNING	17
3.5 UTtØRKINGSEVNE	17
3.6 BEHOV FOR UNDERTAK MED LAV DAMPMOTSTAND OG GOD BRANNMOTSTAND	17
3.7 NYTT BYGGDETALJBLAD	18
4 BEREGNINGSPROGRAMMET ”TAKFUkt”	19
4.1 BAKGRUNN	19
4.2 KLIMABETINGELSER	20
4.3 BYGNINGSMESSIGE INNGANGSVERDIER	21
4.4 TRANSPORTMEKANISMER	23
4.5 VARME- OG MASSE BALANSE	24
4.6 SOPPVEKST	25
5 BEREGNINGSRÉSULTATER	28
5.1 GENERELT	28
5.2 TAK MED KALDT, IKKE LUFTEt LOFT	28
5.3 TAK MED LUFTEt, KALDT LOFT	35
6 KOMMENTARER OG OPPSUMMERING	40
6.1 GENERELT	40
6.2 TAK MED KALDT, IKKE LUFTEt LOFT	42
6.3 TAK MED KALDT, LUFTEt LOFT	43
REFERANSER	45
VEDLEGG	47

1 Innledning

1.1 Formål

Hovedformålet med denne teoretiske studien av tak over kalde loft har vært å undersøke hvilken betydning ulike klimatiske, bygningstekniske og bruksmessige forhold har for risikoen for vekst av mugg- og annen overflatesopp på undertaket.

Det er i første rekke varigheten av ugunstige kombinasjoner av fuktinnhold og temperatur som bestemmer risikoen for soppvekst i taket. For å kunne undersøke dette på en helhetlig og hensiktsmessig måte har Byggforsk utviklet et eget beregningsprogram. Ved hjelp av dette programmet har vi gjennomført en rekke beregninger for å kvantifisere hvilken betydning blant annet materialeegenskaper, konstruksjonsoppbygging, antall etasjer, arbeidsutførelse, friskluftventilasjon i huset og brukernes fuktproduksjon har for fukt- og temperaturnivået på loftet.

Beregningsresultatene, som er oppsummert i denne rapporten, vil være en viktig del av grunnlaget for Byggforsks anbefalinger i Byggforskserien og andre publikasjoner. Det gjelder både ytelseskrav til materialsjikt og for utarbeiding av alternative løsninger for tak med kalde loft samt andre tiltak for å redusere risikoen for skadelig muggvekst i tak.

Beregningsprogrammet og resultatene er også ment å være til hjelp ved valg av tilpassede løsninger ut fra lokalt klima og lokale forutsetninger.

1.2 Bakgrunn

1.2.1 Hvorfor må tak luftes?

Det er to formål med å lufte tak i kaldt klima, som i Norge:

- ◆ å transportere bort fukt for å hindre soppvekst
- ◆ å transportere bort varme for å hindre snøsmelting og ising

Soppvekst

Behovet for å transportere bort fukt gjelder først og fremst takkonstruksjoner som inneholder materialer som kan gi grobunn for skadelig soppvekst, for eksempel tre og trebaserte materialer. Muggsopp og andre overflatesopper vokser på overflaten av materialer og svekker ikke materialenes bæreevne, men kan i verste fall være ødeleggende for inneluften på loftet og i bygningen. Vekst av mugg- og overflatesopp er sterkt avhengig av temperatur- og fuktforholdene ved materialoverflaten. Dette blir nærmere omtalt kapittel 4.6. Noe forenklet kan vi si at relativ luftfuktighet (RF) ved overflaten må være over 80 % og temperaturen over +5 °C for at mugg skal vokse. Hvis fuktinnhold og temperatur er enda en del høyere kan det også utvikle seg forskjellige typer råtesopp som bryter ned tre- og trebaserte materialer slik at bæreevnen svekkes. Veksthastigheten øker sterkt med økende fuktinnhold og økende temperatur opp til et vist nivå.

Snøsmelting og ising

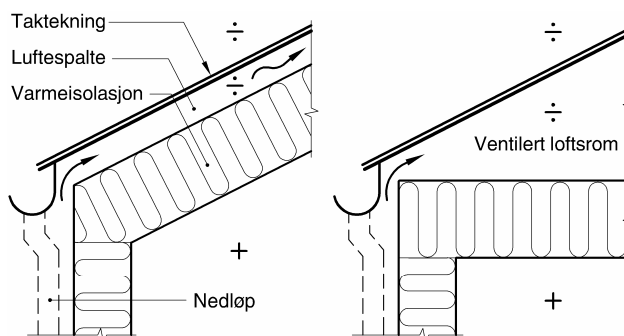
Behovet for å transportere bort varme for å hindre snøsmelting og ising gjelder alle tak med utvendig nedløp for regn og smeltevann. Snø på et dårlig luftet tak fungerer som en tilleggsisolasjon. Spesielt har lett nysnø god varmeisolasjonsevne. Et lag med 50 cm nysnø kan utgjøre omtrent like stor varmemotstand som 20 cm mineralullisolasjon. Et snølag vil derfor heve temperaturen på takteknningen. Uten effektiv bortlufting av varmen som kommer opp gjennom taket vil temperaturen på takteknningen fort bli så høy at snøen begynner å smelte selv på godt isolerte tak og ved mange minusgrader ute. Den delen av taket som ligger utenfor ytterveggen, takutstikket, får derimot ingen varmetilførsel innenfra og får tilnærmet utetemperatur. Smeltevann som renner nedover den oppvarmede takteknningen og ut på det kalde

takutstikket vil derfor fryse til is når det er kuldegrader ute. Det kan føre til at det bygger seg opp is og istapper på takutstikk, takrenner og i nedløpsrør. Isen er først og fremst en stor fare for folk som ferdes nedenfor, men utgjør også en ekstra påkjenning på taktekning, takrenner og nedløpsrør som lett kan skades eller i verste fall ramle ned. Isoppbyggingen kan også føre til oppdemming av smeltevann med vannlekkasjer gjennom taket som følge.

1.2.2 Er alle tak luftet?

Vi deler vanligvis inn takene i to hovedtyper når det gjelder fukt- og varmetekniske forhold,

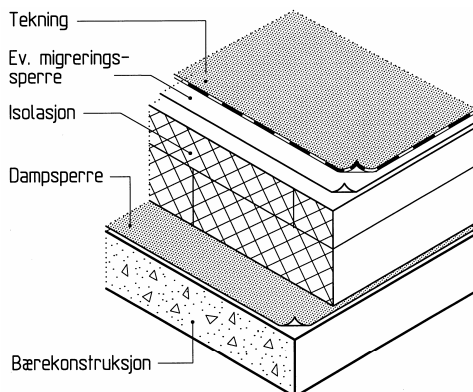
- ◆ luftede, kalde tak
- ◆ kompakte, varme tak



Figur 1.2.1

Konstruksjonsprinsipper for kalde tak med utvendig nedløp. Tak med varmesolasjon i takflatene, til venstre, og tak med kaldt loftsrom, til høyre [27]

Alle tak som har åpninger som leder uteluft inn under tekningen eller til andre luftspalter i taket hører med i gruppen luftede tak. Se figur 1.2.1. Kompakte, varme tak er en samlebetegnelse for tak uten lufting. Isolasjonen ligger opp mot tekningen, uten luftespalte og uten tilsiktede lufteåpninger til det fri. Se figur 1.2.2. I kompakte tak tilstreber en å gjøre selve tekningen så vanntett, og dermed også lufttett, som mulig. Ved ytterveggene avsluttes tekningen med oppbrett som klemmes eller klebes til parapeten. Parapeten er den delen av ”ytterveggen” som stikker over takflaten. Avslutningen gjøres tett først og fremst for å hindre at det kommer nedbør eller vann fra taket og inn under tekningen, men det bidrar også til god lufttetthet. God lufttetthet i overgangen mellom veggens tettesjikt og tekningen er nødvendig for å hindre luftlekkasjer innenfra og ut og for å hindre at kald uteluft blåser ukontrollert inn i isolasjonssjiktet. God lufttetthet ved takkanten er også ønskelig for å redusere faren for vindavrivning av tekningen.



Figur 1.2.2

Prinsipiell oppbygning av varme, kompakte tak med isolasjonen helt opp til tekningen, uten luftespalte[3]

1.2.3 Brannspredning - en svakhet spesielt for kalde, luftede loft i flermannsboliger

I tak med kaldt luftet loft kan brann spre seg forholdsvis lett fra vindu og opp gjennom spalteåpningen under takutstikket, inn på loftet og videre til andre leiligheter. I rekkehus, og andre bygninger som er brannseksjonert, er det restriksjoner på bruk av spalteåpninger under takutstikket og opp til kaldt loft (§7-24 i Veiledning til TEK) [4]. For tak med kalde loft er det derfor et klart behov for mer brannsikre løsninger enn det tradisjonelle luftede loftet.

Behovet for mer brannsikre takkonstruksjoner er bakgrunnen for arbeidet som er gjennomført i Klima 2000 for å utvikle *kalde lukkede loft* og som det er redegjort for i denne rapporten.

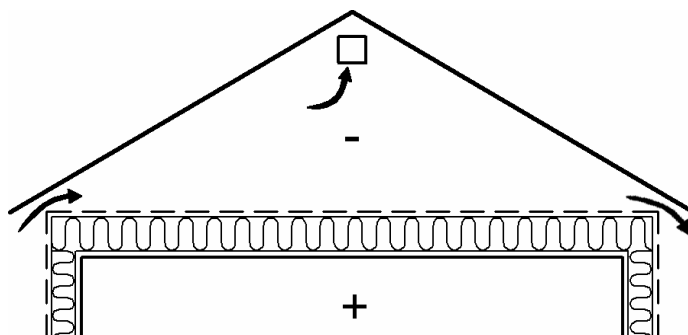
1.2.4 Redusert fare for snøinndrev

Med lukket, ikke luftet loft kan en effektivt hindre at det driver snø og regn inn på loftet. Det er en annen stor fordel med denne taktypen som gjør at den kan brukes over hele landet.

2 Tradisjonelt kaldt, luftet loft

2.1 Generelt

Mønt tak med kaldt loft er en takløsning som har vært, og fortsatt er, mye brukt i Norge [5]. Varmeisolasjonen ligger i bjelkelaget over øverste etasje. Loftsrommet har åpninger til det fri slik at selve loftsrommet gjennomstrømmes av uteluft. Se prinsippskisse i figur 2.1.1. Som undertak er det tradisjonelt brukt bordtak med damptette materialer som asfalt takbelegg eller lignende som vanntett undertaksbelegg. Senere er forenklede undertak, som trefiberplater (sutak), damptette kartongplater og rullprodukter tatt i bruk. Disse produktene er selvbærende og kan brukes uten underliggende taktro.



Figur 2.1.1

Tradisjonelt kaldt luftet loft. Luftgjennomstrømning gjennom åpninger mellom loftet og det fri [5]

2.2 God uttørkingsevne

Erfaringene med kaldt, luftet loft er stort sett gode, når det gjelder fukttekniske forhold, selv om også slike tak kan være utsatt for soppangrep. For å holde fuktnivået nede må slike kalde loft med damptett undertak luftes ved gjennomstrømning av uteluft. Utluftingen skjer enten gjennom lufteåpninger i gavlveggene eller gjennom kontinuerlige spalteåpninger under takutstikket og eventuelt i mønet. Eldre bygninger kan ha store loft som brukes som lagerrom. De loftene har gjerne vinduer i gavlene eller taket og kan luftes gjennom vinduene i deler av året. Så lenge det er litt vind har tak med kaldt luftet loft vanligvis god uttørkingsevne.

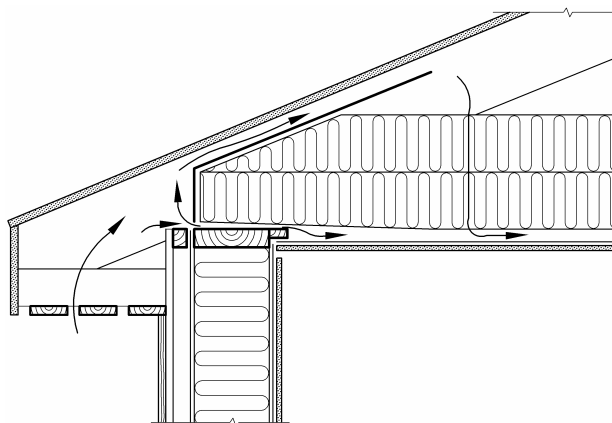
2.3 Fare for snøinndrev

En av ulempene med luftede loft er at snø kan blåse inn gjennom lufteåpningene og inn på loftet. Problemet kan reduseres med riktig utforming og plassering av ventilåpninger og spalteåpninger og ved bruk av raftekasse. Generelt bør spalteåpningene plasseres der vindtrykket er minst, vanligvis lengst ut fra veggen, gjerne like bak takrennen for å redusere mengden nedbør som treffer spalteåpningen. Ved riktig utformet raftekasse vil det meste av nedbøren som blåser inn felles ut i raftekassen uten å komme videre inn på loftet. Raftekassen bør bare ha én spalteåpning som plasseres lengst mulig ut fra veggen. Se rapport [6] som viser resultater fra vindtunellforsøk. For ytterligere å redusere faren for snøinndrev kan det monteres en filt i raftekassen. Filten vil gi økt strømningsmotstand og filtarealet må tilpasses type filt og stedets vindhastighet for å sikre tilstrekkelig luftgjennomstrømning. Det må også tas hensyn til at strømningsmotstanden kan øke med tiden som følge av eventuell innsekter, og støv. Filten må plasseres slik at den ikke blir tettet når raftekassen beises eller males. På steder med spesielt mye vind kan naturlige utettheter gi tilstrekkelig ventilasjon av loftet uten at det lages spesielle lufteåpninger. På vindutsatte steder langs kysten er det forøvrig mindre behov for å ventilere takflaten for å hindre snøsmelting og ising enn i kaldere og mer snørike innlandsstrøk.

2.4 Kaldluftinntregning i isolasjonen

En varmeteknisk svakhet med luftede loft er faren for at kald uteluft, som blåser inn gjennom spalteåpningen under raftutstikket, også blåser delvis inn i og gjennom varmeisolasjonen. Se figur 2.4.1. Det vil øke varmetapet opp gjennom taket. Innblåsing av kaldluft kan hindres ved å beskytte isolasjonen med vindsperre (raftepapp) langs raftutstikket. Raftepappen må monteres med tett overgang til veggens vindsperre og raftepappen bør føres innover loftet, parallelt med yttertaket, til avstanden fra raftepappen og ned til isolasjonen er minst fem ganger større enn spaltehøyden. Med 50 mm spaltehøyde betyr det 200 mm. I praksis blir denne vindbeskyttelsen ofte for dårlig. Det skyldes dels at det ikke blir tilstrekkelig lufttett i overgangen til veggens vindsperre og rundt taksperrene/overgurtene og dels at raftepappen ikke går tilstrekkelig langt inn på loftet.

Inne på et åpent loft, hvor luften kan strømme fritt fra lo til le side av huset, blir det normalt ikke så stor lufthastighet og trykkgradient at kaldluften vil strømme via isolasjonssjiktet. Det er derfor ikke behov for en vindsperre på oversiden av isolasjonen for å beskytte mot vind. Med økende isolasjonstykkelse er det imidlertid en fare for at isolasjonsevnen blir noe redusert på grunn av naturlig konveksjon i isolasjonssjiktet. Papirbelagt isolasjon eller en vindsperre på toppen av isolasjonen vil redusere faren for naturlig konveksjon og anbefales for tykke isolasjonssjikt.

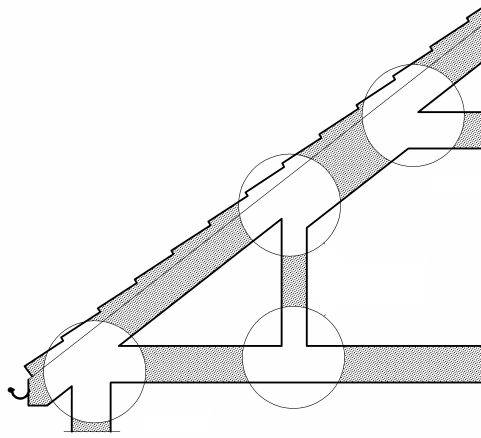


Figur 2.4.1
Inntregning av kald luft i isolasjonssjiktet [7]

2.5 Kaldluftinntregning i isolasjonen i tradisjonelle A-takstoltak

Hvis luften som kommer inn gjennom spalteåpningen ikke kan strømme fritt inne på loftet, fra lo til le side, vil også en del luft strømme i isolasjonssjiktet. Det kan skje hvis luftstrømmen på loftet blokkeres av utstyr og gjenstander, men først og fremst hvis loftet er oppdelt med knevegger. Tak hvor deler av loftet er kaldt, som for eksempel ved bruk av A-takstoler er spesielt utsatt for slik kortslutning av varmeisolasjonen, se figurene 2.5.1 og 2.5.2. Det gjelder tak med lufteåpninger inn til kneloftene. Det er stor fare for ekstra varmetap, både fra mellombjelkelaget og fra isolasjonen i skråtaket, som følge av gjennomstrømming av kald uteluft. Det skyldes at vindsperren inne på kneloftene, over etasjeskilleren og utvendig for kneveggen, vanligvis blir altfor dårlig utført. Når det blåser mot den ene siden av huset blir det en trykkforskjell, ikke bare mellom lo og le side av huset, men også mellom de to kneloftene. Det fører til at det strømmer kald luft fra det ene kneloftet og til det andre, ikke bare via luftespalten over isolasjonen i taket, men også gjennom etasjeskilleren og gjennom isolasjonen i takplanet. Mellombjelkelag som er delvis fylt av isolasjon er spesielt utsatt. Forutsatt at bjelkelaget er helt fylt av isolasjon vil luftstrømmen bli bremset noe, men ikke helt. Foruten ekstra, unødvendig varmetap fører det til nedkjøling av golv og tak. Det er eksempler på at

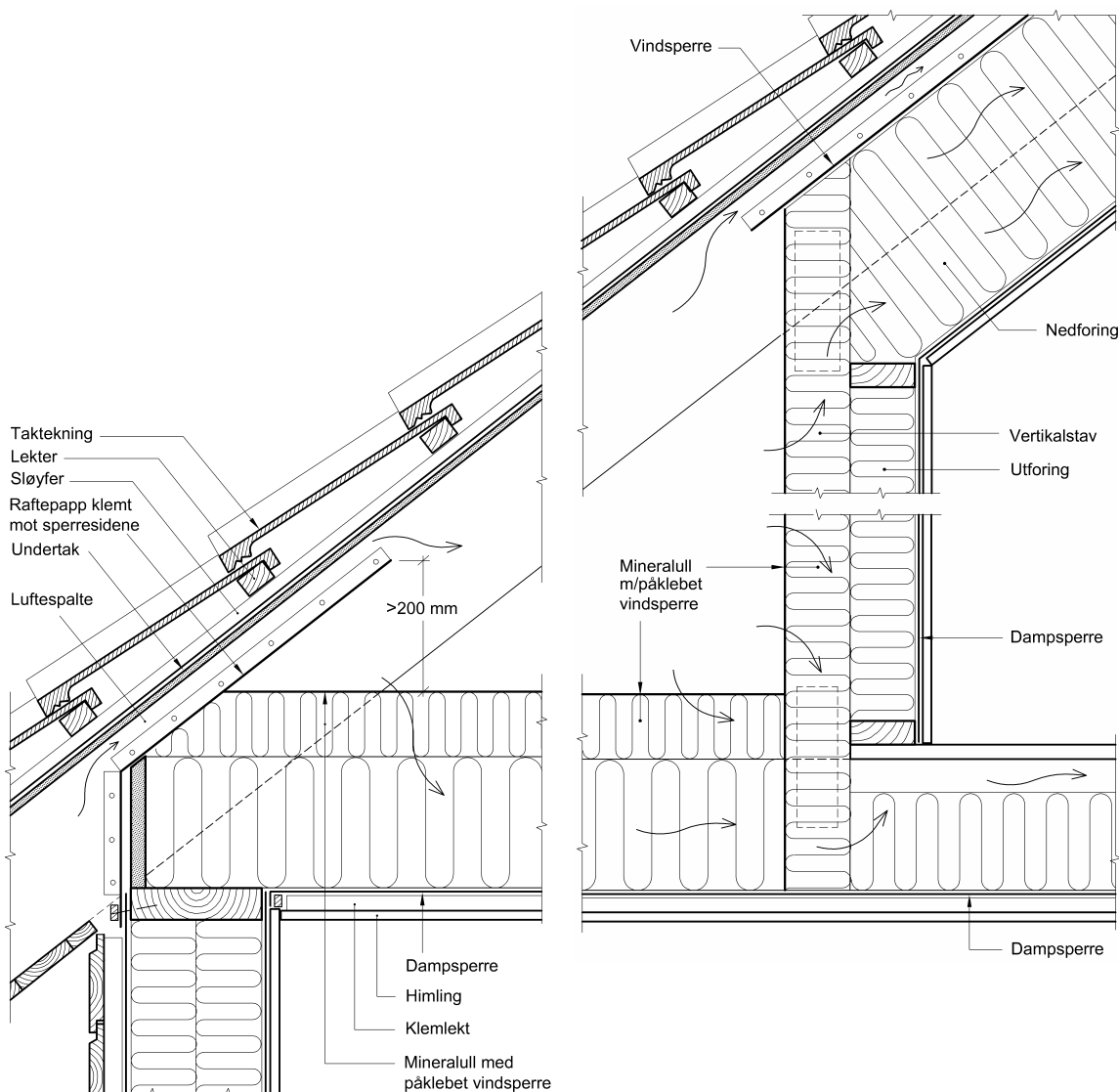
vannrør i bjelkelaget mellom to oppvarmede rom har frosset på grunn av slik gjennomblåsing av kald uteluft. Eksempler på ekstra varmetap på grunn av luftgjennomstrømming i mellombjelkelag er beregnet i vedlegg 6.



Figur 2.5.1

Tradisjonelle tak av A-takstol har mange problempunkter når det gjelder luft- og vindtetting [8].

For å unngå at kald uteluft skal strømme gjennom varmeisolasjonen må vindsperren monteres med tette skjøter og overganger slik at den danner et kontinuerlig lufttett sjikt, fra vindsperren i ytterveggen til vindsperren i skråtaket. Det er mulig å få til dette, men det er forholdsvis arbeidskrevende under vanskelige arbeidsforhold i trange kneloft og det blir derfor oftest ikke tilfredsstillende utført. Et bedre varmeteknisk alternativ er å bygge kneloftene uten lufting og i stedet sikre uttørkingsevne ved å bruke dampåpent undertak og opplektet tekning.

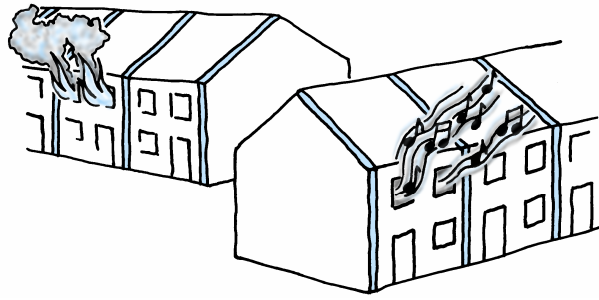


Figur 2.5.2

En fullgod takløsning krever et kontinuerlig tett vindsperresjikt på utsiden av all isolasjon. Det er det arbeidskrevende og vanskelig å få til på tradisjonelle kalde, luftede kneloft. Uten klemte skjøter vil kald luft lett lekke inn mellom isolasjonsplatene og videre gjennom isolasjonssjiktene i taket og mellombjelkelaget. Mellombjelkelag som ikke er helt fylt med mineralull er spesielt utsatt.

2.6 Risiko for brannspredning

I tett trehusbebyggelse representerer kalde, luftede loft en ekstra risiko for brannspredning [9]. Ved fullt utviklet brann i øverste etasje vil branngasser og flammer ut gjennom vinduet spre seg opp gjennom spalteåpningen under takutstikket og inn på et luftet loft. Se figur 2.6.1. Inne på loftet vil en brann vanligvis spre seg lett videre. Det skyldes at det oftest er ett åpent rom med mye lett tilgjengelig brennbar materiale i form av takstoler, undertak og lagrede materialer og gjenstander. Det har vært en rekke store branner i rekkehus hvor brannen har spredd seg fra en boenhet til resten av boenhetene via det kalde loftet. Selv om brannseksjoneringen mellom boenhetene også skal omfatte loftet, viser erfaringen at brannskillende konstruksjoner på loft ofte ikke er tilfredsstillende utført og derfor ikke gir nødvendig motstand mot brannspredning.

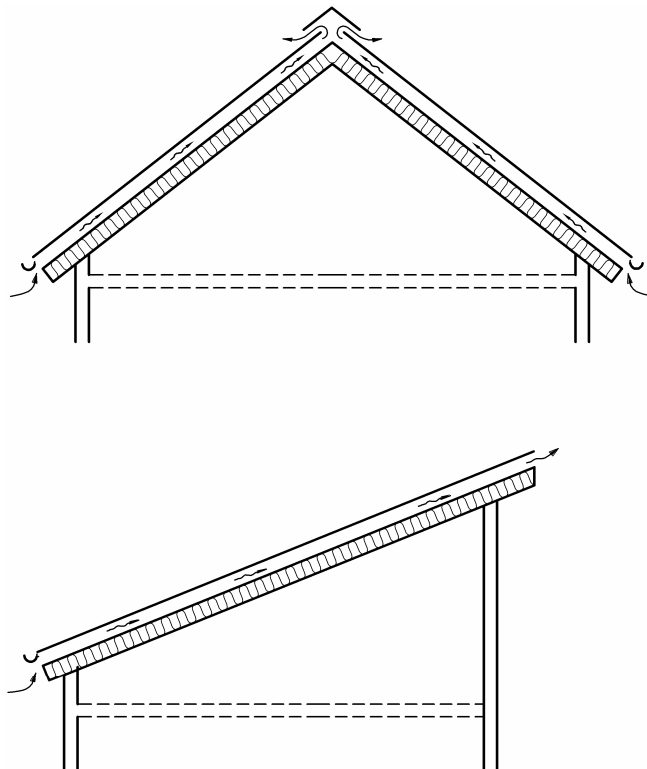


Figur 2.6.1
Brannspredning ut gjennom vindu og inn gjennom luftespalter til loftet [10]

2.7 Behov for alternative løsninger

Svakhetene som de tradisjonelle luftede kalde takene har, og som er omtalt foran, viser at det er et klart behov for takløsninger uten spalteåpninger til kaldt loft. Det er ønskelig først og fremst av branntekniske grunner, men også for å redusere unødvendig varmetap på grunn av gjennomblåsing av kaldluft og for å redusere faren for inndrev av nedbør.

Beste løsning for skrå tretak, både brannteknisk og varmeteknisk, oppnås ved å plassere all takisolasjon mellom taksperrere/overgurtene og unngå bruk av kalde, luftede loftsrom [2] [11]. Se prinsipløsninger i figur 2.7.1. Bindingsverk og taktro vil da være mye mindre eksponert for brann. Da vil det heller ikke være spalteåpninger som kan lede flammer og branngasser inn på loftet. Det er imidlertid også fullt mulig å bygge tak med *kalde lukkede loft* som har tilfredsstillende motstand mot brannspredning. Denne takløsningen blir det redegjort for i de følge

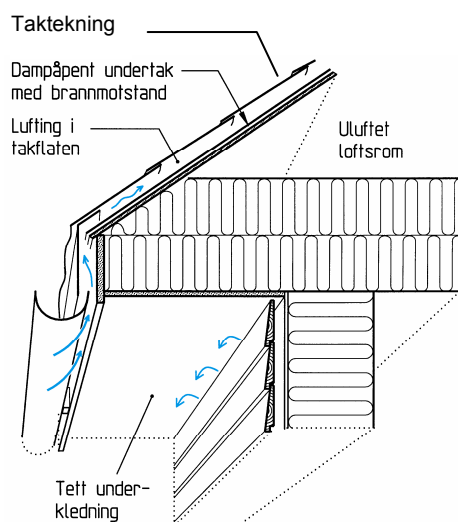


Figur 2.7.1
Beste løsning for skrå tretak, både brannteknisk og varmeteknisk, oppnås ved å plassere all takisolasjon mellom taksperrere/overgurtene og unngå bruk av kalde loftsrom [11]

3 Ny takløsning – Kaldt, ikke luftet loft

3.1 Konstruksjonsprinsipp

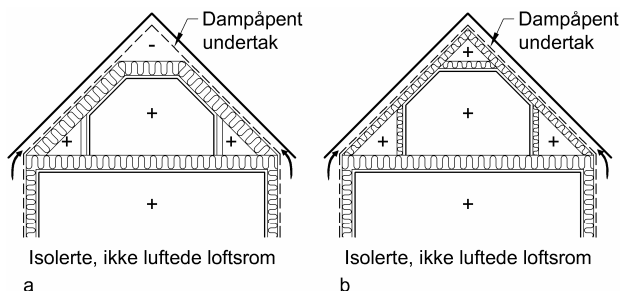
Med bakgrunn i de fuktekniske undersøkelsene som er gjennomført i forskningsprogrammet *Klima 2000* har Byggforsk utviklet et nytt konstruksjonsprinsipp, kaldt, , loft, som forbedrer brannsikkerheten [12]. Ved å benytte undertaksmaterialer med tilstrekkelig dampåpenhet kan tak over kaldt loft gis tilstrekkelig uttørkingsevne for fukt uten at selve loftet må ventileres. Taket kan bygges helt uten spalteåpninger mellom loftet og det fri. Fukt fra taket diffunderer i stedet ut gjennom undertaksmaterialet og videre ut via luftgjennomstrømming i luftspalten mellom undertaket og taktekingen. Se figur 3.1.1. Denne løsningen med uluftet kaldt loft kan også brukes i tak med loftrumstakstoler som vist i figur 3.1.2.



Figur 3.1.1

Nytt konstruksjonsprinsipp for brannsikring av kalde loft.

Det er ingen lufting av selve loftsrommet. Fukten diffunderer ut gjennom et dampåpent undertak og all lufting skjer via luftspalten mellom teking og undertak [12].



Figur 3.1.2

Tak med loftrumstakstoler og lukket, ikke luftet kneloft. All takisolasjon kan plasseres i skråtaket. Tett overgang mellom det dampåpne undertaket og vindsperrer i ytterveggen hinder at det blåser kaldluft inn på kneloftet og gjennom mellombjelkelaget.

3.2 Nye dampåpne materialer

Såkalte forenklede undertak av harde trefiberplater, sutakplater, og kartongplater som Brettex er eksempler på forholdsvis dampåpne undertaksmaterialer som har vært i bruk i flere tiår. Senere er det kommet et stort utvalg av tildels svært dampåpne rullprodukter som er utviklet for bruk som undertak. De dampåpne produktene har etter hvert fått en utstrakt bruk som kombinerte vindsperrer og undertak i tak der all isolasjon er plassert mellom taksperrene/overgurtene. Produktene må tilfredsstillende aktuelle krav både til vindsperrer og til undertak. De må monteres med tette skjøter både for å hindre regninntregning og for å hindre kald uteluft fra å blåse inn i varmeisolasjonen. De dampåpne undertaksproduktene gir i utgangspunktet samme uttørkingsevne for tak med kalde uluftede loft som for tak med isolasjonen i takplanet.

3.3 Ny anbefalt øvre grenseverdi for vanndampmotstand

Blant annet på grunnlag av beregninger utført med beregningsprogrammet ”Takfukt”, og som det er vist resultater fra i denne rapporten, har Byggforsk skjerpet kravet til ”dampåpne” materialer [13].

Byggforsk anbefaler følgende øvre grenseverdi for vanndampmotstanden, Z_p , for vindsperrer og for kombinerte undertak og vindsperrer samt for andre ”dampåpne” materialsjikt:

$$Z_p \leq 2,5 \cdot 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$$

Angitt som diffusjonsekivalent luftlagtykkelse, s_d -verdi, blir det

$$s_d \leq 0,5 \text{ m}$$

Ekvivalent luftlagtykkelse, s_d , er en forholdsvis ny, relativ enhet for dampmotstand som vil bli mer og mer brukt både i Norge og i andre land. At et materialsjikt har en s_d -verdi på 0,5 m betyr at materialsjiktet har samme motstand mot vanndampdiffusjon som et 0,5 m tykt lag med stillestående luft.

Den nye grenseverdien for dampmotstand er ca. $\frac{1}{4}$ av den tidlige grenseverdien for vindsperrer, $Z_p \leq 9,6 \cdot 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ (= $1/1,04 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$, som stod i gamle NS 3047). Det tilsvarer $s_d \leq \text{ca. } 2 \text{ m}$.

Grunnlaget for å gå inn for denne skjerpingen er oppsummert i det følgende

- ◆ Generelt behov for best mulig uttørkingsevne, spesielt i tak
- ◆ Økte isolasjonstykkelser fører til redusert drivkraft og saktere uttørking
- ◆ De fleste vanlige vindsperrere typene klarer det nye kravet
- ◆ Det er kommet mange nye og svært dampåpne produkter å velge mellom
- ◆ Den nye grenseverdien er mer i samsvar med anbefalinger og krav i andre land

Selv om det er i tak det først og fremst er behov for lavere vanndampmotstand, er det praktisk å fortsatt ha en og samme generelle grenseverdi for alle vanlige bruksområder for vindsperrer og for kombinerte undertak og vindsperrer.

Svenskene har hatt tilsvarende anbefaling i mange år, $20 \cdot 10^3 \text{ s/m}$, ($s_d = 0,53 \text{ m}$). Se [14] og [15]. ”Trenden i Europa” er også økt bruk av svært dampåpne undertak som følge av strengere krav til varmeisolasjon i mange land. Det medfører at hele hulrommet mellom taksperrene trengs for isolasjon. Tretak har tidligere hatt svært god uttørkingsevne (og stort varmetap) ved ventilering av hulrommet mellom undertaket og isolasjonen, som vanligvis ikke har vært beskyttet av noe

vindsperrsjikt. For å opprettholde denne uttørkingsevnen, når isolasjonen monteres helt opp til undertaket, settes det til dels svært lave grenser for dampmotstanden.

3.4 Redusert risiko for brannspredning

For å hindre brannspredning fra luftspalten under tekningen og ned til det kalde loftet må undertaket ha en viss brannmotstand og bør hindrer gjennombrenning i minst 10 minutter. De nye dampåpne undertaksproduktene er tynne og har ikke tilstrekkelig brannmotstand i seg selv til at de kan brukes som eneste sjikt mellom det kalde, uluftede loftet og luftespalten under taktekningen. De må derfor kombineres med et underlag av taktrommateriale med god nok brannmotstand. Det vil da være samlet vanddampmotstand for de to materialsjiktene som bestemmer hvor god uttørkingsevne taket får.

Det er med andre ord behov for undertakmaterialer som både har stor brannmotstand og samtidig har lav dampmotstand.

3.5 Uttørkingsevne

3.5.1 Redusert uttørkingsevne sammenlignet med luftet loft

Tak med kaldt, lukket og ikke luftet loft vil i utgangspunktet ha redusert uttørkingsevne sammenlignet med tak med kaldt luftet loft. Det skyldes at fukten først må diffundere gjennom undertak, og vindsperran i gavlvegger, før den luftes vekk ved luftgjennomstrømming i luftespalten mellom taktekning og undertak.

3.5.2 Uttørkingsevne omtrent som for tak med all isolasjon i takplanet

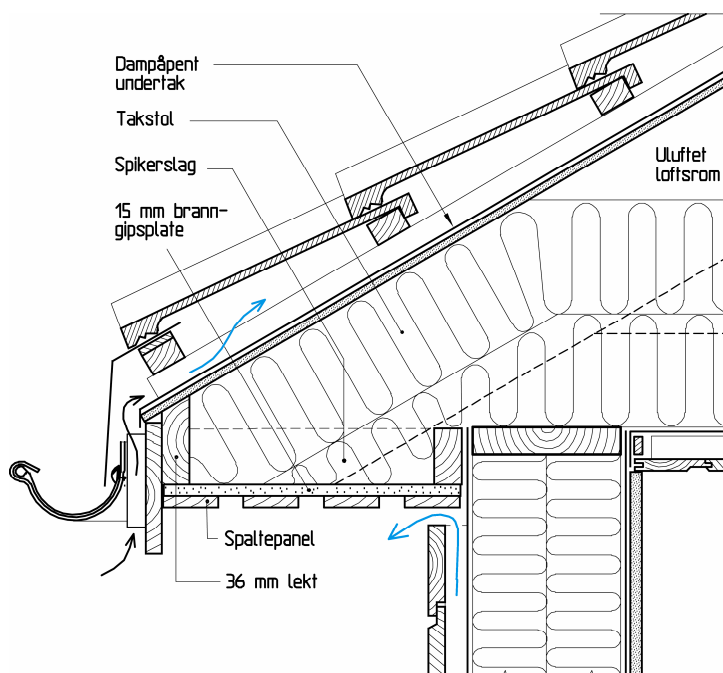
Uttørkingsevnen for tak med lukket, ikke luftet loft vil være tilnærmet den samme som for tak med all isolasjon i takplanet forutsatt samme kombinerte undertak/vindsperre [2]. I begge tilfeller må fukten diffundere opp og ut gjennom undertaket/vindsperran. Etter at byggfukten er tørket ut er det i praksis fuktilførsel fra luftlekkasjer opp gjennom himlingen som kan føre til skadelig oppfuktning i et isolert tretak. I et kaldt, ikke luftet loft vil et undertak som er godt montert, med lufttette skjøter, bidra til å redusere luftlekkasjene, og dermed fuktilførselen, nedenfra og opp til loftet, spesielt hvis innvendig lufttetting i himlingen er mangelfullt utført. Med et sammenhengende loftsrom vil luftfuktigheten bli forholdsvis jevn langs hele undertaket uten de høye fuktnivåene en kan få lokalt ved luftlekkasjene i andre tak. Et tredje forhold som er gunstig for tak med ikke luftet, kaldt loft, sammenlignet med tak med all isolasjon i takplanet, er at fukt kan diffundere ut, ikke bare gjennom undertaket, men også gjennom vindsperran i gavlveggene.

3.6 Behov for undertak med lav dampmotstand og god brannmotstand

Det finnes i dag en rekke svært dampåpne undertak som kan gi taket mer enn god nok uttørkingsevne. Det som er den begrensede faktor er dampmotstanden til taktroen som ligger under undertaket for å oppnå tilfredsstillende brannmotstand. Tre og andre trebaserte materialer har den egenskapen at dampmotstanden avtar med økende fuktinnhold. Taktro av 15 mm trebord har en s_d -verdi på ca. 0,3 m ved 80 % RF [20]. Kombinert med et undertaksbelegg med s_d -verdi mindre enn 0,2 m gir de vanligvis en tilfredsstillende dampåpenhet for hele undertaket. Det er imidlertid et behov for undertakmaterialer som både har stor nok brannmotstand og samtidig har enda lavere dampmotstand enn bordtak. Alternativt kan nødvendig brannmotstand sikres ved å montere noe mineralull opp mot undertaket. Mineralullen må holdes oppe mot undertaket for eksempel med ståltråd eller netting. Mineralull er en god løsning også fordi den har lav dampmotstand med s_d -verdi lik isolasjonstykkelsen.

3.7 Nytt byggdetaljblad

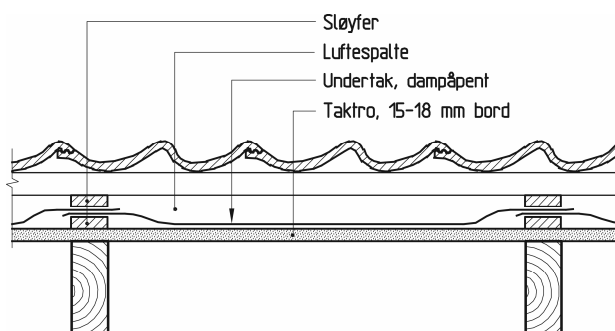
Det nye konstruksjonsprinsippet, kaldt, ikke luftet loft, er vist i Byggforskserien, *Byggdetaljer 525.108 Brannsikring av bygninger med kaldt loft. Konstruktive løsninger* [12]. Dette bladet omhandler alternative løsninger for å redusere faren for brannspredning til kalde loft. Loft helt uten lufteåpninger ved raft gir størst motstand mot brannspredning, se figur 3.7.1 og 3.7.2, men alternativer med delvis lufting blir også omtalt. Alle løsningene forutsetter at etasjeskilleren mot loftet har tilfredsstillende brannmotstand. Løsningene vil senere bli innarbeidet i *Byggdetaljer 525.106 Skrå tretak med kaldt loft*. Løsningene er aktuelle for alle typer takkonstruksjoner med store loftsrom som gir muligheter for brannspredning, også tak med helt eller delvis kaldt loft som tak med A-takstoler med kalde rom utenfor kneveggene. Under takutstikket må det monteres et lufttett sjikt for eksempel en plate. Løsningen bør ha minst 10 minutter brannmotstand. Plater som er tilsatt en saltimpregnerin for å øke brannmotstanden kan være ekstra utsatt for muggvekst. Muggvekstfaren kan reduseres ved å male platene.



Figur 3.7.1

Kaldt, ikke luftet loft.

Taket har tett løsning ved takfot, uten spalteåpning til loftet. Et tynt, dampåpent undertaksprodukt sørger for god luft- og regntetthet, mens en underliggende taktro gir nødvendig brannmotstand [12].



Figur 3.7.2

Klemning av omleggsskjøt på taktro av trebord.

Ved å klemme omleggsskjøten mellom to sløyfer oppnås to ting, godt klemt skjøt mellom plane flater og økt sikkerhet mot vannlekkasjer ved at vann på undertaket ledes vekk fra omleggsskjøt og spikerhull [12].

4 Beregningsprogrammet "Takfukt"

4.1 Bakgrunn

4.1.1 Generelt

I forskningsprogrammet *Klima 2000, Prosjekt 4 Studie av kompakte og luftede isolerte tak* er det utviklet et beregningsprogram, *Takfukt*, for å undersøke risikoen for soppvekst på kalde loft. I det følgende blir det redegjort for beregningsmodellen og hvordan de viktigste parametrene virker inn på fukt- og varmebalansen på loftet og dermed faren for muggvekst. De viktigste parametrene som inngår i beregningene er omtalt i kapittel 4.2 og 4.3, mens kapittel 5.2 og 5.3 gir en samlet oversikt over parametere og inngangsverdier for henholdsvis kaldt, ikke luftet og kaldt luftet loft.

I beregningsprogrammet tas det hensyn til de viktigste klimatiske, bygningstekniske og brukerbestemte forhold. Programmet beregner samhoørende verdier for temperatur og relativ luftfuktighet, RF, ved undersiden av undertaket inne på det kalde loftet, måned for måned gjennom ett år. På grunnlag av beregnet temperatur og RF beregnes et "muggvekstpotensial" for undertaket. Muggvekstpotensialet er et kvantifisert uttrykk for muligheten for muggvekst på undertaket og er nærmere forklart i kapittel 4.6.

4.1.2 Undertakets dampmotstand

En viktig hensikt med beregningene har vært å undersøke hvilken betydning undertakets dampmotstand har for uttørkingsevnen og dermed for fuktforholdene i taket. Det er derfor gjennomført en rekke beregninger hvor undertakets dampmotstand er variert. Også andre bygningmessige parametere, som vi kan påvirke gjennom valg av materialer, løsninger og utførelse er undersøkt, blant annet bygningens og bygningssdelenes lufttetthet.

4.1.3 Bygningens og takets lufttetthet

Det er en velkjent sak at luftlekkasjer i en bygning kan transportere mye mer fukt opp gjennom himlingen enn det som transporteres ved diffusjon gjennom materialsjiktene. Luftlekkasjer kan medføre en betydelig fare for fuktskader i et tak. Ved utviklingen av beregningsprogrammet er det derfor lagt vekt på å få med alle de viktigste virkningene utettheter og luftlekkasjer har på fukt og varmebalansen på loftet.

Bygningens utettheter påvirker temperatur- og fuktforholdene på loftet på flere til dels motstridende måter. En ekstra utetthet, for eksempel i golvet, fører til større trykkforskjell og større luftlekkasje også opp gjennom taket. Økt luftlekkasje bidrar imidlertid til å senke fuktinnholdet i lufta som lekker opp på loftet. Økt luftlekkasje gir også økt varmetransport til loftet og dermed høyere temperatur som isolert sett bidrar til lavere RF på loftet.

Alle de nevnte virkningene av luftlekkasjer er det forsøkt å ta hensyn til i beregningsprogrammet for å få et mest mulig komplett bilde av utetthetenes betydning. Som noen av resultatdiagrammene viser, er det ikke lineær sammenheng mellom en bygningss utettheter og risiko for soppvekst.

4.1.4 Fuktproduksjon og ventilasjon

Fuktproduksjon (fukttilførsel) og ventilasjon bestemmer fuktinnholdet i innelufta. Beregningene viser at fuktinnholdet i innelufta har stor betydning for risikoen for soppvekst på undertaket. Det er derfor viktig å se bygningstekniske og ventilasjonstekniske løsninger og bruken av bygningen i sammenheng. God mekanisk ventilasjon er viktig, først og fremst for å sikre god inneluft, men er også et effektivt tiltak for å redusere innvendig luftfuktighet og dermed faren for fuktskader i tak og andre bygningssdeler. En godt ventilert bygning kan unngå fuktskader selv om vegger og tak ikke er helt perfekt utført.

4.2 Klimabetingelser

4.2.1 RF og temperatur ute

Programmet tar hensyn til relativ luftfuktighet, RF, og lufttemperatur ute. Ved beregningene er det brukt månedsmiddel for ni steder i Norge, se diagram i vedlegg 2. Strålingsutveksling mellom takflaten og omgivelsene kan ved klar nattehimmel medføre at selve taktekningen i perioder blir flere grader kaldere enn uteluften, men denne temperatursenkningen blir det ikke tatt hensyn til ved beregningene. Heller ikke soloppvarming av taket tas det hensyn til. Virkningen av denne formen for strålingsutveksling og soloppvarming blir nærmere omtalt i kapittel 5.4.1.

4.2.2 Vind

Vindens betydning for trykkforholdene i og utenfor bygningen blir neglisjert i beregningene for lukket, ikke luftet loft. Det er gjort dels for å forenkle beregningene og dels fordi det er ved små vindhastigheter med neglisjerbare vindtrykkforskjeller at fuktinnholdet på loftet vil være høyest og risikoen for soppvekst størst. Det er derfor en konservativ forenkling som gir resultater på den sikre siden. I største delen av tiden er gjennomsnittlig vindhastighet, målt 10 m over bakken, lavere enn 4 m/s i de fleste bebygde strøk i Norge [16]. Av de stedene vi har gjort beregninger for er det bare Kristiansund N som har gjennomsnittlig vindhastighet over 4 m/s. Se vedlegg 2. Ved vindhastigheter på 4 m/s og lavere er vindtrykket av begrenset betydning for luftlekkasjene i bygninger med luftet kledning og kaldt loft [17].

For tak med kaldt luftet loft har vinden stor betydning for luftgjennomstrømningen gjennom loftet. Når alle åpningene til det kalde loftet er i samme høyde, for eksempel spalteåpninger bare ved raft, er det minimal termisk drivkraft. Luftgjennomstrømningen er derfor helt avhengig av at det er vind. I beregningene for luftet kaldt loft er det tatt hensyn til vinden ved at trykkforskjellene mellom lo og le side av bygningen beregnes og brukes som drivtrykk for luftstrømmen gjennom loftet

Vindhastighetene som er brukt er vist i diagram i vedlegg 2. Det er månedsmiddelverdier basert på verdier for månedene oktober, januar, april og juli fra [16]. Verdiene for mellomliggende måneder er bestemt ved interpolering.

Forskjellen i vindtrykk utenfor spalteåpningene på henholdsvis lo og le side av en bygning beregnes etter formelen:

$$P_v = 0,5 \rho v^2 (c_{lo} - c_{le})$$

hvor:

P_v	vindtrykkforskjell mellom lo og le side, Pa
ρ	luftens densitet, kg/m ³
v	midlere vindhastighet 10 m over bakken
c_{lo}	vindtrykkfaktor på lo side av bygningen
c_{le}	vindtrykkfaktor på le side av bygningen

Vindtrykket og vindtrykkfaktorene varierer langs spalteåpningen og med vindretningen. Det har derfor vært nødvendig å gjøre visse forenklinger for å kunne gjennomføre beregninger med vindtrykk som drivkraft. Vi har brukt en midlere vindtrykkfaktor for hele spalteåpningen for hver av de to sidene av bygningen. Målinger Byggforsk har utført tidligere på et dreibart hus på Tyholt i Trondheim [17] viste at vindtrykkfaktoren oppe ved raft var ca. 0,8 når vindretningen var midt mot veggen mens den var ca. -0,2 (vindsug) når vindretningen var midt mot motstående langvegg. Mellom disse vindretningene varierte vindtrykkfaktoren tilnærmet lineært med vindretningen. Det betyr at forskjellen mellom vindtrykkfaktorene på lo og le side av bygningen ($c_{lo} - c_{le}$) varierte mellom 1,0 og 0 med en middelvei for alle vindretninger på 0,5. Vi har brukt denne middelveien i alle beregningene for luftet loft.

4.2.3 Inneklima - brukerinnvirkning

Innetemperaturens innvirkning på risikoen for oppfukning og muggvekst på undertaket er begrenset. Det er vist i Figur 5.2.12. Vi har derfor valgt å holde innetemperaturen konstant på 20 °C i de fleste beregningene.

Inneluftas fuktinnhold har derimot stor betydning for risikoen for oppfukning av taket innenfra, spesielt ved luftlekkasjer opp gjennom taket. Inneluftas absolutte fuktighet er lik uteluftens absolutte fuktinnhold pluss et tillegg som benevnes fukttilskuddet, Δv , og som vanligvis angis i g/m³. Fukttilskuddet er bestemt av fuktproduksjonen (fukttilførsel) og samlet ventilasjon og blir beregnet av programmet. Relativ luftfuktighet, RF, er bestemt av absolutt fuktinnhold og temperatur i luften og blir beregnet av beregningsprogrammet for aktuelle steder i bygningen.

Samlet fuktproduksjon (fukttilførsel) kan varieres fritt, men er satt til 10 kg/døgn ved de fleste beregningene. Det er litt over gjennomsnittlig fuktproduksjon i eneboliger i følge en større svensk undersøkelse [18]. Til orientering kan det nevnes at en voksen person produserer ca. 1 kg fukt pr. døgn i form av vanddamp fra pusting og avdunsting fra huden.

Samlet ventilasjon beregnes som summen av tre bidrag:

- ◆ grunnventilasjon
- ◆ utetemperaturavhengig ekstra ventilasjon
- ◆ luftlekkasjer

Grunnventilasjonen er den minimumsventilasjonen som ventilasjonsanlegget gir. Som "normalverdi" for grunnventilasjonen i beregningene har vi valgt å bruke et luftskifte på 0,2 m³/m³h. Det er vesentlig lavere enn 0,5 m³/m³h som er anbefalt minimumsventilasjon for boliger. Vi har valgt å bruke en så lav verdi fordi det fortsatt er en stor del av boligene som har for lav ventilasjon og fordi det er disse bygningene som vil være mest utsatt for soppvekstproblemer på undertaket. Den positive betydningen økt grunnventilasjon har for å redusere risikoen for soppvekst er vist i to diagrammer, Figur 5.2.3 og 5.2.4. i kapittel 5.2.

Den temperaturavhengige, ekstra ventilasjonen er et tillegg som øker med stigende utetemperatur når utetemperaturen kommer over 0 °C. Denne ekstra ventilasjonen er nødvendig for å holde fukttilskuddet, Δv_i , og innvendig RF nede på et akseptabelt nivå vår, sommer og høst og oppnås ved hjelp av økende lufting gjennom ventiler, vinduer og dører. Fukttilskuddet, Δv_i , er som forklart foran lik forskjellen i absolutt luftfuktighet i inne- og utluft. Den utetemperaturavhengige ekstra ventilasjonen beregnes etter en formel som er tilpasset for å gi fukttilskudd i samsvar med en beregningsstandard NS-EN ISO 13788 [19], se vedlegg 3.

I beregningene forutsettes det at både grunnventilasjonen og den ekstra ventilasjonen er balansert slik at tilluftmengde er lik fraluftmengde. Ventilasjonens innvirkning på trykkforholdene og dermed luftlekkasjene er derfor neglisjert ved de utførte beregningene.

Luftlekkasjenes bidrag til samlet ventilasjon er bestemt av størrelsen av utetthetene og trykkforskjellen mellom inne og ute og blir nærmere omtalt i kapitlene 4.3, 4.4 og 4.5.

4.3 Bygningmessige inngangsverdier

4.3.1 Bygningens form og ytre mål

Alle ytre mål som bredde, lengde, etasjehøyde, antall etasjer og takvinkel kan velges fritt. Ved beregningene som er vist i denne rapporten, har vi valgt å holde samlet golvareal konstant på 150 m² ved alle beregningene. Vi har videre forutsatt kvadratisk grunnflate og fast takvinkel på 30 ° for å begrense antall beregningstilfeller.

4.3.2 Bygningens lufttetthet - lekkasjetall n_{50}

Bygningens lekkasjetall, n_{50} , brukes som mål på en bygnings samlede utetthet. Lekkasjetallet, n_{50} , beregnes ved å dividere samlet lekkasje, målt ved 50 Pa trykkforskjell, på bygningens volum. Enheten for lekkasjetallet er $\text{m}^3/\text{m}^3\text{h}$ ved 50 Pa trykkforskjell mellom inne og ute. Lekkasjetallet kan måles etter en standard metode. I beregningene er lekkasjetallet, n_{50} , brukt ved beregning av motstanden mot luftgjennomstrømning i golv, vegger og himling. Luftgjennomgangsmotstanden til undertaket kommer i tillegg og blir tatt hensyn til ved beregning av takets motstand mot luftgjennomstrømning.

4.3.3 Utetthetsfordeling

Bygningens samlede utettheter kan fordeles med ulik lekkasje pr. areal for golv, vegger og himling. Ved de gjennomførte beregningene har vi som hovedregel forutsatt jevn fordeling med likt lekkasjetall pr. areal for golv, vegger og himling.

4.3.4 Himling

U-verdi og vanddampmotstand for dampsperreren kan velges fritt. Ved de gjennomførte beregningene er U-verdien satt til $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ som tilsvarer 250 - 300 mm mineralullisolasjon.

Vi har valgt å bruke en s_d -verdi på 10 m som normal verdi for dampsperrers dampmotstand ettersom dette er nedre grenseverdi for anbefalt vanddampmotstand for dampsperrer for vanlig bruk. [13]. En 0,15 mm tykk PE-folie, som vanligvis brukes som dampsperre, har til sammenligning en s_d -verdi på ca. 70 m. Det er imidlertid først når s_d -verdien blir vesentlig lavere enn 10 m at oppfukning ved diffusjon gjennom himlingen får noen praktisk betydning. Se Figur 5.2.6.

4.3.5 Loft og tak

Dampmotstanden til undertaksbelegget og vindsperreren i gavlveggene på loftet kan velges fritt. For vindsperreren har vi valgt en fast s_d -verdi lik 0,5 m, mens dampmotstanden for undertaket er variert ved de fleste beregningene. Dampmotstanden for undertaket er summen av dampmotstandene til henholdsvis bordtaket og undertaksbelegget. Damppermeabiliteten for tre varierer med treets fuktinnhold som igjen varierer med luftens RF. I beregningen har vi imidlertid brukt en fast permeabilitet på $1,0 \times 10^{-12} \text{ kg/mPa}$. Det gir en s_d -verdi på 0,3 m for 15 mm tykke trebord. Denne verdien gjelder når treet er i fuktlikevekt med 80 – 90 % RF. Dampmotstanden går ned til mindre enn det halve når RF nærmer seg 100 % [21].

Tykkelsen på eventuell taktro av trebord og mengde treverk på loftet kan angis fritt. I tillegg til å ha betydning for dampmotstanden har tykkelsen på taktroen også betydning for hvor mye fukt som kan tas opp/avgis fra trematerialene på loftet ved sorpsjon eller kondens/avdampning. Ved beregning av fuktopptak i trematerialene har vi brukt en litt forenklet sorpsjonskurve basert på verdier fra Norsk Treteknisk Institutt [22]. Hysteresese, på grunn av forskjellige kurver for adsorpsjon og desorpsjon, er neglisjert ved beregningene. Sorpsjonskurven som er brukt ved beregningene er vist i vedlegg 2.

U-verdien for tak over loft varierer med tykkelsen på ev. taktro. For 15 mm taktro, undertaksbelegg og taktekning har vi brukt en samlet U-verdi på $3,2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ved alle beregningene for ikke luftet loft er det forutsatt at det ikke er spalteåpninger inn til loftet ved raft eller andre steder. Undertakets luftgjennomgangstall kan velges fritt og inngår ved beregningen av takets samlede luftmotstand.

Ved beregningene for luftet loft er det forutsatt at det er én kontinuerlig spalteåpning under takutstikket ved hver av de to langveggene, men for øvrig ingen lufteåpninger verken ved mønet eller i gavlveggene.

4.4 Transportmekanismer

4.4.1 Varmetransport

Beregningsprogrammet tar hensyn til varmeoverføring gjennom bygningsdelene ved transmisjon og på grunn av luftlekkasjer. Varmeutveksling i forbindelse med oppfukning og uttørring av materialene, latent varme, blir neglisjert.

Transmisjonsvarmestrømmen beregnes ut fra oppgitt varmegjennomgangstall, U-verdi, areal og temperaturforskjell. Varmeoverføring og temperaturer ved overflatene beregnes ved hjelp av standardiserte varmeovergangsmotstander [22]. Ved oppadrettet varmestrøm, som for eksempel på undersiden av taktro/undertak, er det brukt en varmeovergangsmotstand på $0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$. Varmeoverføring ved luftlekkasjer beregnes ved å multiplisere massestrømmen med spesifikk varmekapasitet for luften og forskjellen i midlere lufttemperatur på de to sidene av skillekonstruksjonen. Se for øvrig kapittel 4.4.3 og 4.4.5 hvor luftlekkasjer og trykkforskjeller er nærmere omtalt.

4.4.2 Fukttransport ved diffusjon

Fukttransport ved diffusjon gjennom en skillekonstruksjon er proporsjonal med konstruksjonens areal (m^2) og med damptrykkforskjellen (Pa) mellom de to sidene av skillekonstruksjonen, men omvendt proporsjonal med dampmotstanden ($\text{m}^2 \text{ s Pa/kg}$). Dampmotstanden er lik summen av dampmotstandene til de enkelte materialsjiktene skillekonstruksjonen er bygd opp av. For porøse materialer vil dampmotstanden avta med økende fuktinnhold i materialet [21]. For materialer på den kalde siden av en skillekonstruksjon, som undertak og vindsperrer, er det en gunstig egenskap ettersom evnen til å slippe ut fukt øker med behovet.

4.4.3 Fukttransport ved luftlekkasjer

Fukttransport ved luftlekkasje gjennom en skillekonstruksjon er proporsjonal med luftgjennomstrømningen (m^3/s) og absolutt luftfuktighet (kg/m^3) til luften som strømmer gjennom. Luftgjennomstrømningen er proporsjonal med skillekonstruksjonens areal (m^2) og luftgjennomgangstall ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ s Pa}$) og proporsjonal med drivtrykket, Δp , opphøyd i en eksponent, β , som ligger mellom 1 (laminær strøm) og 0,5 (turbulent strøm). Drivtrykket, Δp , er forskjellen i lufttrykk (Pa) på de to sidene av skillekonstruksjonen.

Drivtrykket for luftlekkasjen opp gjennom himlingen og videre ut gjennom undertak og gavlvegger er tilnærmet proporsjonalt med temperaturforskjellen mellom inne og ute, med byggets høyde, og forøvrig bestemt av eventuelle ventilasjonsvifter, vindtrykkforskjeller og av hvordan husets utettheter er fordelt på golv vegger og tak.

I beregningsmodellen blir det tatt hensyn til termisk oppdrift og til fordelingen av husets utettheter, mens virkningen av vindtrykk blir neglisjert som omtalt i kapittel 4.2.1.

Ventilasjonsanleggets innvirkning på trykkfordelingen i bygningen er neglisjert ved beregningene. Det tilsvarer at bygningen har mekanisk, balansert ventilasjon. Mekanisk avtrekksventilasjon vil redusere overtrykket ved taket og derfor gi lavere luftlekkasje og mindre fukttilførsel til taket enn det beregningsmodellen gir. Naturlig ventilasjon vil variere mye med værforholdene og åpning/lukking av ventiler.

Bygningens utetthet, gitt ved lekkasjetallet, n_{50} , har også stor betydning for fuktinnholdet i innelufta ved at luftlekkasjene transporterer fukt fra rommene på lik linje med ventilasjonsanlegget. Luftlekkasjene inngår i bygningens samlede ventilasjon. Lekkasjene øker med vindhastigheten og temperaturforskjellen mellom inne og ute og er derfor størst vinters tid. Store luftlekkasjer kan medføre så lavt fuktinnhold i innelufta at luftlekkasjene ikke fører til noe skadelig oppfukning.

I beregningsmodellen forutsettes det at luften kan strømme tilnærmet fritt internt i bygningen, som om bygningen bare har ett rom. I bygninger med åpen trappeløsning eller med normalt utette innerdører er det en god tilnærming.

4.5 Varme- og masse balanse

4.5.1 Luftbalanse, termisk oppdriftstrykk og nøytralsoner

På grunnlag av temperaturforskjellen mellom inne og ute, bygningens lekkasjetall, n_{50} , og den relative fordelingen av bygningens utettheter på golv, vegger og himling beregner programmet høyden til nøytralsonen. Nøytralsonen er den høyden hvor lufttrykket er likt inne og ute. Over nøytralsonen er det innvendig overtrykk. Dette overtrykket øker proporsjonalt med høyden over nøytralsonen og er derfor størst oppe ved himlingen. Nedenfor nøytralsonen er det undertrykk inne og dette undertrykket ”øker” på samme måten med avstanden nedover fra nøytralsonen og er størst nede ved golvet i første etasje.

Hvis utetthetsfordelingen endres vil nøytralsonen flytte seg slik at samlet luftstrøm ut av bygningen hele tiden er lik samlet luftstrøm inn i bygningen. Hvis for eksempel utettheten til golvet i en bygning øker vil nøytralsonen flyttes nedover. Det betyr redusert trykkforskjell ved golvet, men tilsvarende større overtrykk oppe ved himlingen. Luftlekkasjen opp gjennom taket vil derfor også øke hvis golvet blir mer utett.

Ved beregningene blir det også tatt hensyn til luftgjennomgangstallet for undertak og gavlvegger på det kalde loftet. Et undertak som monteres uten åpninger til det fri, men med tette skjøter og overganger til veggens vindsperrer, vil bidra til å redusere luftlekkasjene opp gjennom himlingen. Det er samlet luftmotstand fra himling og undertak/gavlvegger som har betydning for hvor stor luftlekkasjen blir. Et tett loft uten lufting vil derfor bidra til å redusere fukttransporten opp til loftet sammenlignet med et luftet loft med spalteåpninger ved takutstikkene. Det kan ha stor betydning i bygninger hvor himlingen er utett som for eksempel bygninger med A-takstoler. Beregningsprogrammet tar hensyn til denne effekten.

4.5.2 Temperatur- og varmebalanse

I beregningene brukes det en standardisert fast utvendig varmeovergangsmotstand ved beregning av varmetap fra den utvendige takoverflaten. Som nevnt i kapittel 4.2.1 blir strålingsutvekslingen mellom takoverflaten og omverdenen ikke beregnet spesielt. Det er en forenkling som stemmer bra ved overskyet vær og når det er vind, men som gir noe for høy overflatetemperatur ved vindstille og klar nattehimmel og for lav ved direkte solbestråling. Innvirkning av solstråling blir nærmere omtalt i kapittel 5.4. Ved beregningene tas det hensyn til varmestrøm til og fra loftet ved transmisjonstap og luftlekkasjer gjennom bygningsdelene. Ved beregning av luftede loft blir det tatt hensyn til varmetapet på grunn av luftgjennomstrømning gjennom loftet på grunn av forskjellig vindtrykk på lo og le side av bygningen. Programmet beregner hvilken lufttemperatur loftet har når varmestrømmen til og fra loftet er i balanse.

4.5.3 Fuktbalanse

Fukttransport til og fra loftet skjer ved diffusjon og luftlekkasjer. Hvis det er spalteåpninger, fra ute til loftet ved takutstikkene, og samtidig vind, vil det normalt gi en fuktutførsel fra loftet. Fukttinnholdet i luften i et rom, for eksempel på et kaldt loft, vil hele tiden bevege seg mot et nivå som gir balanse mellom tilførsel og utførsel av fukt fra luften i rommet. I denne fuktbalansen inngår også fukttopptak (adsorpsjon) eller fuktavgivelse (desorpsjon) til/fra materialene som lufta på loftet er i kontakt med. Når damptrykket ved taktroen blir like høyt som metningstrykket vil det felles ut fukt fra lufta i form av kondens på undersiden av taktroen eller undertaket. Programmet beregner dette og det forutsettes at kondensvannet forblir på loftet ved undertaket inntil det diffunderer ut gjennom undertaket eller fordampes til lufta på loftet igjen. Materialene på loftet, spesielt tre og trebaserte materialer, fungerer som en buffer og demper svingningene i RF på loftet. Hvis for eksempel fukttransporten opp gjennom himlingen øker på grunn av en økning av luftfuktigheten i rommet under, vil også luftfuktigheten på loftet

øke. Det vil i neste omgang føre til økt fukttransport ut gjennom gavlvegger og tak, men også økt fuktopptak i undertak, taktro og andre hygroskopiske materialer på loftet. Etter hvert kommer fuktinnholdet i luften og i materialene på loftet opp på et høyere nivå slik at det blir likevekt igjen mellom tilførsel og utførsel av fukt på loftet.

På tilsvarende måte vil luften på loftet ta opp fukt fra materialene når RF på loftet synker. Det tas hensyn til fuktutveksling ved sorpsjon bare mellom luften og treverk og taktro på loftet, mens tilsvarende virkning fra sorpsjon i andre materialer er neglisjert i denne studien.

På grunn av naturlig omrøring i luften på loftet, konveksjon, vil absolutt luftfuktighet, g/m^3 , være tilnærmet den samme på hele loftet, mens RF vil variere i takt med temperaturvariasjonene på loftet. RF vil være høyest ved undersiden av undertaket fordi temperaturen vil være lavest der.

Ved beregning av *luftede* loft blir det tatt hensyn til luftgjennomstrømning gjennom loftet på grunn av forskjellig vindtrykk på lo og le side av bygningen og størrelsen på spalteåpningene ved takutstikkene.

4.6 Soppvekst

4.6.1 Generelt

For at mugg- og annen overflatesopp skal vokse må flere betingelser være oppfylt. Det må være næring, luft og soppsporer tilstede og relativ luftfuktighet og temperatur må være innenfor visse grenser. De fleste organiske byggematerialer gir tilstrekkelig tilgang på næring. Skitt og støv på overflaten av uorganiske materialer kan gi tilstrekkelig næring for soppvekst. Selv om forekomsten av soppsporer vil variere mye vil det som regel alltid være nok sporer tilstede for at det vil vokse mugg, forutsatt at de øvrige betingelsene er oppfylt. Det samme gjelder luft (oksygen og nitrogen). Hvis materialoverflaten tilsettes soppveksthindrende midler, fungicider, ved impregnering eller overflatebehandling vil soppvekst kunne hindres eller hemmes.

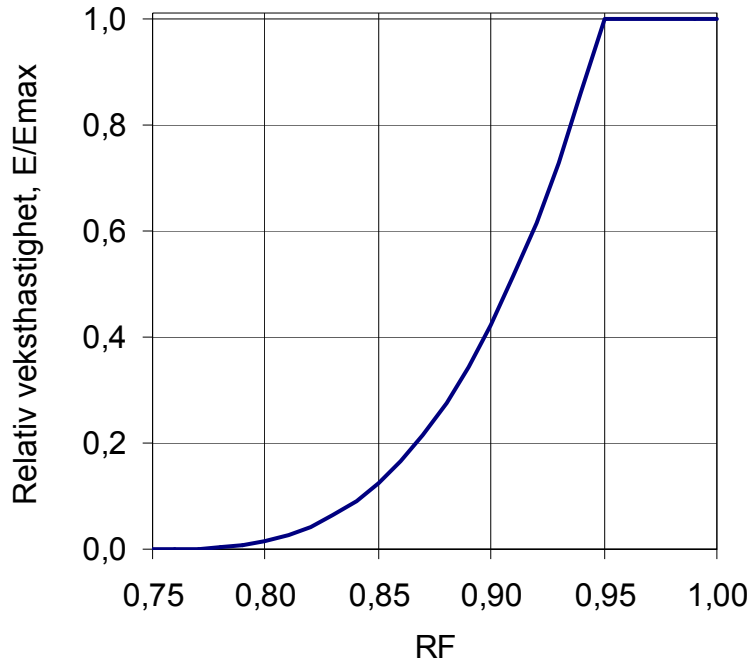
4.6.2 Soppveksthastighet

Veksthastigheten for sopp er sterkt avhengig av temperaturen og fuktforholdene ved materialoverflaten. På grunnlag av finske studier av muggsoppvekst på treoverflater [23] er det satt opp noen kvantifiserte sammenhenger mellom veksthastighet for muggsopp og henholdsvis relativ luftfuktighet og temperatur ved materialoverflaten [20]. Basert på de sammenhengene har vi gjort ytterligere noen forenklinger. Det er gjort for å kunne kvantifisere muligheten for soppvekst over tid under varierende temperatur- og fuktforhold.

Sammenhengene vi har brukt er vist i figurene 4.6.1, 4.6.2 og 4.6.3. Diagrammene angir relativ muggveksthastighet som er forholdet mellom veksthastighet ved aktuell RF eller temperatur og maksimal veksthastighet. Relativ veksthastighet er derfor et tall mellom 0 og 1. Figur 4.6.3 er laget ved å kombinere de to første diagrammene ved at de relative veksthastighetene avhengig av RF og temperatur er multiplisert med hverandre. Hvis for eksempel RF er 0,90 og temperaturen er 20 °C gir Figur 4.6.1 (RF) en relativ veksthastighet på ca. 0,4 og Figur 4.6.2 (temperatur) en relativ veksthastighet på 0,5. Figur 4.6.3 gir en samlet relativ veksthastighet på 0,2 som er produktet av 0,4 og 0,5.

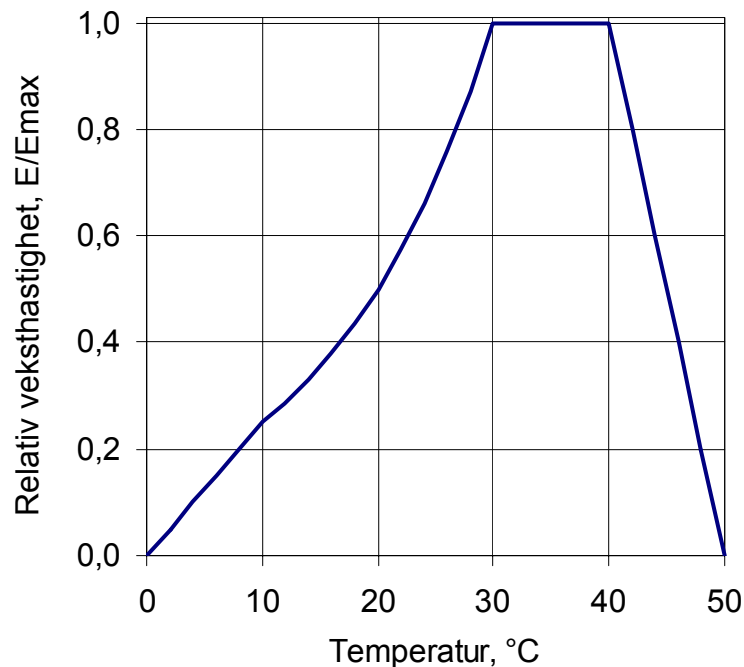
4.6.3 Soppvekstpotensial

På grunnlag av beregnede månedsmiddelerdier for RF og temperatur ved undertaket og sammenhengen mellom temperatur, RF og muggveksthastighet beregnes et teoretisk vekstpotensial for muggsopp den aktuelle måneden. Soppvekstpotensialet oppgis som et ekvivalent antall "maksdøgn". Det tilsvarer antall døgn med maksimale vekstforhold som teoretisk gir samme soppvekst som ved de aktuelle fukt- og temperaturforholdene i måneden. For eksempel vil én måned (30 døgn) med beregnet midlere temperatur og RF som gir 10 % av maksimal veksthastighet gi et soppvekstpotensial tilsvarende 3 døgn med maksimal soppvekst ($30 \times 0,1$). Beregnet soppvekstpotensial for hver måned summeres opp til et samlet soppvekstpotensial for ett helt år.

**Figur 4.6.1**

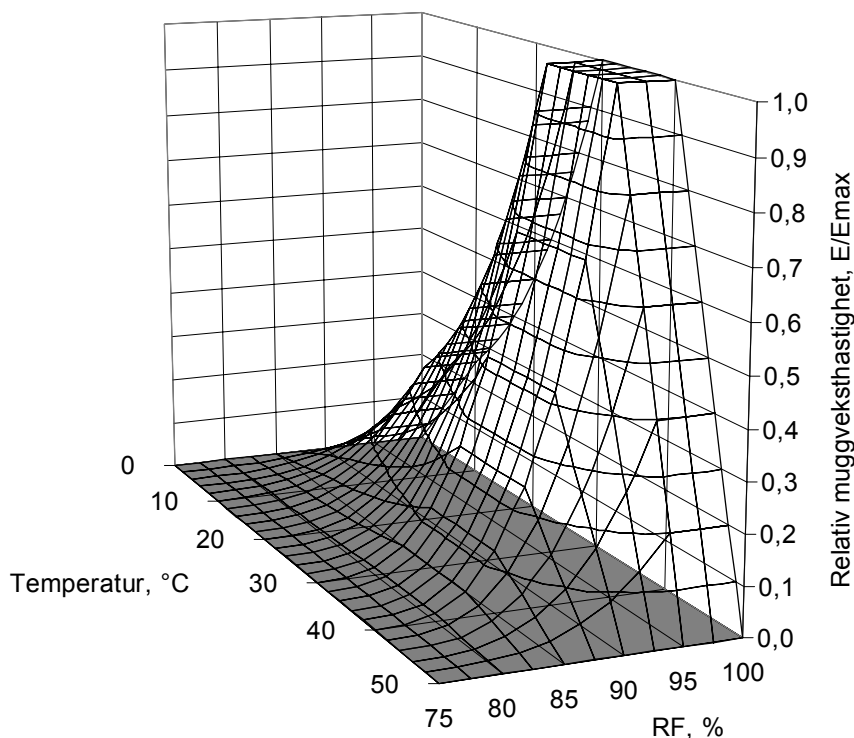
Relativ muggveksthastighet avhengig av relativ luftfuktighet, φ .

Ved $\varphi < 0,75$ (RF < 75 %) er det antatt at det ikke er noen soppvekst. Ved $0,75 < \varphi < 0,95$ beregnes den relative soppveksthastigheten etter uttrykket $E/E_{max} = ((\varphi - 0,75)/2)^3$. Når relativ fuktighet er over 0,95 regnes veksthastigheten å være maksimal for den aktuelle temperaturen.

**Figur 4.6.2**

Relativ muggveksthastighet avhengig av temperatur.

Når temperaturen er lavere enn 0 eller høyere enn 50 °C er det i beregningene forutsatt at det ikke er noen soppvekst. I temperaturintervallet + 10 -+30 °C har vi forutsatt at muggveksthastigheten fordobles pr. 10 °C temperaturøkning. I de øvrige temperaturintervallene er det forutsatt at veksthastigheten varierer lineært med temperaturen slik det framgår av figuren.



Figur 4.6.3

Relativ muggveksthastighet avhengig av både RF og temperatur. Diagrammet er laget ved å kombinere diagrammene i figur 4.6.1 og figur 4.6.2.

4.6.4 Forenklinger og begrensninger

Å kvantifisere fuktforhold og vekst av muggsopp er begge svært kompliserte oppgaver og det har derfor vært nødvendig å gjøre en del forenklinger og antagelser. Temperaturen og dermed RF på et loft vil kunne variere mye i løpet av et døgn og ennå mer i løpet av en måned. Deler av tiden kan det være betingelser for soppvekst selv om middelveiene for temperatur og RF ikke gir soppvekst. Beregninger på timebasis ville derfor gi sikrere resultater, men for at beregningsomfanget ikke skulle bli for stort har vi i denne studien likevel valgt å bruke månedsmiddelværdier for ute- og inneklimate og regnet på månedsbasis.

Som nevnt foran tar beregningsprogrammet ikke hensyn til at taket i perioder blir oppvarmet av solstråling. Soloppvarming vil i praksis virke sterkt inn på vekstforholdene for muggsopp på flere måter. Temperaturen vil svinge mer og i perioder gi raskere vekst, men også uttørkingen av loftet vil gå raskere slik at vekstperioden blir kortere. Den viktigste virkningen av soloppvarming er sannsynligvis at temperaturen blir så høy i perioder at muggsoppen dør. I følge [24] dør muggsopp ved en temperatur på fra 40 til 50 °C. Dette blir nærmere omtalt i kapittel 5.4.1.

Beregningsprogrammet slik det foreligger, kan derfor i begrenset grad brukes til å bestemme absolutt omfang av muggsoppvekst i et konkret tilfelle. Programmet kan derimot brukes for å undersøke hvordan endringer i for eksempel undertakets vanndampmotstand, og andre parametere, påvirker risikoen for soppvekst.

5 Beregningsresultater

5.1 Generelt

Resultatene fra beregningene er gitt i form av diagrammer som viser hvordan beregnet muggvekstpotensial varierer med utvalgte parametere. Se forklaring i kapittel 4.2.1 og 4.2.3. Som det framgår av kapittel 4 er det mange forhold som kan påvirke temperatur- og fuktnivå på et kaldt loft og dermed betingelsene for soppvekst på undertaket. Vi har først og fremst undersøkt forhold vi kan påvirke gjennom valg av byggetekniske løsninger og materialer og ved bruken av bygningen. I kapittel 5.2 er det vist diagrammer for tak med kaldt, ikke luftet loft, mens det er vist noen diagrammer for tak med kaldt, luftet loft i kapittel 5.3.

5.2 Tak med kaldt, ikke luftet loft

For et kaldt, ikke luftet loft har undertakets motstand mot vanndampdiffusjon, dampmotstanden, stor betydning etter som all uttørring av fukt må kunne skje ved diffusjon gjennom undertaket og gavlveggene. Vi har derfor valgt å vise beregnet muggvekstpotensial for et bredt utvalg av dampmotstander for undertaket, gitt ved s_d -verdien, i alle diagrammene. Betydningen en del andre parametere har for muggvekstpotensialet er vist i ved at én og én parameter er variert i hvert av diagrammene. De øvrige parametere har da sin ”normalverdi”. De parametrene som er variert er gitt i tabell 5.2.1 sammen med normalverdiene som er brukt ved beregningene. Øvrige inngangsverdier er faste for de viste diagrammene. De viktigste, faste inngangsverdiene er gitt i tabell 5.2.2. Vi har valgt å bruke Oslo klima i de fleste beregningene som er vist i rapporten. I vedlegg 1 er det vist tilsvarende diagrammer med resultater for i alt ni steder i Norge.

Tabell 5.2.1

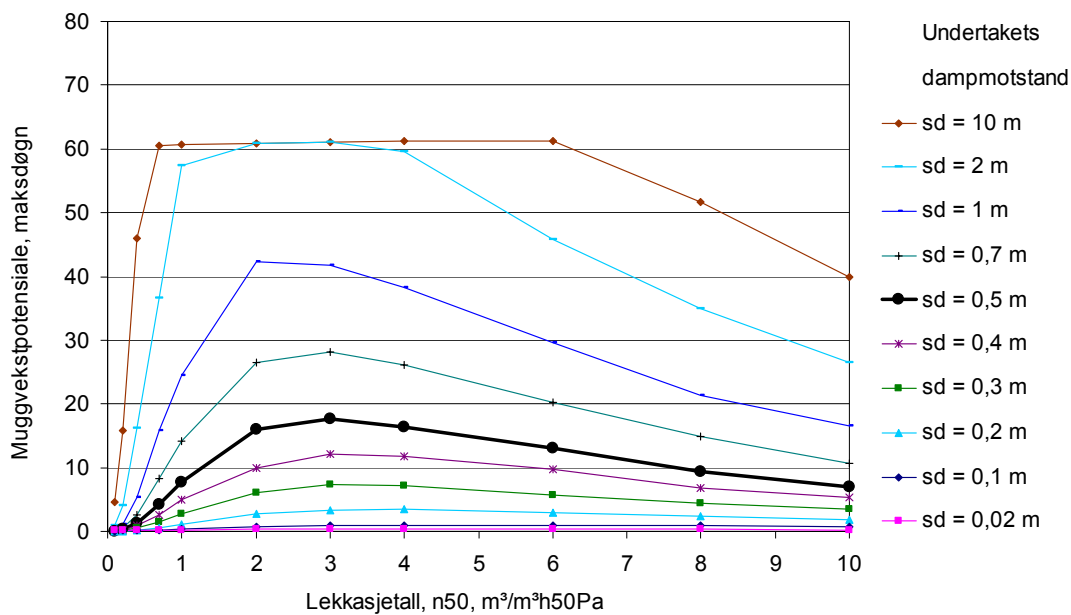
Oversikt over inngangsparametere som er variert og i hvilke figurer beregningsresultatene er vist. Verdien som parameteren har hatt når den ikke er variert er gitt til høyre i tabellen.

Parametere med variert verdi	Figur nr.	Verdi når parameteren ikke er variert
Undertakets dampmotstand, s_d -verdi	Alle	0,5 m
Husets lekkasjetall, n_{50}	5.2.1	4,0 m^3/m^2h50Pa
Gjennomsnittlig luftgjennomgangstall pr. areal	5.2.2	0,093 m^3/m^2hPa
Grunnventilasjon, til- og fraluft	5.2.3 – 5.2.4	0,2 m^3/m^2h
Undertakets luftgjennomgangstall	5.2.5 – 5.2.7	0,05 m^3/m^2hPa
Gavlveggenes luftgjennomgangstall		Samme som undertaket
Utetthetsfordeling - golv, vegger og himling	5.2.5 – 5.2.7	Jevnt fordelt pr. areal
Himlingens dampmotstand, s_d -verdi	5.2.8	10 m
Antall etasjer	5.2.9 – 5.2.10	2
Fuktproduksjon	5.2.11	10 kg/døgn
Innetemperatur	5.2.12	20 °C
Uteklima, temperatur og RF, sted	V 1.1 – V 1.9	Oslo

Tabell 5.2.2

Oversikt over inngangsparametere som ikke er variert, men som har hatt faste verdier ved beregningene

Parametere med fast verdi	Fast verdi
Samlet golvareal, sum alle etasjer	150 m^2
Takvinkel	30 °
Taktro av tre, tykkelse	15 mm
Bindingsverk i tak og gavlvegger	6 kg/m^2
Gavlveggenes dampmotstand, s_d -verdi	0,5 m
U-verdi, tak over kaldt loft og gavlvegg	3,2 W/m^2K
U-verdi, bjelkelag under kaldt loft	0,15 W/m^2K
Vanndamppermeabilitet tre, (85 % RF)	$1 \cdot 10^{-11}$ $kg/msPa$
Vanndampmotst., s_d -verdi, 15 mm taktro av tre, (85 % RF)	0,3 m
Innetemperatur	20 °C
Vindhastighet (neglisjert)	0 m/s

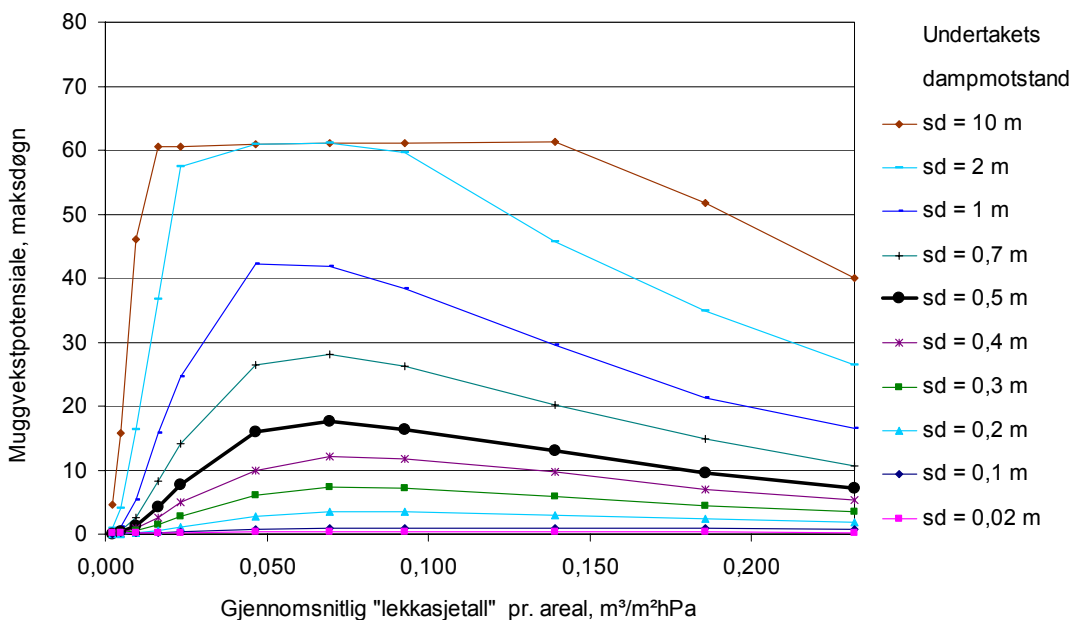


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.1

Husets lekkasjetall, n₅₀

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi. Det er vist én kurve for hver s_d-verdi for undertaket, se kurveidentifikasjon til høyre i diagrammet. De viktigste inngangsverdiene er gitt nederst i diagrammet.

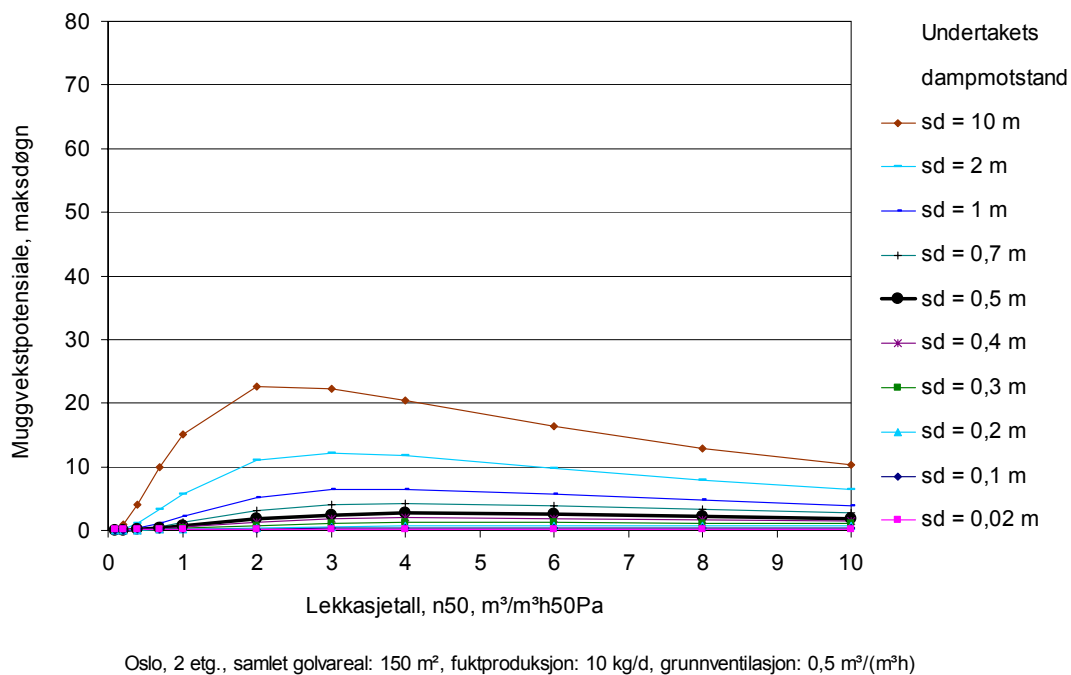


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.2

Gjennomsnittlig luftgjennomgangstall

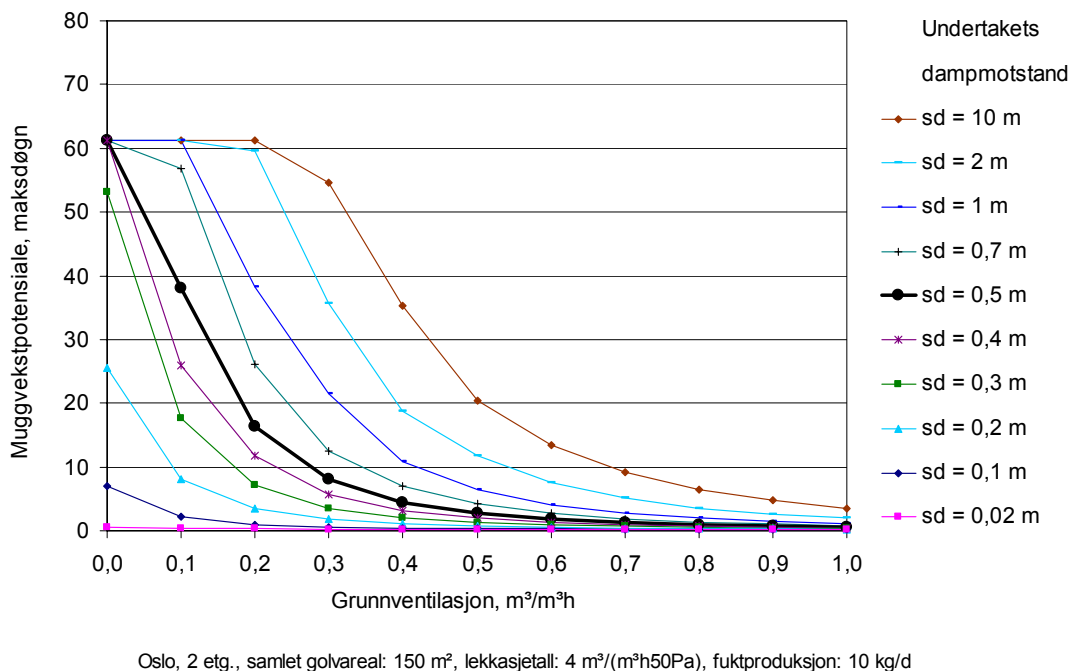
Samme som figur 5.2.1, men husets lekkasjetall, n₅₀, er regnet om til luftgjennomgangstall, lekkasje pr. areal, som er likt for golv, vegger og himling.



Figur 5.2.3

Med anbefalt grunnventilasjon

Samme inngangsverdier som for figur 5.2.1, men med grunnventilasjon økt til 0,5 luftvekslinger pr. time som er anbefalt minimumsventilasjon i boliger. Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets lekkasjetall, n_{50} , og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi.

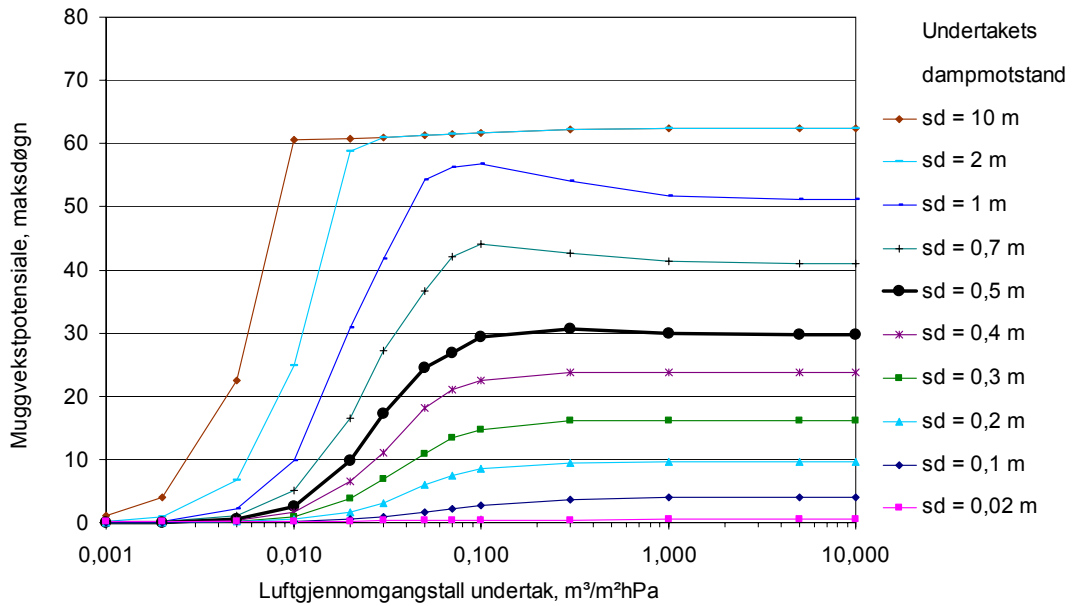


Figur 5.2.4

Grunnventilasjon

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets grunnventilasjon og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi.

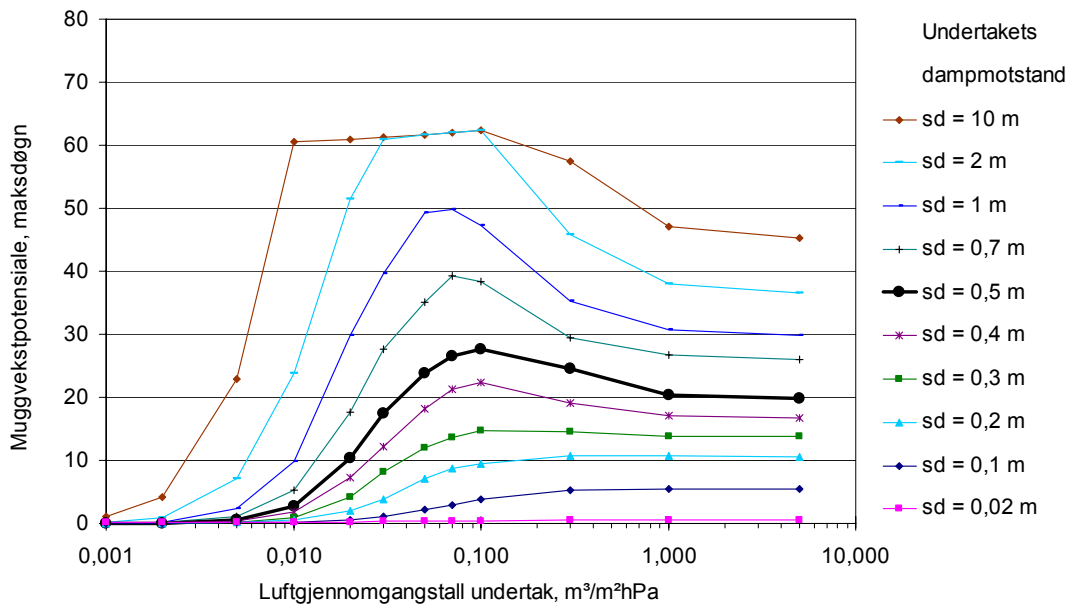
Tak med kaldt loft



Figur 5.2.5

Undertakets luftgjennomgangstall, utett himling, 2 etasjer

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med undertakets luftgjennomgangstall, og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi. Himlingen er her tre ganger mer utett enn golv og vegger. Det er ofte tilfellet for hus med A-takstoltak.

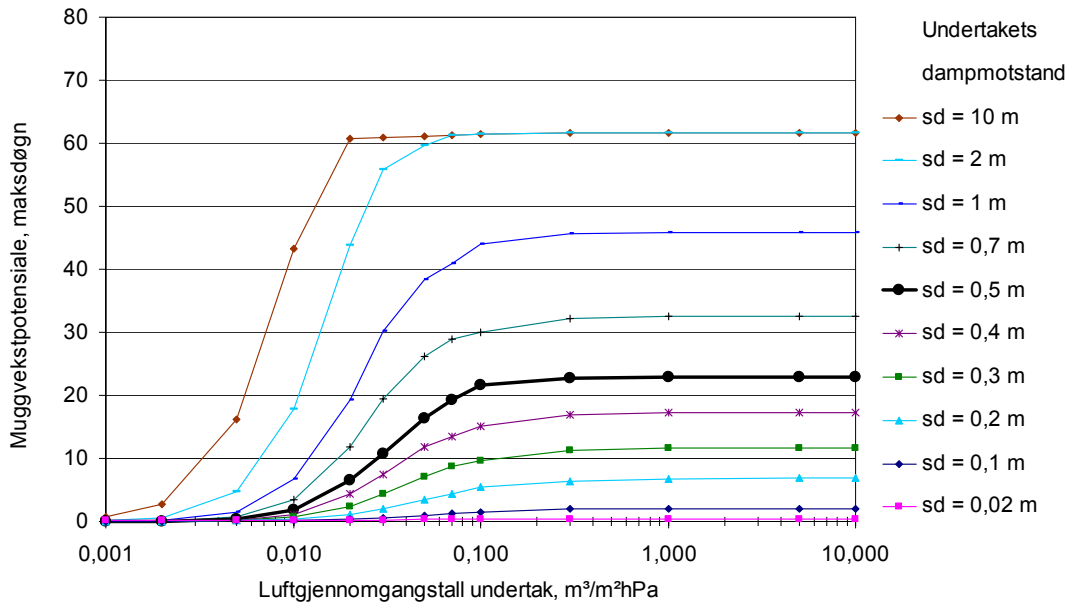


Figur 5.2.6

Undertakets luftgjennomgangstall, utett himling, 3 etasjer

Samme som figur 5.2.5, men for et hus med tre etasjer.

Tak med kaldt loft

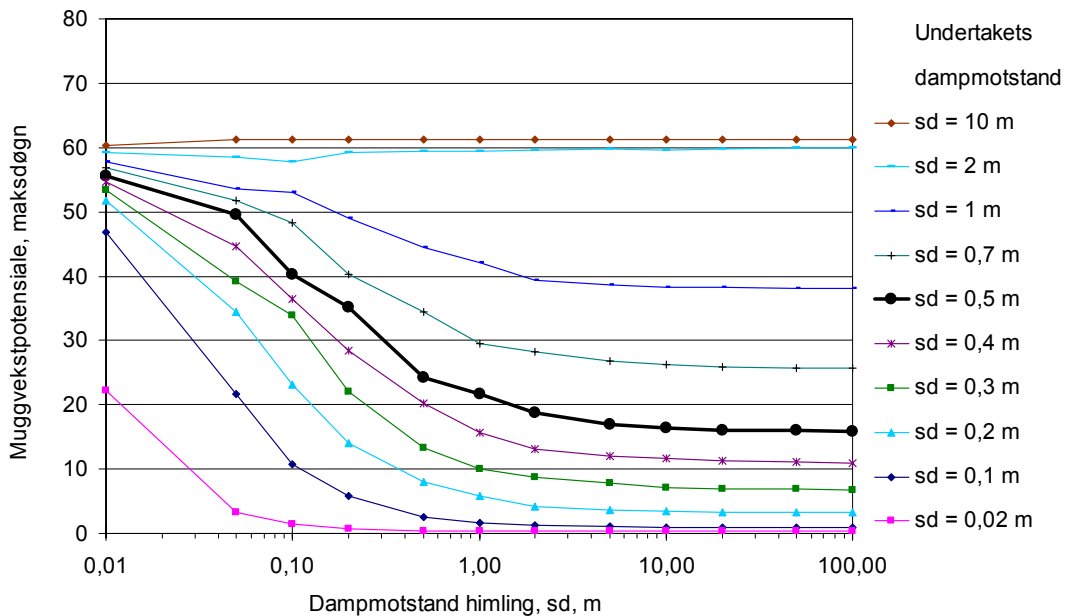


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), luftgjennomgangstall himling: 0,09 m³/m²hPa, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.7

Undertakets luftgjennomgangstall

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med undertakets luftgjennomgangstall, og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi. Husets utettheter for øvrig er her jevnt fordelt på golv vegger og himling.

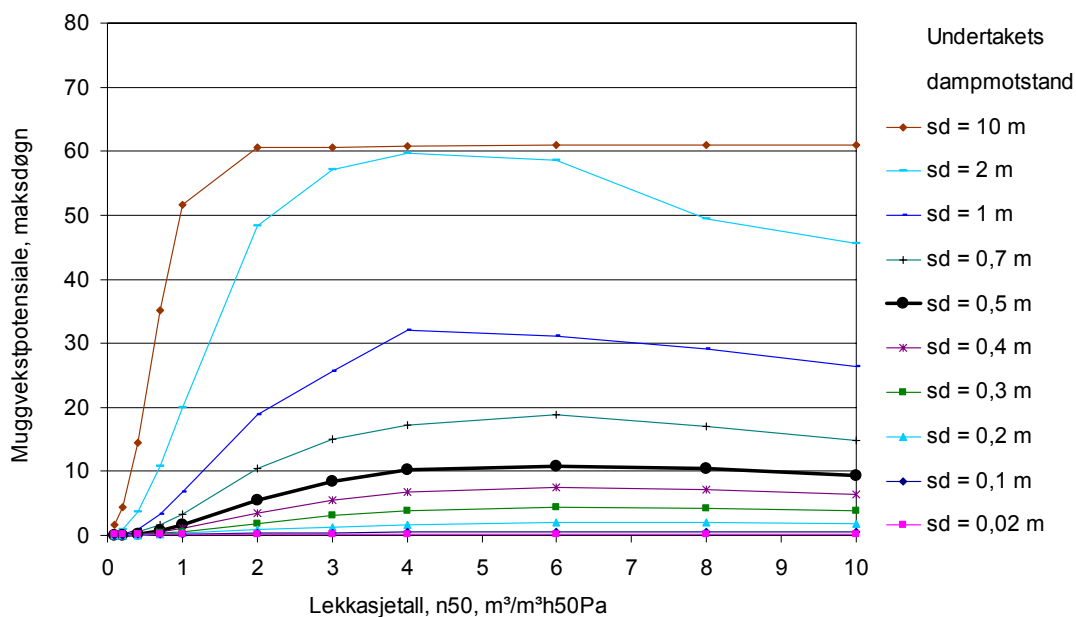


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.8

Himlingens dampmotstand, s_d -verdi.

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med himlingens dampmotstand, s_d -verdi, og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi. Anbefalt minimumsverdi for dampsperrer er $s_d = 10$ m, mens en 0,15 mm tykk PE-folie har $s_d = \text{ca. } 70$ m.

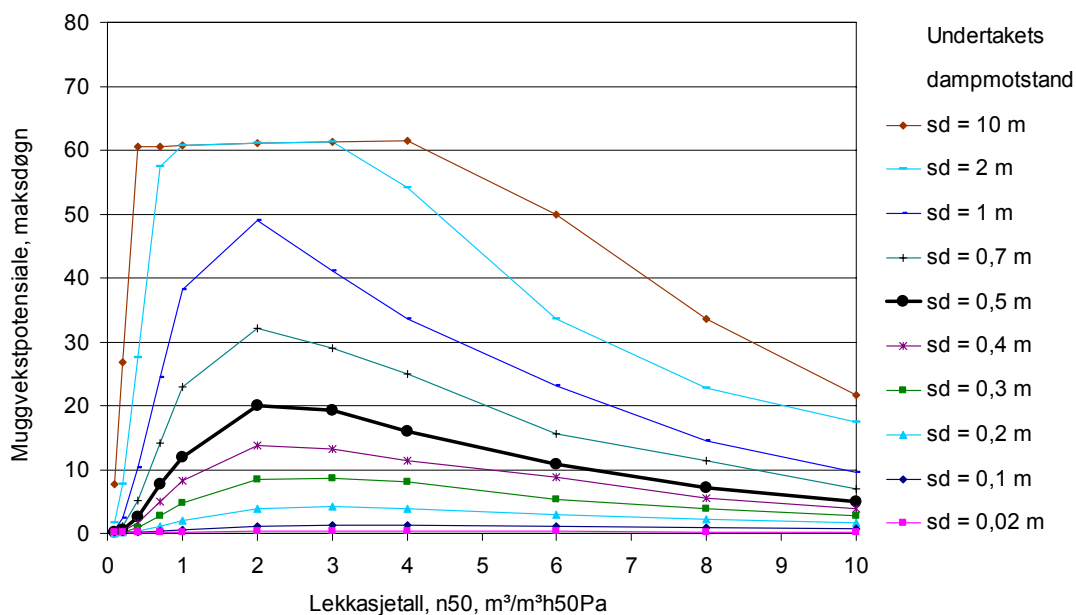


Oslo, 1 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.9

Hus med 1 etasje

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets lekkasjetall, n_{50} , og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi, for et hus med bare 1 etasje. Tilsvarende diagram for hus med 2 etasjer er vist i figur 5.2.1 og for hus med 3 etasjer i figur 5.2.10.

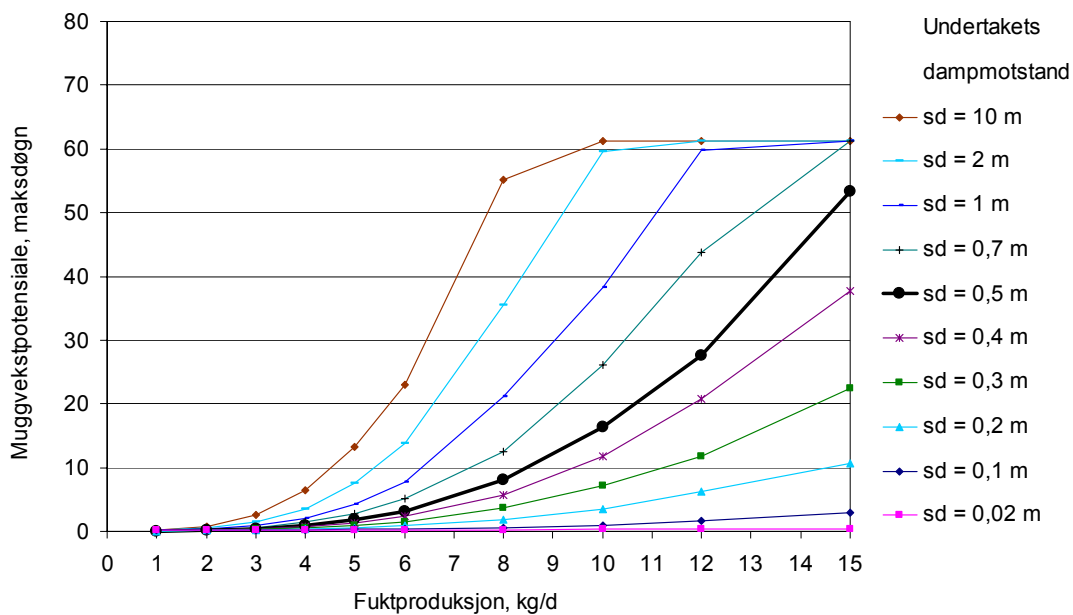


Oslo, 3 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.10

Hus med 3 etasjer

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets lekkasjetall, n_{50} , og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi, for et hus med 3 etasjer. Tilsvarende diagram for hus med 1 etasje er vist i figur 5.2.9 og for hus med 2 etasjer er i figur 5.2.1.

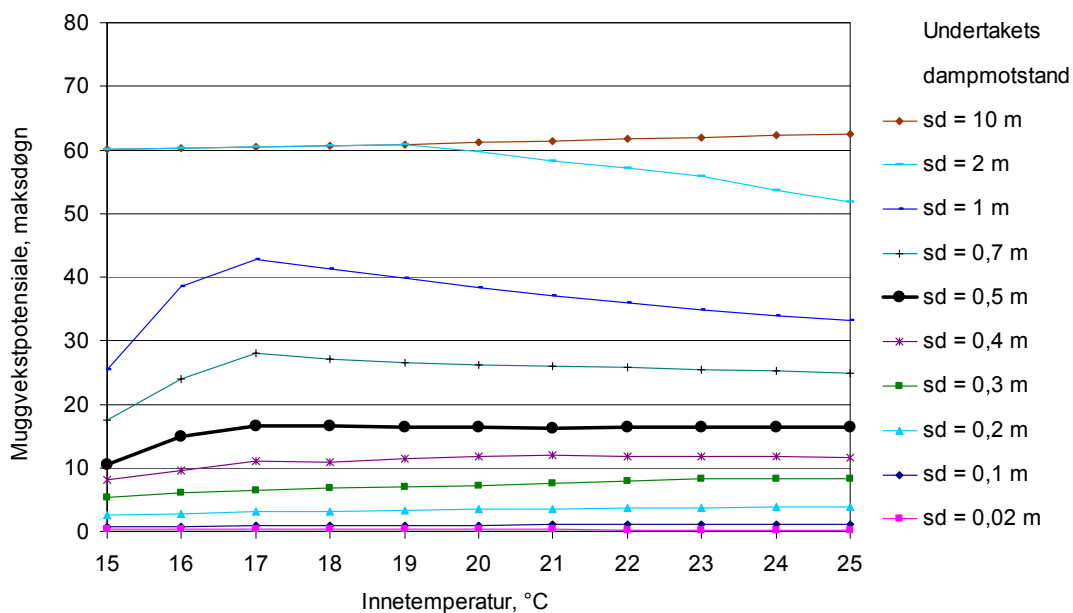


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.11

Fuktproduksjon

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets fuktproduksjon, (fuktilførsel) og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi.



Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur 5.2.12

Innetemperatur

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak varierer med husets innetemperatur og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi.

5.3 Tak med luftet, kaldt loft

Ved beregningene for luftet, kaldt loft har de fleste parametrene hatt samme verdi som ved beregningene for kaldt, ikke luftet loft, men noen er endret. Nye parametre og parameterverdier som er endret for kaldt, luftet loft i forhold til ikke luftet loft er skrevet med *kursiv* i oversiktene i tabell. 5.3.1 og tabell 5.3.2 nedenfor.

Vi har valgt å beholde samme form og skalaer på diagrammene som i kapittel 5.2 for at det skal være enkelt å sammenligne beregningsresultatene for de to taktypene. Vi har imidlertid tatt med kurver for ”damptette” undertak, s_d -verdi ≥ 10 m, ettersom det ikke er nødvendig med dampåpent undertak når loftet er luftet.

Det er forutsatt at det er en kontinuerlig spalteåpning inn til loftet ved begge raftutstikkene, i hele takets lengde, men ingen lufteåpninger i mønet eller i gavlveggene.

Undertakets luftgjennomgangstall er økt, av beregningstekniske grunner, slik at takets lufttetthet hovedsakelig er bestemt av himlingens lufttetthet.

Tabell 5.3.1

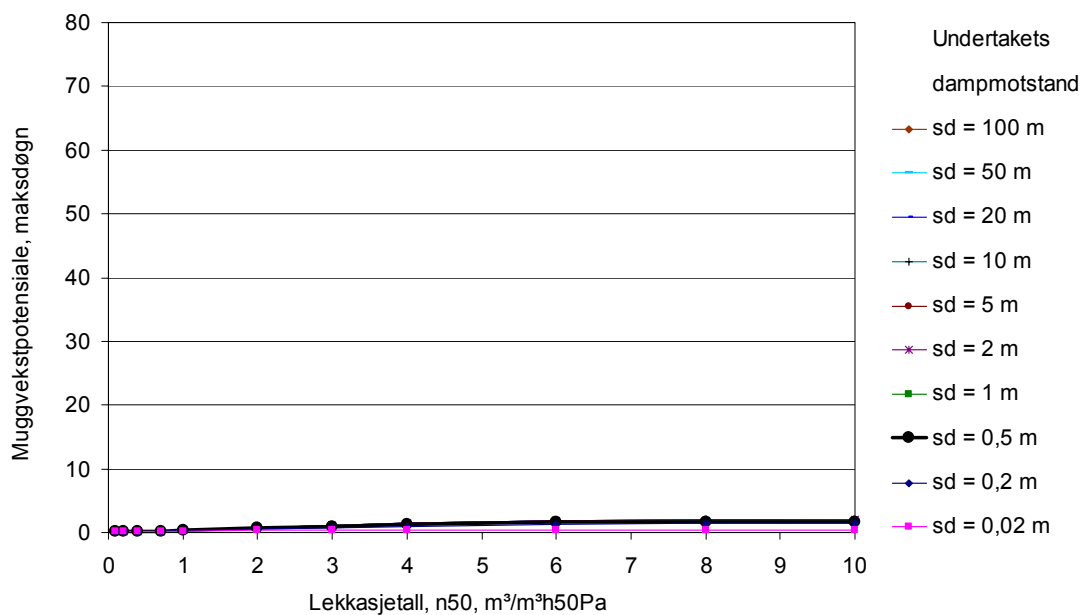
Oversikt over inngangsparametere som er variert og i hvilke figurer beregningsresultatene er vist
Inngangsverdien som parameteren har hatt når den ikke er variert er gitt til høyre i tabellen.

Parametere med variert verdi	Figur nr.	Verdi når parameteren ikke er variert
<i>Luftspalteåpning, bredde</i>	5.3.2	5 mm
Undertakets dampmotstand, s_d -verdi	Alle	0,5 m
Husets lekkasjetall, n_{50}	5.3.1	4,0 m^3/m^2h50Pa
Fuktproduksjon	5.3.3	10 kg/døgn
Grunnventilasjon, til- og fraluft	5.3.4	0,2 m^3/m^2h
<i>Vindhastighet</i>		2 m/s
Uteklima, temperatur og RF, sted		Oslo

Tabell 5.3.2

Oversikt over inngangsparametere som ikke er variert, men som har hatt faste verdier i beregningene

Parametere med fast verdi	Fast verdi
<i>Vindtrykkfaktor ved spalteåpning, lo-side</i>	0,5
<i>Vindtrykkfaktor ved spalteåpning, le-side</i>	-0,5
<i>Undertakets luftgjennomgangstall</i>	1,0 m^3/m^2hPa
Gavlveggenes luftgjennomgangstall	Samme som undertaket
Samlet golvareal, sum alle etasjer	150 m^2
Antall etasjer	2
Takvinkel	30 °
Utetthetsfordeling golv, vegger og himling	Jevnt fordelt pr. areal
Takro av tre, tykkelse	15 mm
Bindingsverk i tak og gavlvegger	6 kg/m^2
Gavlveggenes dampmotstand, s_d -verdi	0,5 m
U-verdi, tak over kaldt loft og gavlvegg	3,2 W/m^2K
U-verdi, bjelkelag under kaldt loft	0,15 W/m^2K
Himlingens dampmotstand, s_d -verdi	10 m
Vanndamppermeabilitet tre, (85 % RF)	$1 \cdot 10^{-11}$ $kg/msPa$
Vanndampmotst., s_d -verdi, 15 mm takro av tre, (85 % RF)	0,3 m
Innetemperatur	20 °C

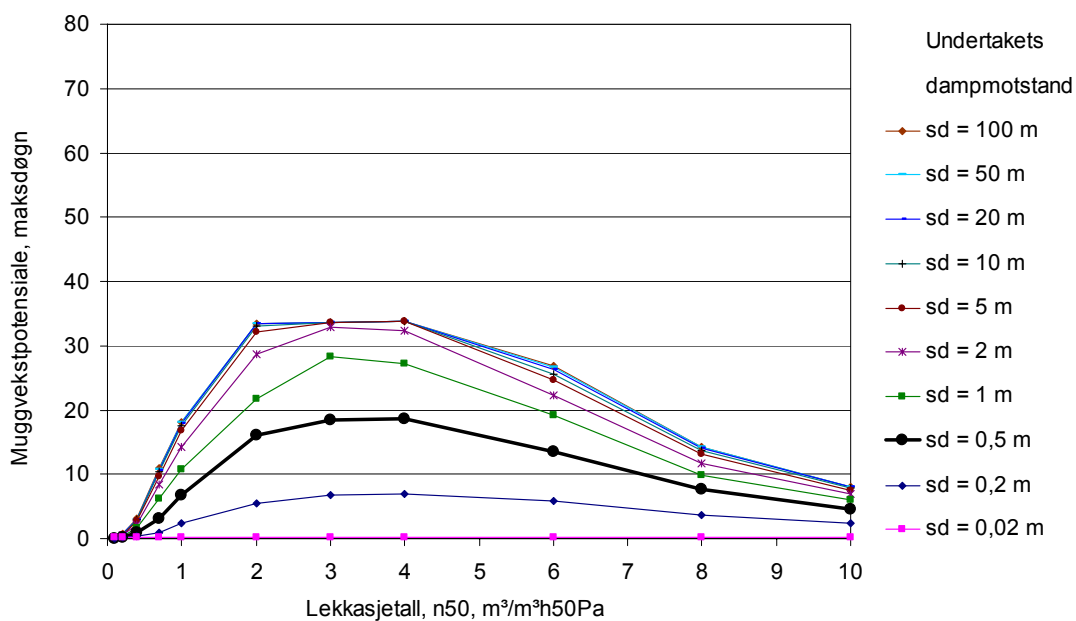


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), luftgjennomgangstall himling: 0,09 m³/m²hPa, midlere vindhastighet: 2 m/s, spalteåpning: 5 mm

Figur 5.3.1

Husets lekkasjetall, n₅₀, middels vind

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanndampmotstand, s_d-verdi. Klima med moderat vind.

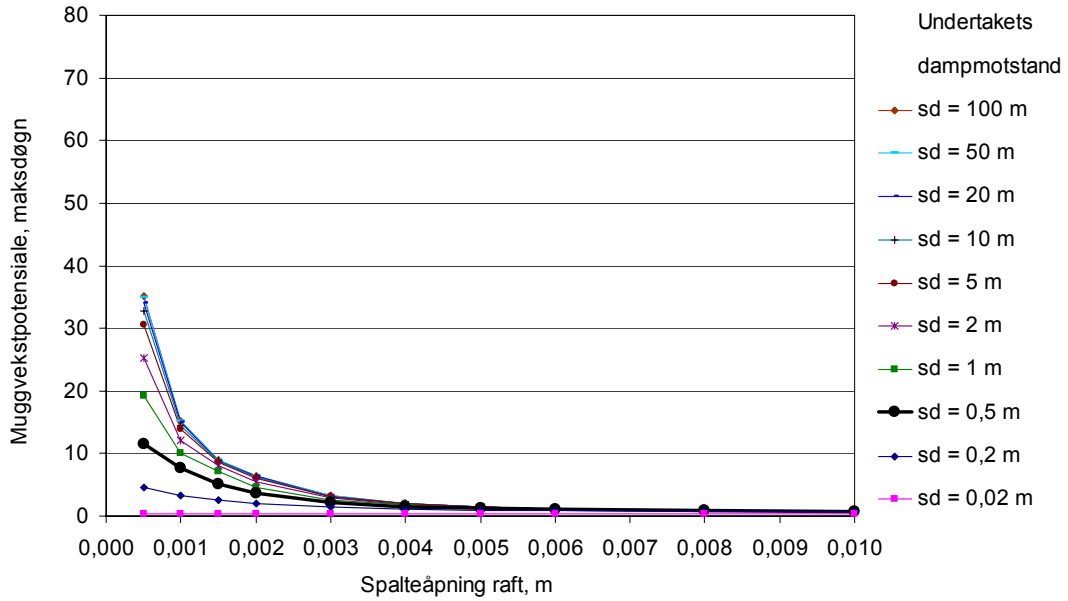


Karasjok, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), luftgjennomgangstall himling: 0,09 m³/m²hPa, midlere vindhastighet: 0,5 m/s, spalteåpning: 5 mm

Figur 5.3.2

Husets lekkasjetall, n₅₀, lite vind

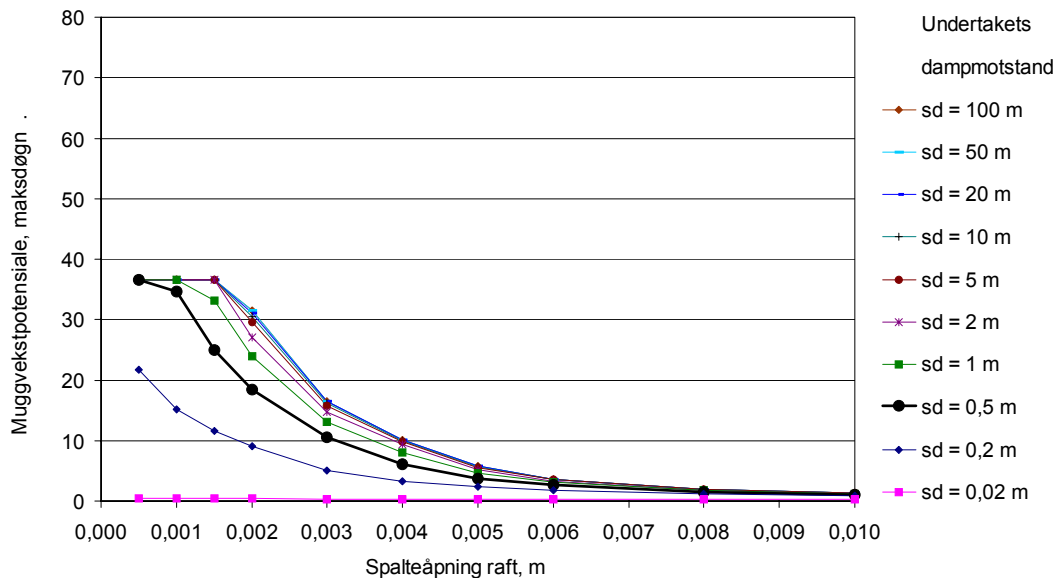
Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanndampmotstand, s_d-verdi. Klima med lite vind.



Figur 5.3.3

Luftespaltebredde, moderat vind

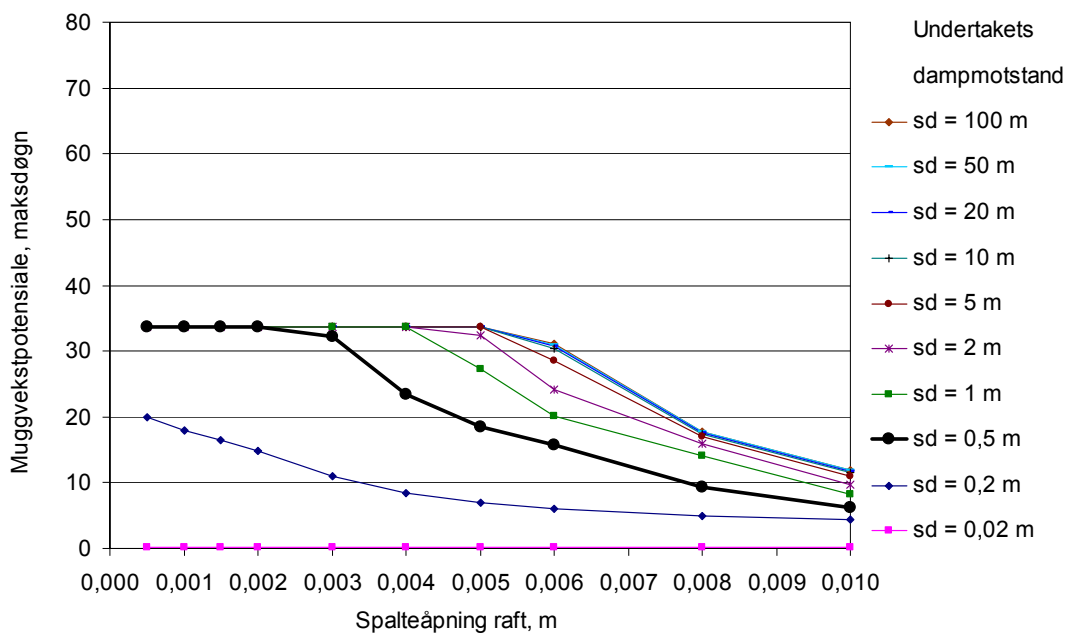
Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med bredden på spalteåpningene ved raft og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi. Det er ingen lufteåpninger ved mønet eller i gavelveggene. Klima med moderat vind.



Figur 5.3.4

Luftespaltebredde, moderat/lite vind

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med bredden på spalteåpningene ved raft og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi. Det er ingen lufteåpninger ved mønet eller i gavelveggene. Klima med moderat/lite vind.

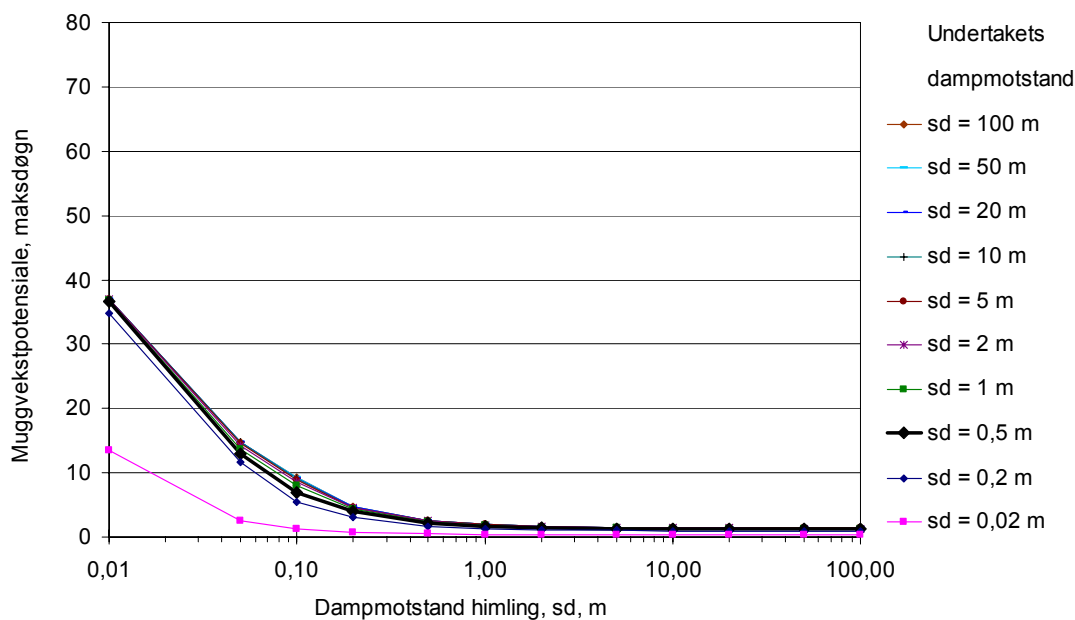


Karasjok, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), midlere vindhastighet: 0,4 m/s

Figur 5.3.5

Luftespaltebredde, lite vind

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med bredden på spalteåpningene ved raft og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi. Det er ingen lufteåpninger ved mønet eller i gavelveggene. Klima med lite vind.

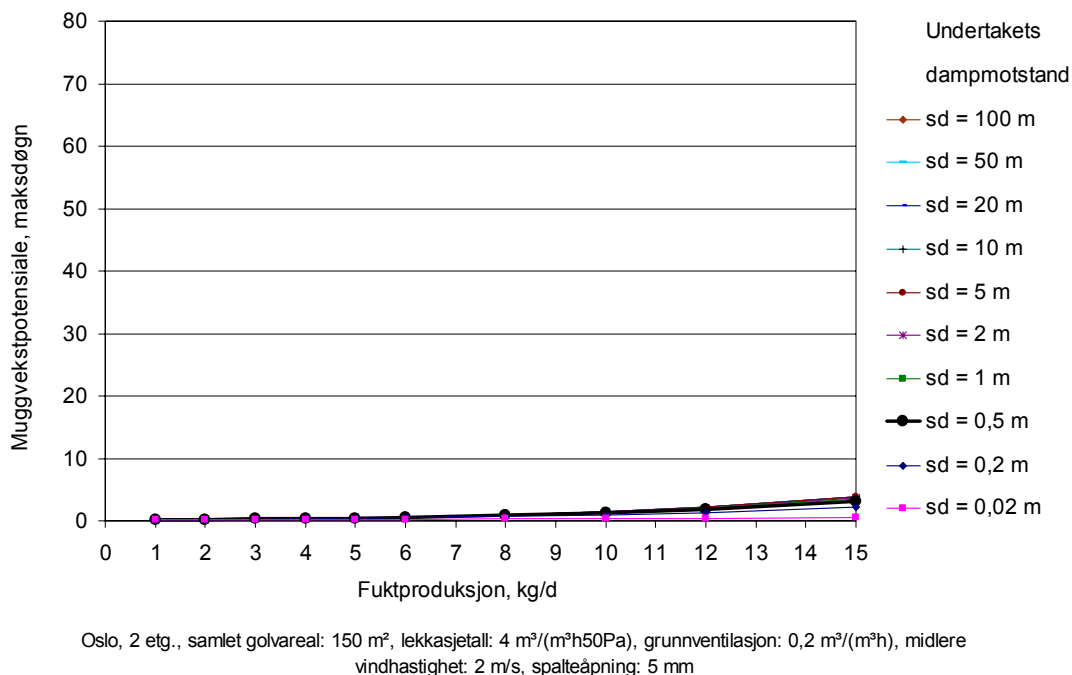


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), midlere vindhastighet: 2 m/s, spalteåpning: 5 mm

Figur 5.3.6

Dampmotstand himling.

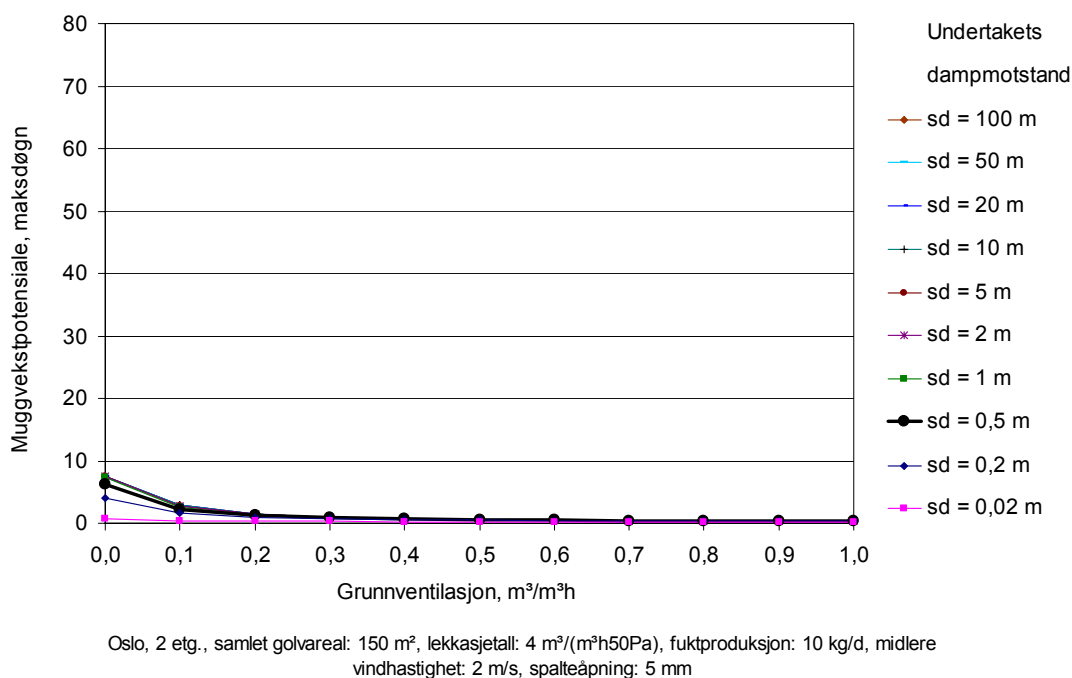
Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med himlingens dampmotstand og undertakets vanndampmotstand, s_d -verdi. Klima med moderat vind.



Figur 5.3.7

Fuktproduksjon

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med husets fuktproduksjon, (fuktilførsel) og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi. Klima med moderat vind.



Figur 5.3.8

Grunnventilasjon

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak, over luftet loft, varierer med husets grunnventilasjon (til- og fraluft) og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi .

6 Kommentarer og oppsummering

6.1 Generelt

6.1.1 Beregnet risiko for muggvekst

Diagrammene med beregningsresultater viser hvordan beregnet muggvekstpotensial varierer med de forskjellige inngangsparametrene. Med de valgte grunnverdiene i tabell 5.2.1 som inngangsverdier, med lav ventilasjonsgrad og forholdsvis høy fuktproduksjon, er det i følge beregningene klar risiko for muggvekst på undertak de fleste steder i landet. Beregnet muggvekstpotensial for ikke luftet, uluftet loft er lavest i Oslo med 18 maksdøgn (figur 5.2.1 og V.1.1) og størst i Kristiansund N med 55 maksdøgn (figur V.1.6). Beregningene viser imidlertid at risikoen kan reduseres betydelig ved forskriftsmessig ventilasjon og ved å velge undertak med ekstra lav vanddampmotstand. Dette blir nærmere omtalt i kapittel 6.2.

Tak med luftet loft har klart større uttørkingsevne, og dermed mindre risiko for soppvekst, enn tak med ikke luftet loft. Det gjelder først og fremst steder med midlere vindhastighet over ca. 1 m/s (figur 5.3.3, 5.3.4 og 5.3.5). Under ugunstige værforhold kan derimot luftede loft få tilført fukt fra uteluften. Dette blir nærmere omtalt i kapittel 6.3.

6.1.2 Relative resultater

Selv om beregnet soppvekstpotensial ikke kan brukes som et absolutt mål på om det blir skadelig muggvekst eller ikke på et bestemt undertak, viser diagrammene hvordan vekstbetingelsene for muggsopp og annen overflatesopp påvirkes av endringer i de forskjellige inngangsverdiene. Beregningene gir derfor, etter vår vurdering, et viktig grunnlag for å anbefale aktuelle bygningstekniske og bruksmessige tiltak for å begrense risikoen for skadelig muggvekst på undertak over kalde loftsrom. Beregningene viser også at det er betydelig variasjon i vekstbetingelsene fra sted til sted i landet og at behovet for tiltak for å redusere risikoen for soppvekst er avhengig av det lokale uteklimaet.

Vi har ikke nødvendig grunnlag for å si noe sikkert om hvor mange maksdøgn som er nødvendig for at det skal bli skadelig muggvekst på undertaket (taktroen) i et konkret tilfelle. I følge [24] vil det være en klar risiko for muggvekst etter 2 til 3 uker ved god næringstilgang og sammenhengende, gunstige fukt- og temperaturforhold.

6.1.3 Forenklinger

I vår beregningsmodell er det gjort flere forenklinger som bidrar til at beregnet muggvekstpotensial blir høyere enn det en får i et virkelig tak. Det er forklart nærmere nedenfor.

På et kaldt loft i en bygning vil RF og temperatur variere mye med tiden, både i løpet av ett døgn og fra døgn til døgn i en måned i tillegg til store variasjonen over året. Vannaktiviteten (RF) på materialoverflaten vil variere mindre enn temperaturen og RF i lufta inne på loftet fordi bygningmaterialene vil fungere som et bufferlager for fukt. I praksis vil muggveksthastigheten derfor først og fremst svinge i takt med temperatursvingningene i taket. Eventuell muggvekst vil stoppe helt opp i lange perioder når temperaturen i undertaket er noen få plussgrader eller lavere. Muggsoppen dør ikke på grunn av lave temperaturer, men vokser videre når temperaturen igjen er høy nok.

Samlet muggvekst og sporeproduksjon vil være mindre på et virkelig undertak, med mange oppdelte vekstperioder og gjentatt dreping av muggsoppen, enn ved laboratorieforsøk med stabile vekstforhold selv om samlet soppvekstpotensial beregnet etter vår forenklete modell er det samme.

Foruten fukt- og temperaturforholdene er det flere andre forhold som har betydning, blant annet type og konsentrasjon av spiredyktige muggsoppспорer. Muggvekst vil derfor, under ellers like

forhold, etablere seg lettere om sommeren enn om vinteren ettersom forekomsten av sporer da er vesentlig større. En næringsrik materialoverflate gir raskere vekst enn en overflate med mindre lett tilgjengelig næring. Ved tørking av rått trevirke får overflaten en anriking av sukker og nitrogen som begge bidrar til raskere muggvekst [24]. Taktro som er skåret eller høvlet av ferdig tørket virke vil derfor være mindre utsatt for muggvekst enn treoverflater som ikke er bearbeidet etter tørking.

6.1.4 Soloppvarming

Et annet viktig forhold som har stor betydning for muggveksten i de fleste tak er soloppvarming av takflatene og undertaket. Dette tas det imidlertid ikke hensyn til i vår beregningsmodell. Soloppvarmingen virker inn på flere måter. Uttørkingshastigheten blir vesentlig større i perioder med sol. Det skyldes at damptrykket, som er drivkraften for uttørkingen, øker mye med økende temperatur i materialene. For hver temperaturøkning på 10 °C dobles damptrykket i fuktige materialer noe som kan føre til at også uttørkingshastigheten nesten dobles. Raskere uttørking på grunn av soloppvarming fører derfor til at fuktinnholdet i undertak og taktro kommer under faregrensen for muggvekst tidligere enn det våre beregninger gir. Vekstperioden blir derfor kortere. Muggveksthastigheten vil derimot kunne bli høyere i denne perioden som følge av høyere temperatur, spesielt i starten, for så å avta når materialoverflaten blir tørrere.

Den viktigste virkningen av soloppvarming er at temperaturen kan bli så høy at muggsoppen dør. I følge [24] dør muggsopp ved en temperatur på fra 40 til 50 °C. Muggsoppen må derfor etablere seg på nytt, med spiring av nye soppsporer, etter hver slik sterk soloppvarming. Det vil derfor kunne ta flere uker før ”muggproduksjonen” har kommet opp på samme nivå som før oppvarmingen. Målinger Byggforsk har gjort på takelementer på et forsøkshus i Trondheim viser at temperaturen på en horisontal takflate kan bli over 60 °C en rekke ganger i perioden mai – august. Temperaturen ble målt under folietekningen og i underlagsplaten av 22 mm kryssfinerplaten i et kompakt, isolert tak [25]. I følge tabeller over solstråling i Norge [26], er maksimal totalstråling mot horisontale flater litt over 700 W/m² i Trondheim i mai. Maksimal totalstråling mot skrå takflater som heller 30° mot øst, sør eller vest er høyere enn 700 W/m² alle steder i Norge i perioden juni – august. Det viser at slike takflater også kan få tilsvarende oppvarming som taket i Trondheim.

I tak med opplettet, luftet tekning vil imidlertid undertaket ikke få like høy temperatur ved soloppvarming som selve tekningen. Vi har ikke gjort temperaturmålinger i tak med kaldt loft, men målinger som pågår i et annet saltak i Trondheim tekket med betongtakstein gir en viss pekepinn. Takvinkelen er 31° og taksidene er orientert tilnærmet rett mot øst og vest. Taket har kombinert undertak og vindspærre av kartong og all isolasjon i skråtaket. Her er det også målt temperaturer på 60 °C under tekningen. Når tekningen har maksimaltemperatur, er målt temperatur på undertaket ca. 10 °C lavere enn på tekningen. I et tak med kaldt, ikke luftet loft vil vi anta at temperaturforskjellen mellom tekning og undertak kan bli tilnærmet den samme, mens den sannsynligvis blir noe større for luftede loft.

Takflater som heller mot nord får mindre direkte solstråling, men i tak med kalde loft vil undertaket på nordvente flater likevel bli betydelig oppvarmet som følge av at luften inne på hele loftet blir oppvarmet av takflatene som utsettes for sol. Det er imidlertid mer usikkert om takflater som hovedsakelig heller mot nord blir varme nok til at muggsoppen dør.

6.1.5 Tak med oppholdsrom på deler av loftet

Beregningene er gjort med utgangspunkt i bygninger med skrått tretak med all takisolasjon liggende horisontalt på himlingen og med et kaldt sammenhengende loftsrom over. Som omtalt i kapittel 3.5.2 kan imidlertid denne taktypen og tak med all isolasjon i skråtaket være forholdsvis like fuktteknisk. For tak med dampåent undertak og all lufting på utsiden er det tetesjiktene på begge sider av isolasjonen som bestemmer fukttransporten opp gjennom taket og hvilket likevektsfukttinnhold det blir i rommet mellom. Under ellers like betingelser inne og ute er det lufttettheten og dampmotstanden til de to tetesjiktene som er avgjørende. Med samme

isolasjonsstandard blir temperaturen ved undertaket og dermed RF og vekstbetingelsene for sopp forholdsvis like for de to taktypene uavhengig av om isolasjonen ligger horisontalt eller om den flyttes opp til undertaket. Beregningsresultatene som er vist i denne rapporten kan derfor også langt på vei brukes for tak med all eller deler av isolasjonen i skråtaket.

6.2 Tak med kaldt, ikke luftet loft

I det følgende har vi gitt noen kommentarer til beregningsresultatene i diagrammene i kapittel 5.2 og 5.3 som viser hvordan endringer i de enkelte parameterne påvirker beregnet muggvekstpotensial.

6.2.1 Undertakets dampmotstand, s_d -verdi

En reduksjon i undertakets dampmotstand gir taket økt uttørkingsevne. Det gir i de aller fleste tilfellene også redusert risiko for muggvekst. Når undertakets dampmotstand kommer over en viss verdi er beregnet muggvekstpotensial upåvirket av ytterligere økning av dampmotstanden. Det skyldes at beregnet RF ved undertaket er 95 % eller høyere hele året. Det betyr at ytterligere oppfukning, for eksempel som følge av undertak med enda større dampmotstand, ikke gir mer muggvekst. I disse tilfellene er det temperaturforløpet på undertaket som bestemmer hvor høyt beregnet soppvekstpotensial blir. Som det framgår av diagrammene er denne "øvre grensen" lavest for steder med lavest utetemperatur Karasjok, Røros og Lillehammer og høyest i kyststrøkene i Sør-Norge hvor utelufttemperaturen jevnt over er høyere.

6.2.2 Bygningens lufttetthet, lekkasjetall n_{50} ,

I en "svært tett" bygning, $n_{50} < 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ ved 50 Pa trykkforskjell, er risikoen for skadelig oppfukning fra inneluten og påfølgende muggvekst svært liten de fleste steder. Se figurene 5.2.1 - 5.2.3. Risikoen for soppvekst øker med økende lekkasjetall og er, i følge beregningene, størst for lekkasjetall $n_{50} = \text{ca. } 3 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ 50Pa. Når lekkasjetallet øker ytterligere vil risikoen for muggvekst avta noe.

Denne sammenhengen mellom beregnet muggvekstpotensial og bygningens utetthet skyldes, som nærmere omtalt i kapitlene 4.4 og 4.5, at luftlekkasjene påvirker fuktforholdene på to "motstridende" måter. Luftlekkasjer tilfører fuktig inneluft til loftet, men bidrar samtidig til å senke fuktinnholdet i innelufta på samme måte som ventilasjonslufta som strømmer gjennom ventilasjonskanaler og ventiler.

I forholdsvis lufttette boliger, $n_{50} < 2,0 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ 50Pa, vil "virkelig" muggvekstpotensial i de fleste tilfeller være lavere enn det som er vist i diagrammene. Det skyldes at boliger med så lavt lekkasjetall må ha større grunnventilasjon enn $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$, som er lagt til grunn i beregningene, for at de skal unngå innvendig kondens ved kanten av vanlige, to-lags vindusruter. U-verdien midt på en to-lags isolerrute ligger mellom 1,2 og 1,6 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ og overflatetemperaturen blir så høy at det ikke er fare for kondens midt på ruten. Ved kantene derimot er overflatetemperaturen vesentlig lavere og risikoen for kondens tilsvarende høyere, spesielt nederst hvor overflatetemperaturen kan bli lavere enn middeltemperaturen mellom inne og ute. Grunnventilasjonen må økes eller fuktproduksjonen reduseres slik at fukttilskuddet i innelufta helst kommer under ca. $3 \text{ g}/\text{m}^3$ vinters tid for å unngå slik kondens. Se figur v3.2. Redusert fukttilskudd reduserer også fukttilførselen fra innelufta og opp til taket.

6.2.3 Undertakets luftgjennomgangstall

I tak med kaldt, ikke luftet loft kan undertaket gi et betydelig bidrag til takets samlede motstand mot luftlekkasjer og dermed redusere tilførselen av fukt til loftet. Se figurene 5.2.5 – 5.2.7. Det forutsetter at undertaket har tette skjøter og avslutninger ved gjennomføringer og mot vindspærren i ytterveggene. I bygninger der det er vanskelig å få til kontinuerlig dampspærresjikt, for eksempel i tak med A-takstoler, vil et undertak med god lufttetthet også være viktig for å redusere unødvendig energibruk. Se vedlegg 6.

Forutsatt at himlingen har kontinuerlig, god lufttetthet vil luftgjennomstrømning gjennom utettheter i undertaket kunne bidra effektivt til uttørkingen av loftet. For eksempel ved luftgjennomstrømning fra lo til le side av loftet på samme måte som for et luftet kaldt loft. Planlagte ”utettheter” i undertaket kan derfor være et aktuelt utbedringstiltak på loft med fuktskader hvis himlingen er noenlunde lufttett. Dette blir nærmere omtalt i kapittel 6.3.

6.2.4 Antall etasjer

Luftlekkasjene øker med antall etasjer i en bygning. Se figurene 5.2.9 og 5.2.10. Det skyldes at trykkforskjellene på grunn av temperaturforskjell mellom inne og ute øker proporsjonalt med høyden og derfor blir større når bygningens høyde blir større. Det gjelder spesielt hus med åpen, innvendig løsning, men fordi innervegger og innerdører oftest er forholdsvis utette, gjelder det mer eller mindre i de fleste bygninger.

6.2.5 Himlingens dampmotstand

Beregningene viser at fukttilførsel ved diffusjon opp gjennom himlingen har begrenset betydning så lenge himlingen (dampsperren) har en s_d -verdi på noen meter eller mer. Beregnet muggvekstpotensial avtar ytterligere litt med økende vanddampmotstand inntil s_d -verdien til himlingen (dampsperren) er ca. 10 m. En videre økning i dampmotstanden gir ingen ytterligere reduksjon i muggvekstpotensialet. Luftlekkasjer gjennom vegger og tak har mye større innvirkning på risikoen for muggvekst på et undertak enn himlingens dampmotstand. Det skyldes at luftlekkasjer kan transportere langt større fuktmengder innenfra og opp i taket enn det som kan tilføres ved diffusjon. Beregningene gir derfor ikke grunnlag for å angi et generelt forholdstall mellom dampmotstandene på varm og kald side av takisolasjonen for å sikre nok uttørking. En kan ikke kompensere for en høy dampmotstand på kald side ved å øke dampmotstanden på varm side. Se figur 5.2.8.

6.2.6 Grunnventilasjon

Som det framgår av figurene 5.2.3 og 5.2.4 har bygningens ventilasjon svært stor betydning for risikoen for muggvekst i taket. Det skyldes at inneluftas fuktinnhold reduseres effektivt når ventilasjonen øker. Fukttransporten varierer tilnærmet proporsjonalt med luftas absolutte fuktinnhold. Det gjelder både luftlekkasjer og fukttransport ved diffusjon.

6.2.7 Fuktproduksjon (fukttilførsel)

Redusert fuktproduksjon (fukttilførsel) til innelufta gir også laver luftfuktighet og redusert risiko for oppfukning og muggvekst på samme måte som økt ventilasjon. Se figur 5.2.11.

6.2.8 Innetemperatur

Som figur 5.2.12 viser har innetemperaturen liten betydning for beregnet muggvekstpotensial for undertaket.

6.2.9 Uteklima

Variasjoner i uteklima har forholdsvis stor betydning for beregnet muggvekstpotensial. Det går fram av diagrammene i vedlegg 1 som viser beregningsresultater for samme huset plassert på forskjellige steder i Norge. Maksimalnivået for beregnet muggvekstpotensial er først og fremst bestemt av utetemperaturen.

6.3 Tak med kaldt, luftet loft

Tak med kaldt, luftet loft kan ha vesentlig større uttørkningsevne enn tak med ikke luftet loft. Det framgår av diagrammene i kapittel 5.3.

6.3.1 Vindhastighet

Det krever imidlertid en viss vindhastighet hvis det er åpninger til loftet bare på to motstående sider og begge er i samme høyde. Hvis gjennomsnittlig vindhastighet er over ca. 1 m/s er det i følge beregningene tilstrekkelig med åpninger med samlet areal tilsvarende ca. 5 mm

kontinuerlige spalteåpninger i hele bygningens lengde ved lo og le side. En kontinuerlig spalteåpning med bredde 5 mm gir et åpningsareal pr. løpemeter på 0,005 m²/m eller 0,5 dm²/m. På steder med lavere gjennomsnittlig vindhastighet, for eksempel i Karasjok som har en midlere vindhastighet på ca. 0,5 m/s, må åpningsarealet være noe større enn 0,5 dm²/m.

6.3.2 Høydeforskjell mellom åpningene

Hvis det er lufteråpninger både ved raft og møne, slik at det er en viss høydeforskjell mellom åpningene, vil det bli en del luftgjennomstrømning og uttørring også når det er vindstilt så lenge det er varmere inne på loftet enn ute.

6.3.3 Snøsmelting

For å hindre snøsmelting på takflaten er det i de fleste tilfeller nødvendig med større spalteåpninger enn 5 mm for tak med tekning av asfalt takbelegg eller takfolie direkte på taktro. Luftbehovet for å hindre skadelig snøsmelting og ising er ikke nærmere undersøkt her. For tak med opplekket tekning kan en få tilstrekkelig utlufting for å hindre snøsmelting ved å utnytte luftespalten mellom tekningen og undertaket uten å øke spalteåpningene inn til loftet.

6.3.4 Undertakets dampmotstand

Med luftet loft er det normalt ikke nødvendig med dampåpent undertak etter som fukttransporten ved luftstrømningen vanligvis er tilstrekkelig for å fjerne fukt fra loftet. Som det framgår av figurene 5.3.2 og 5.3.5 vil undertakets dampmotstand ha en viss betydning når luftgjennomstrømningen er liten, for eksempel ved lite vind.

6.3.5 Brannspredning

Som omtalt i kapitlene 2 og 3 er lufteråpninger under takutstikket og inn på loftet en mulig brannspredningsvei som en kan eliminere ved å bygge lukket, uluftet loft. Det er klart å anbefale framfor luftet loft for bygninger med flere boenheter. Risikoen for brannspredning kan imidlertid reduseres noe også for luftede loft. Forutsatt at luftåpningene ikke plasseres under takutstikket, men oppe på taksiden, minst 1,5 m fra yttervegg, kan en imidlertid forbedre uttørringsevnen noe og samtidig få tilfredsstillende motstand mot brannspredning [9].

6.3.6 Oppfukking i perioder

Gjennomstrømning av uteluft kan også tilføre fukt til loftet og undertaket i perioder. Det kan skje i klart vær når taket ikke utsettes for solstråling. Da vil temperaturen på taktekningen og på undertaket bli lavere enn utelufttemperaturen på grunn av netto varmestråling fra taket til omgivelsene (himmelen). Hvis temperaturen på undertaket blir lavere enn duggpunkttemperaturen vil det felles ut fukt fra utelufta som strømmer gjennom loftet i form av kondens på undertaket. Det er det samme som skjer når det dogger i graset og på flater som vender mot himmelen på klare netter. Ved for eksempel 80 % RF i utelufta er det nok med en temperatursenkning på ca. 3 °C for å få kondens på undertaket. I følge målinger Bygforsk har gjort på takelementer på et forsøkshus i Trondheim [25], og som er kort omtalt i kapittel 5.4.1, var målt temperatur under folietekningen mer enn 4 °C lavere enn utelufttemperaturen i ca. 10 % av tiden i løpet av ett år (1997). Et undertak vil ikke bli like raskt nedkjølt som tekningen, men tallene indikerer at loftet og undertaket kan få tilført fukt fra uteluften en betydelig del av året. Dette er det imidlertid ikke tatt hensyn til i våre beregninger. Undertaket vil få tilført fukt på tilsvarende måte også om loftet ikke er luftet, men i mindre grad ettersom det da bare er oversiden som blir utsatt for uteluft.

Referanser

- [1] Lisø, K.R., Kvande, T. (2004)
Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner – Program 2000 – 2006, Programbeskrivelse, Byggforsk-rapport O 10210-99, rev. 13.03.2004, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [2] Byggdetaljer 525.102 (1999)
Isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindsperre. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [3] Byggdetaljer 525.207 (2000)
Kompakte tak. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [4] Veiledning til TEK (2003)
Veiledning til Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven. Kommunal- og arbeidsdepartementet, Oslo
- [5] Byggdetaljer 525.106 (1997)
Skrå tretak med kaldt loft. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [6] Geving, S., Uvsløkk, S., (2000)
Moisture conditions in timber frame structures. Test house measurements for verification of heat-, air and moisture transfer models. Project report 273, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [7] Byggdetaljer 740.111 (1996)
Kondens på kalde overflater. Årsaker og tiltak. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [8] Byggdetaljer 525.107 (1997)
Skrå tretak med oppvarmet rom i deler av loftet. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [9] Byggdetaljer 720.311 (2002)
Brannteknisk utbedring av bygninger med kaldt loft. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [10] Byggdetaljer 524.305 (2002)
Skillevegg mellom rekkehusboliger. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [11] Byggdetaljer 525.101 (1996)
Isolerte skrå tretak med lufting under undertak. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [12] Byggdetaljer 525.108 (2002)
Brannsikring av bygninger med kaldt loft. Konstruktive løsninger. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [13] Byggdetaljer 573.121 (2003)
Materialer til luft og dampetting. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo

- [14] Nevander, L. E., Elmarsson, B. (1994)
Fukthandbok. Praktik och teori. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- [15] SPF Verksnorm 2500 (1991)
Vindskydd av duk, folie mm. Kvalitetsfordringar och provningsmetoder. Sveriges Plastförbund, Stockholm.
- [16] Wolleng, T. (1979)
VVS-tekniske klimadata for Norge. Håndbok 33, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [17] Uvsløkk, S. (1996)
The Importance of Wind Barriers for Insulated Timber Frame Constructions. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Volume 20 – July 1996, Technomic Publishing Co., Inc. Lancaster, Pennsylvania USA
- [18] Norlén, U., Andersson, K. (1993)
Bostadsbeståndets inneklimat. Forskningsrapport, Statens institut för bygnadsforskning, Gävle.
- [19] NS-EN ISO 13788 (2001)
Bygningskomponenters og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper. Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i bygningskomponenter eller bygningsdeler. Beregningsmetode. Standard Norge.
- [20] Geving, S., Thue, J.V. (2002)
Fukt i bygninger. Håndbok 50, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [21] NTI (1999)
Treteknisk Håndbok. Teknisk småskrift nr. 33, Norsk Tretknisk Institutt, Oslo
- [22] NS-EN ISO 6946 (1997)
Bygningskomponenter og – elementer. Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient. Beregningsmetode, Standard Norge, Oslo.
- [23] Viitanen, H., Ritschkoff, A-C.(1991)
Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Rapport 221, Sveriges lantbrukuniversitet, Skogsvetenskapliga fakulteten, Uppsala Sverige.
- [24] Mattsson, J., (2004)
Muggsopp i bygninger. Forekomst, påvisning, vurdering og utbedring. Mycoteam forlag, Oslo.
- [25] Geving, S., Uvsløkk, S., (2000)
Moisture conditions in timber frame structures. Test house measurements for verification of heat-, air and moisture transfer models. Project report 273, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [26] Byggdetaljer 472.411 (1991)
Solstrålingsdata for energi- og effektberegninger. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo
- [27] Byggdetaljer 525.002 (1996)
Takkonstruksjoner. Valg av konstruksjonstyper og materialer. *Byggforskserien*, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo

Vedlegg

- Vedlegg 1 Beregningsresultater for ni steder i Norge, kaldt ikke luftet loft
- Vedlegg 2 Uteklima
- Vedlegg 3 Beregning av ventilasjon og fukttilskudd
- Vedlegg 4 Sorpsjonskurve for treverk
- Vedlegg 5 Mellomberegninger, eksempler
- Vedlegg 6 Beregnet ekstra varmetap på grunn av luftgjennomstrømning i mellombjelkelaget i tak med luftet kneloft, A-takstoler

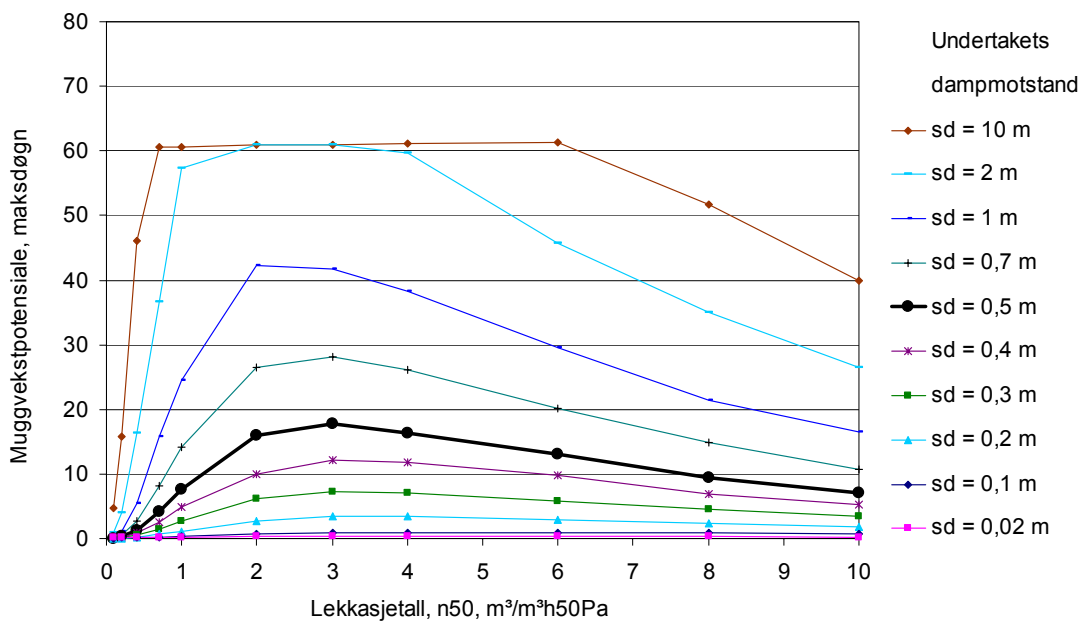
Vedlegg 1

Beregningsresultater for ni steder i Norge, kaldt ikke luftet loft

I dette vedlegget er det vist beregningsresultater med klima for 9 steder i landet. De øvrige inngangsverdiene er "normalverdier" og like for alle stedene. De er de samme som for figur 5.2.1. Klimadata, temperatur og RF ute, for de samme stedene er vist i vedlegg 2.

Beregnet muggvekstpotensial er vist for følgende steder:

Sted	Figur nr.
Oslo	V.1.1
Karasjok	V.1.2
Tromsø	V.1.3
Trondheim	V.1.4
Røros	V.1.5
Kristiansund N	V.1.6
Bergen	V.1.7
Lillehammer	V.1.8
Kristiansand S	V.1.9

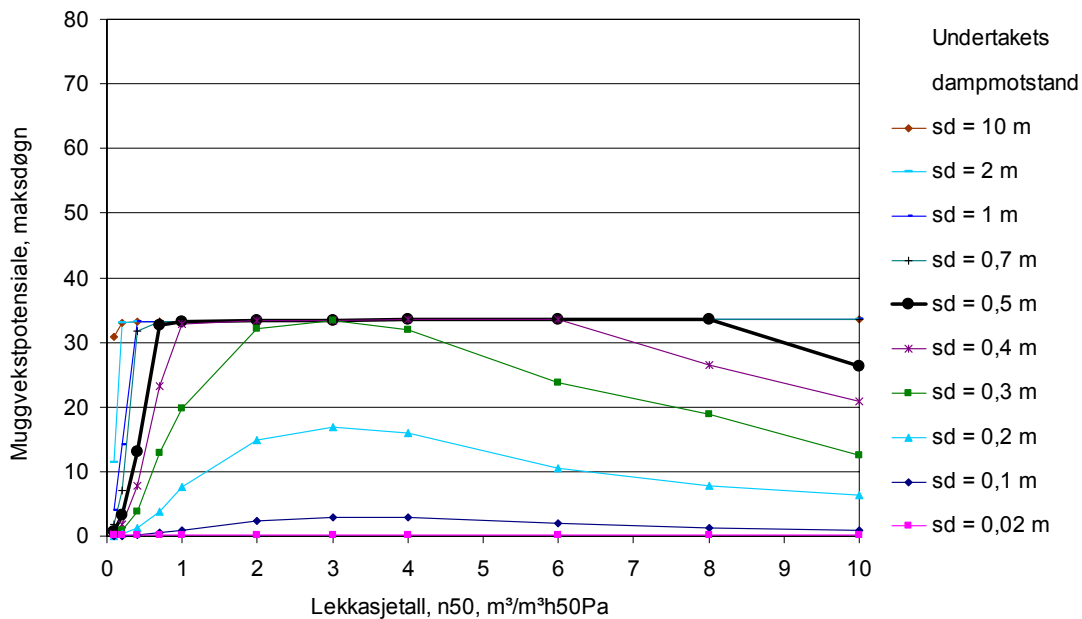


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur V.1.1

Oslo

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Oslo klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi. Det er vist én kurve for hver s_d-verdi for undertaket, se kurveidentifikasjon til høyre i diagrammet. De viktigste inngangsverdiene er gitt nederst i diagrammet. (Samme diagram som i figur 5.2.1, "normaltilfellet".)

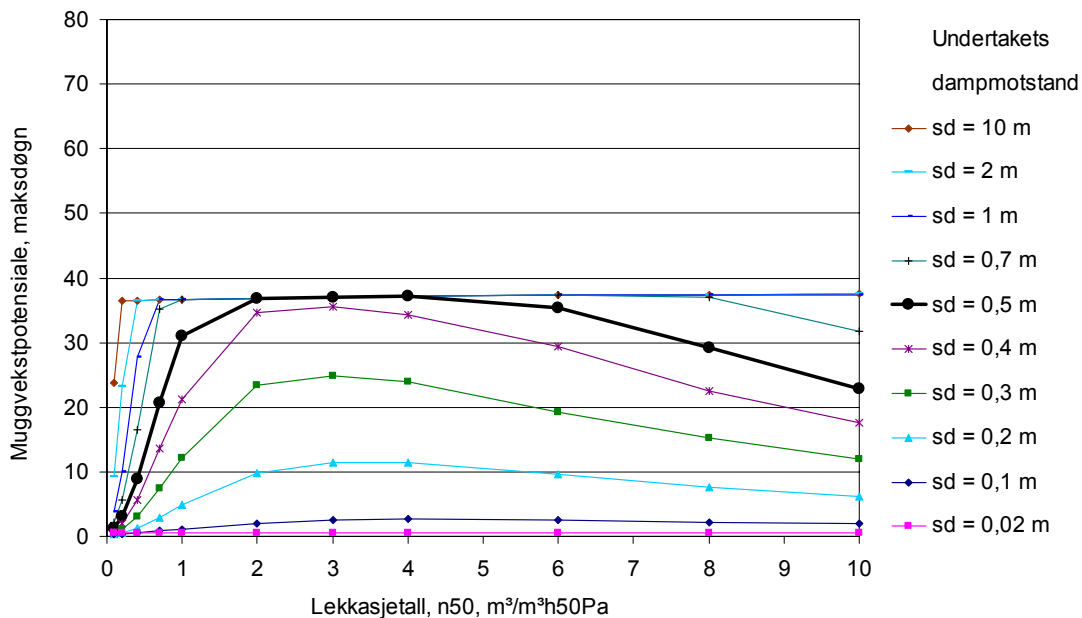


Karasjok, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur V.1.2

Karasjok

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Karasjok-klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi.

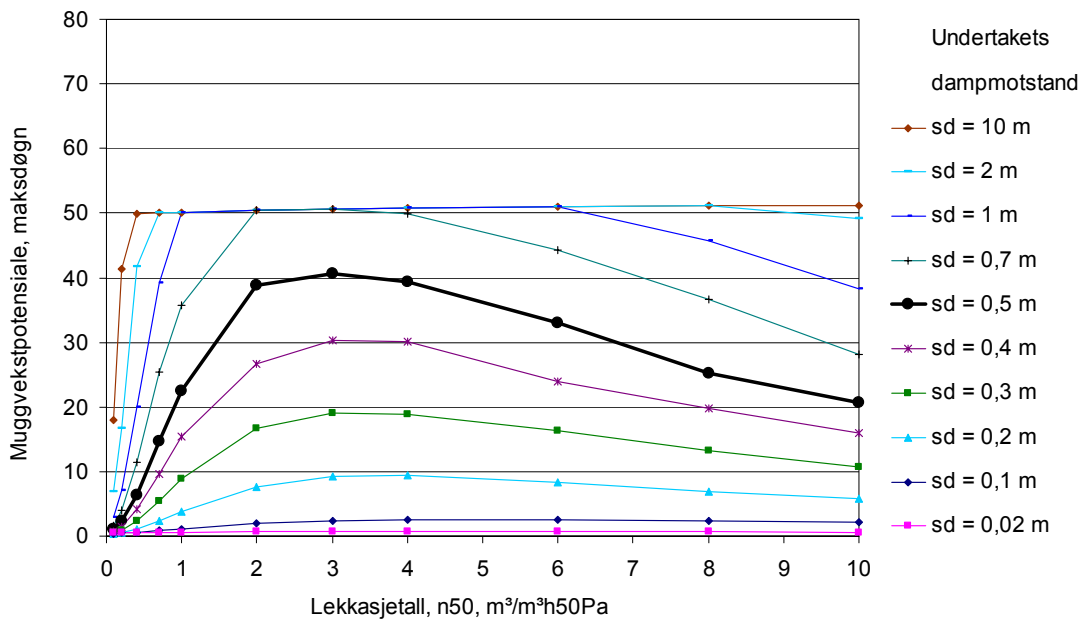


Tromsø, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur V.1.3

Tromsø

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Tromsø-klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi.

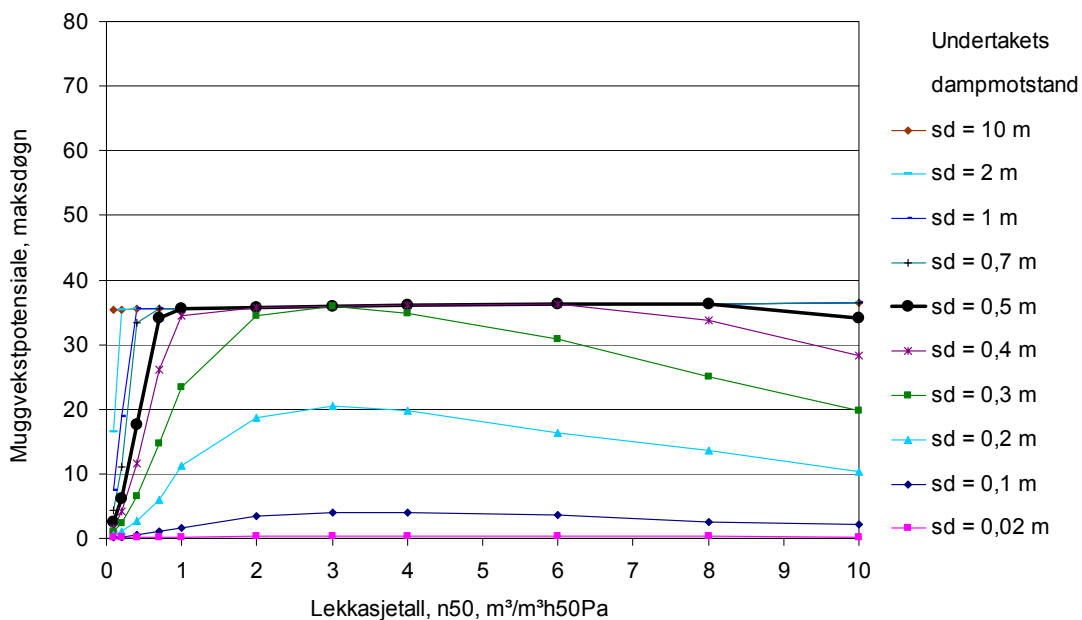


Trondheim, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur V.1.4

Trondheim

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Trondheims-klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi.

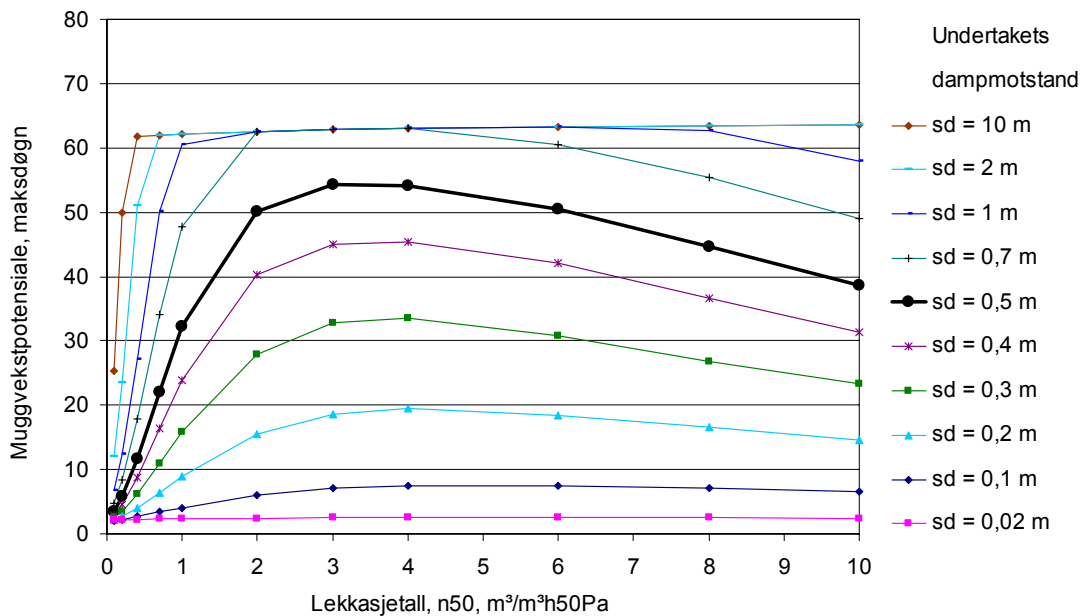


Røros, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur .V.1.5

Røros

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Røros-klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi.

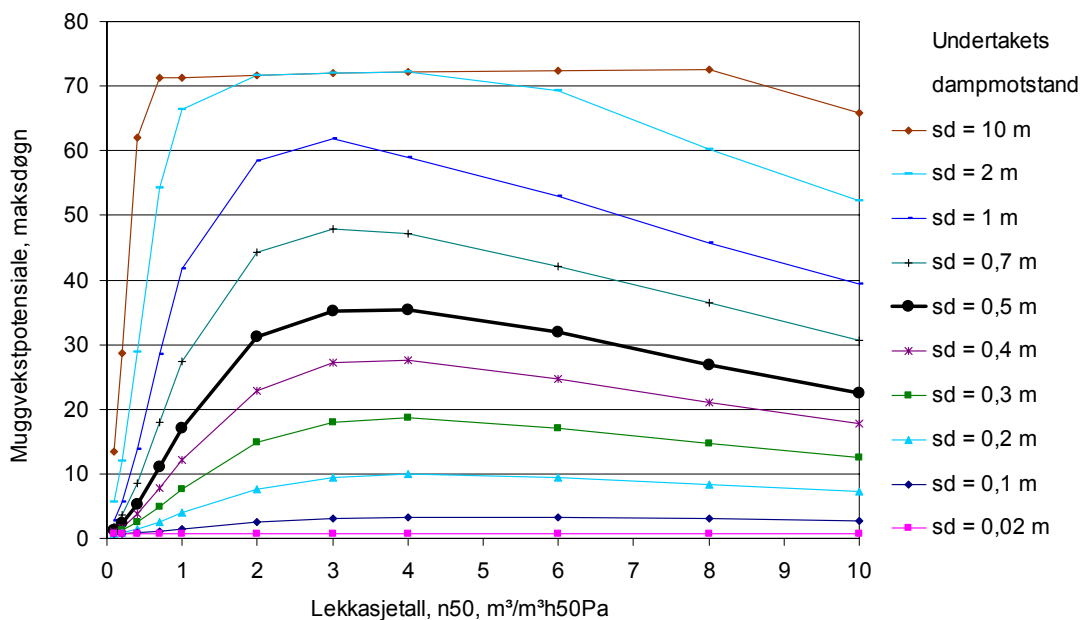


Kristiansund, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur V.1.6

Kristiansund-N

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Kristiansund-klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi.



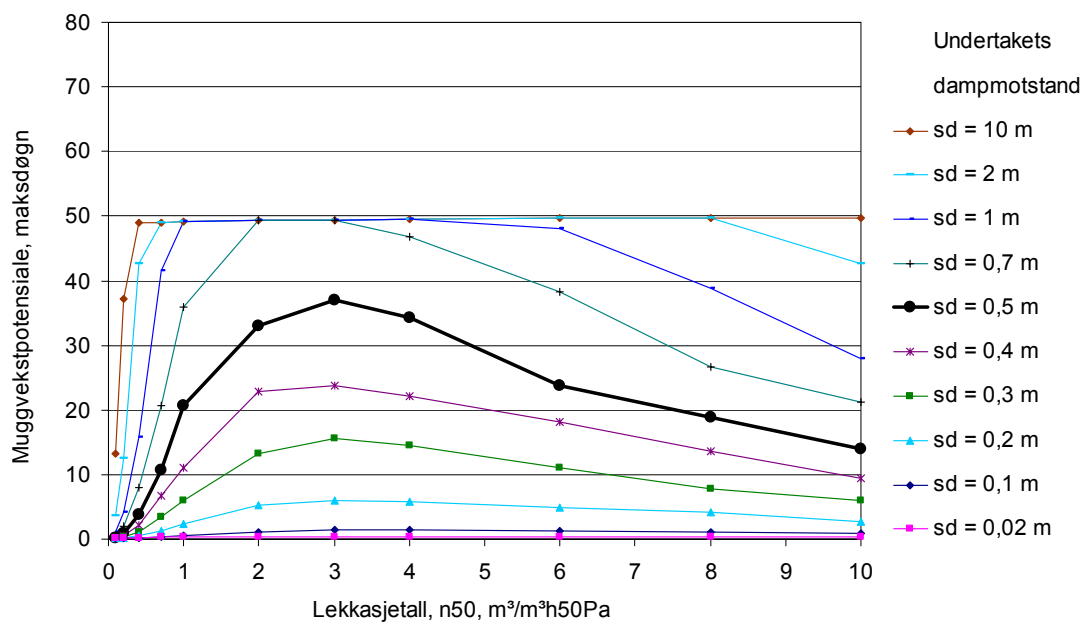
Bergen, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h)

Figur V.1.7

Bergen

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Bergens-klima varierer med husets lekkasjetall, n₅₀, og undertakets vanddampmotstand, s_d-verdi.

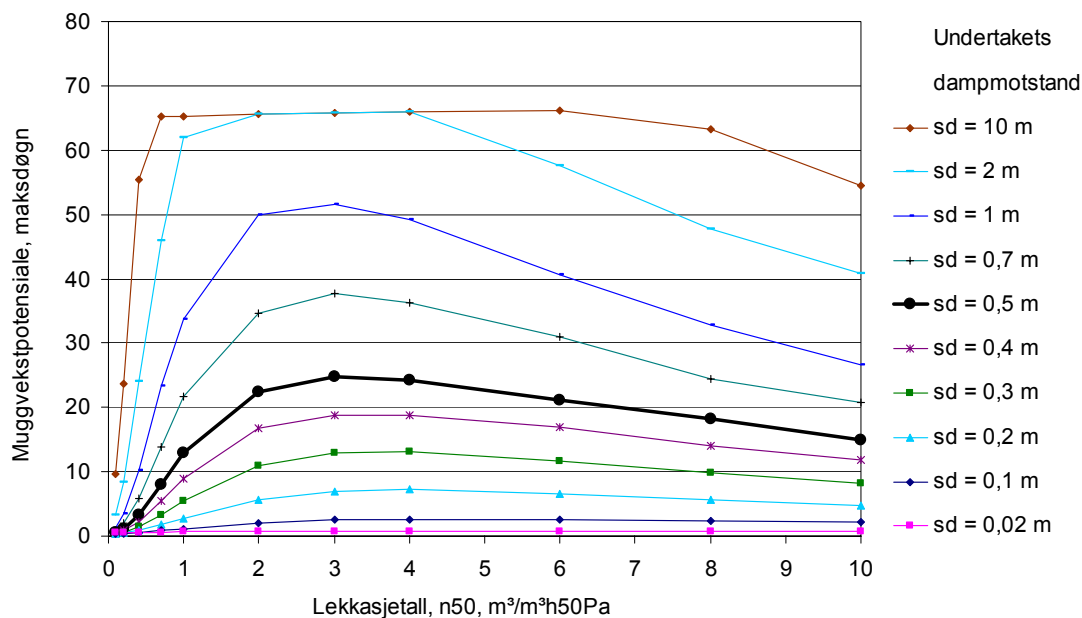
Tak med kaldt loft



Figur V.1.8

Lillehammer

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Lillehammer-klima varierer med husets lekkasjetall, n_{50} , og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi.



Figur V.1.9

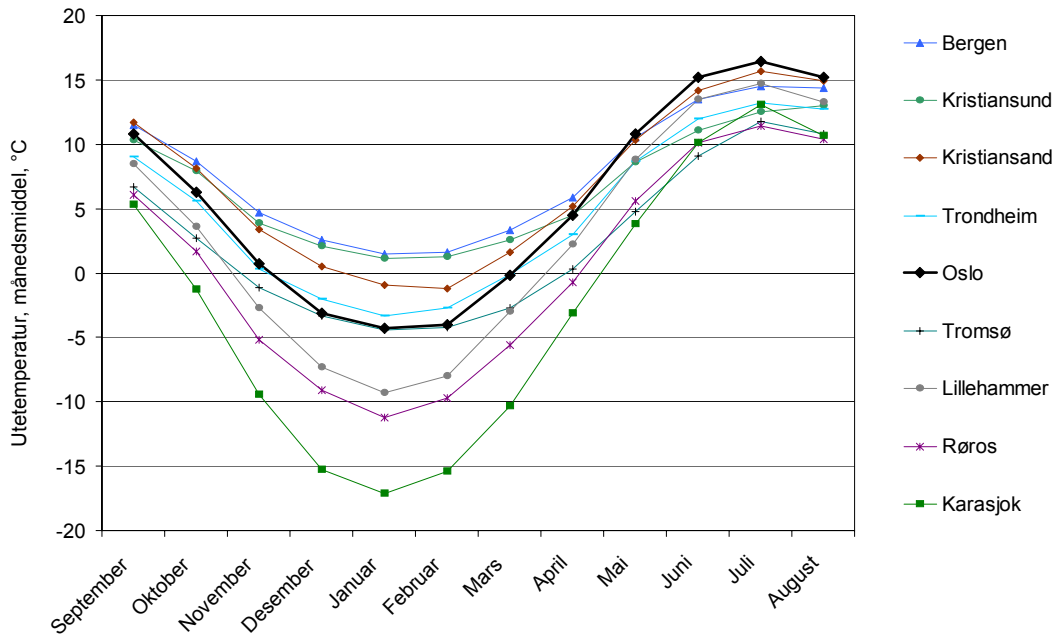
Kristiansand-S

Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekstpotensial for et undertak i et hus i Kristiansand-klima varierer med husets lekkasjetall, n_{50} , og undertakets vanddampmotstand, s_d -verdi.

Vedlegg 2

Uteklima

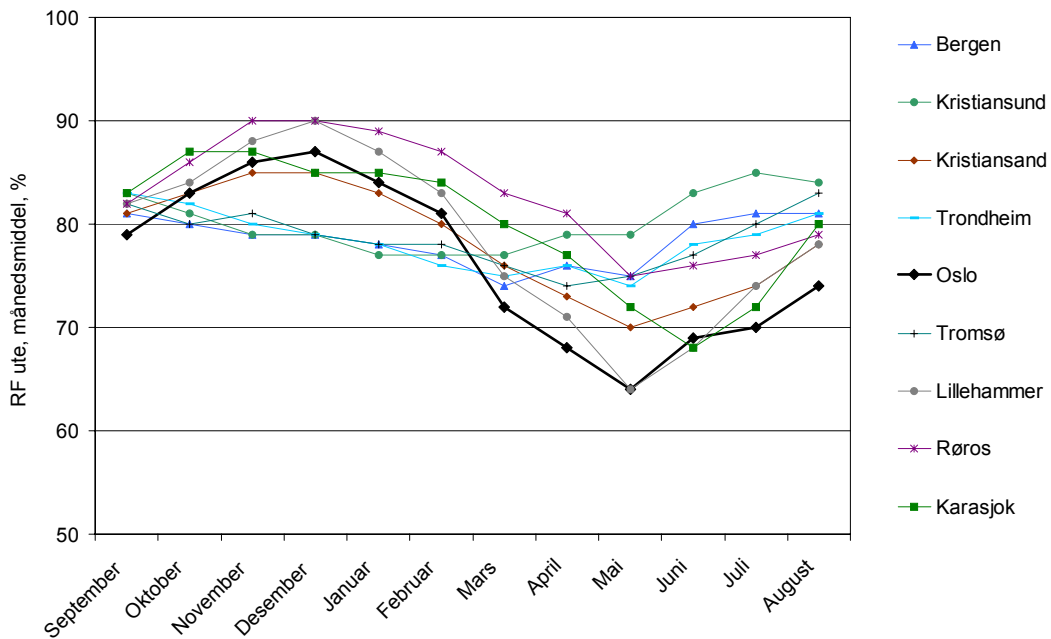
I dette vedlegget er det vist klimadata, månedsmidler for temperatur, RF og vindhastighet, for de ni stedene det er gjort beregninger for. Verdiene er hentet fra [16].



Figur V.2.1

Utetemperatur

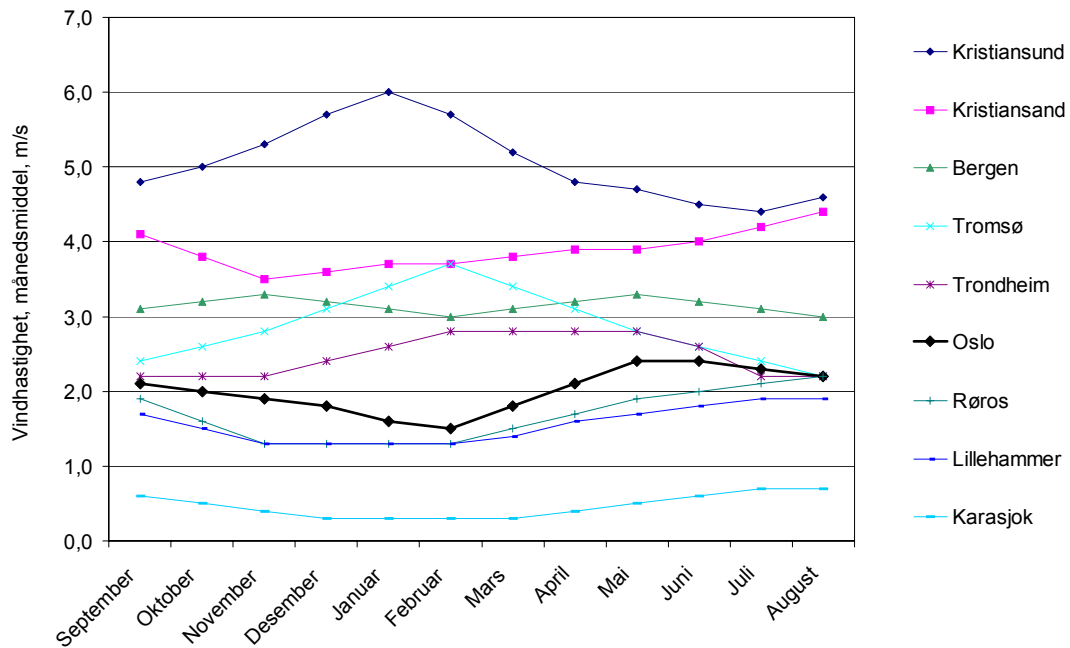
Diagrammet viser månedsmidler for de ni stedene det er gjort beregninger for. Verdiene er hentet fra [16].



Figur V.2.2

Relativ luftfuktighet, RF, ute

Diagrammet viser månedsmidler for de ni stedene det er gjort beregninger for. Verdiene er hentet fra [16].

**Figur V.2.3****Vindhastighet**

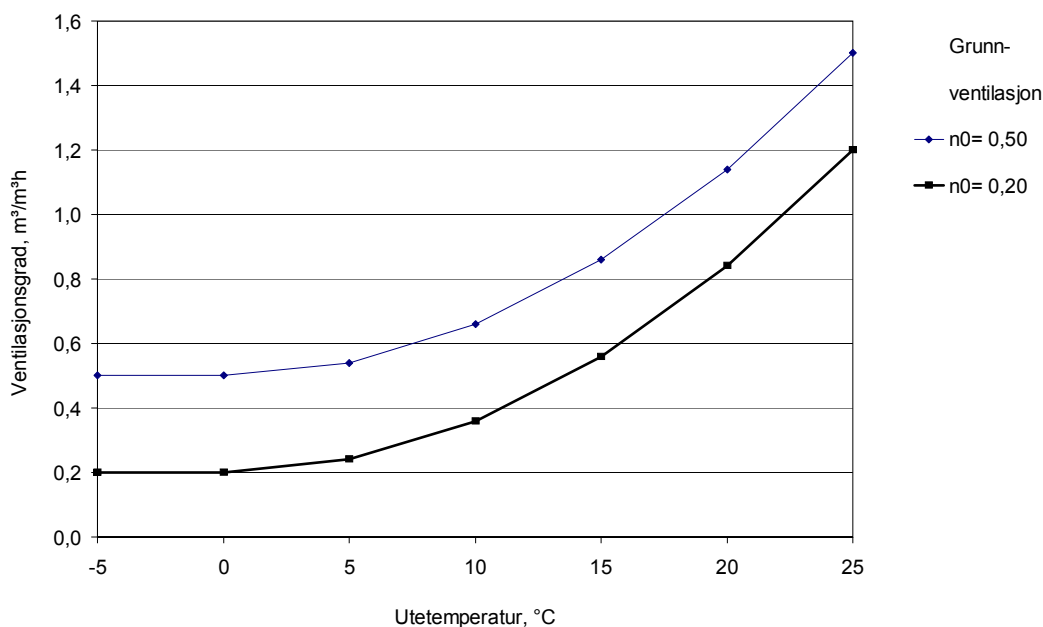
Diagrammet viser månedsmidler for de ni stedene det er gjort beregninger for. Verdiene er basert på månedsmiddel for månedene oktober, januar, april og juli fra [16]. Verdiene for mellomliggende måneder er bestemt ved interpolering. Vindhastighetene er basert på målinger 10 m over bakken.

Vedlegg 3

Beregning av ventilasjon og fuktilskudd

Som forklart i kapittel 4.2.2 består samlet ventilasjon av tre bidrag, grunnventilasjon, utetemperaturavhengig, ekstra ventilasjon og luftlekkasjer. Sammen med fuktproduksjonen er det samlet ventilasjon som bestemmer fuktilskuddet. Fuktilskuddet, som er forskjellen mellom absolutt fuktinnhold i inneluft og uteluft, blir brukt som et forenklet mål for innvendig fuktbelastning ved beregning av fuktforhold i bygningskonstruksjoner. Det blir blant annet brukt i NS-EN ISO 13788 som er en beregningsstandard for kontroll av faren for kondens inne i bygningskonstruksjoner [19]. Etter som vi i beregningsprogrammet "Takfukt" forsøker å beregne de ulike virkningene luftlekkasjene har på risikoen for muggvekst i taket kan vi ikke bruke fuktilskuddet i NS-EN ISO 13788 (figur V.3.3) direkte som inngangsverdi i beregningene. Gjennom å innføre et utetemperaturavhengig ekstra bidrag til samlet ventilasjon har vi imidlertid forsøkt å tilpasse våre beregninger til NS-EN ISO 13788.

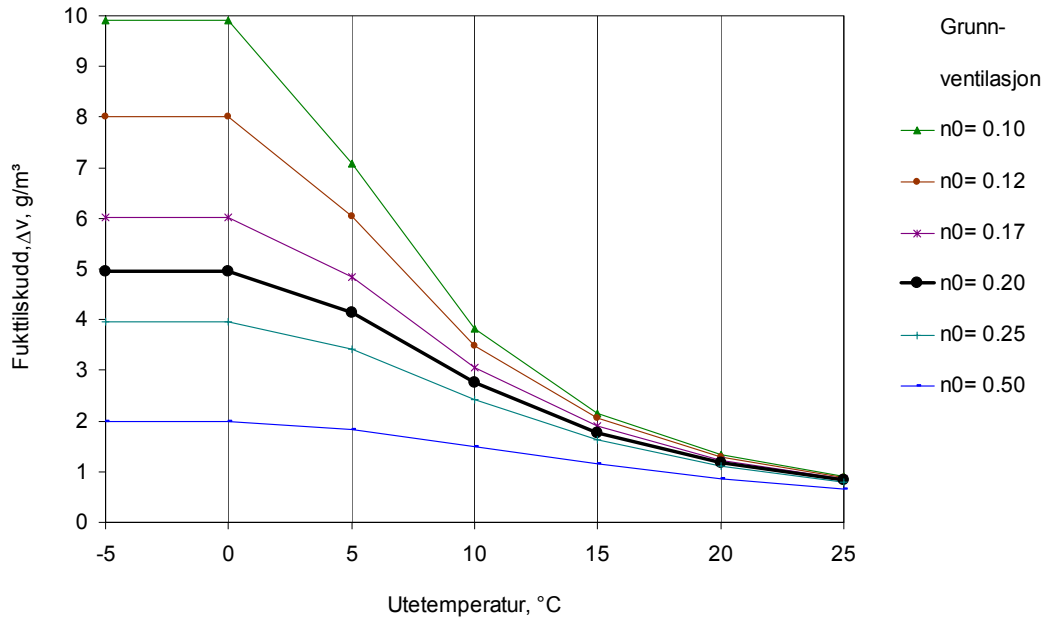
Figur V.3.1 viser hvordan ventilasjonen (eks. luftlekkasjer) varierer med utetemperaturen i beregningene. Figur V.3.2 viser hvordan fuktilskuddet varierer med utetemperatur og grunnventilasjon ved beregningene med programmet "Takfukt" når fuktproduksjonen er konstant. Figur V.3.3 viser til sammenligning hvordan fuktilskuddet varierer med utetemperaturen for forskjellige klasser (bygningstyper) etter NS-EN ISO 13788. Figuren er hentet fra [9]. Figur V.3.4 viser beregnet ventilasjon, luftlekkasje og fuktilskudd måned for måned når alle parameterne har "normalverdi", mens figur V.3.5 viser det samme uten ekstra, utetemperaturavhengig ventilasjon.



Figur V.3.1

Ventilasjon

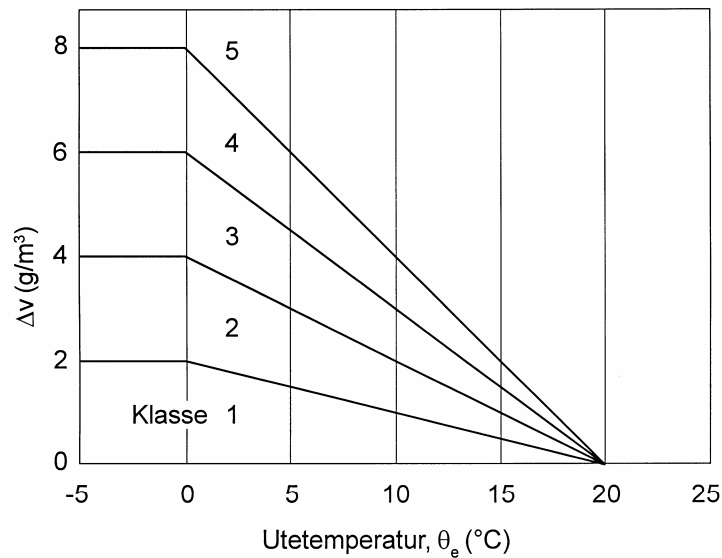
Diagrammet viser hvordan ventilasjonen, $n = n_0 + n_{\text{ekstra}}$, forutsettes å variere med utetemperaturen for to alternative verdier av grunnventilasjonen, n_0 . Den ekstra, utetemperaturavhengige ventilasjonen er gitt av uttrykket: $n_{\text{ekstra}} = 1,0 \times ((\theta_e - 25)/25)^2$, når utetemperaturen $\theta_e > 0$ °C.



Figur V.3.2

Fukttilskudd

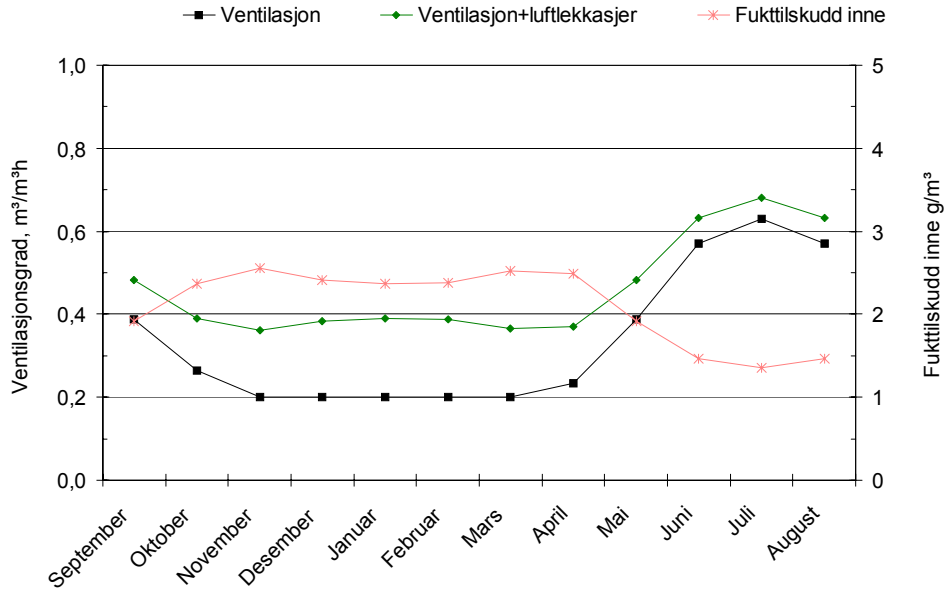
Diagrammet viser hvordan fukttilskuddet varierer med utetemperatur og grunnventilasjon, m^3/m^3h , ved beregningene med programmet "Takfukt" når fuktproduksjonen er konstant, 10 kg/døgn, og samlet golvareal er 150 m^2 .



Figur V.3.3

Fukttilskudd

Diagrammet viser, til sammenligning, hvordan fukttilskuddet forutsettes å variere med utetemperaturen for forskjellige klasser (bygningstyper) ved beregninger etter NS - EN ISO 13788. Figuren er hentet fra Byggforsk byggedetaljblad 471.111

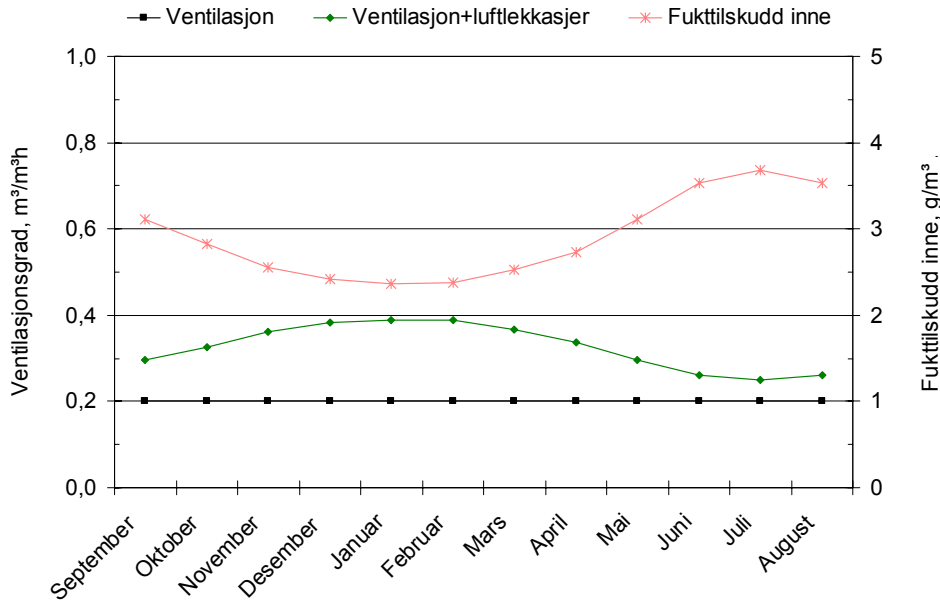


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m³h), muggvekstpot.: 16 maksdøgn

Figur V.3.4

Ventilasjon, luftlekkasjer og fukttilskudd

Diagrammet viser hvordan beregnet ventilasjon, ventilasjon + luftlekkasjer samt bygningens fukttilskudd varierer gjennom året når alle inngangsparametrene har sin valgte "normalverdi".



Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m³h), muggvekstpot.: 29 maksdøgn

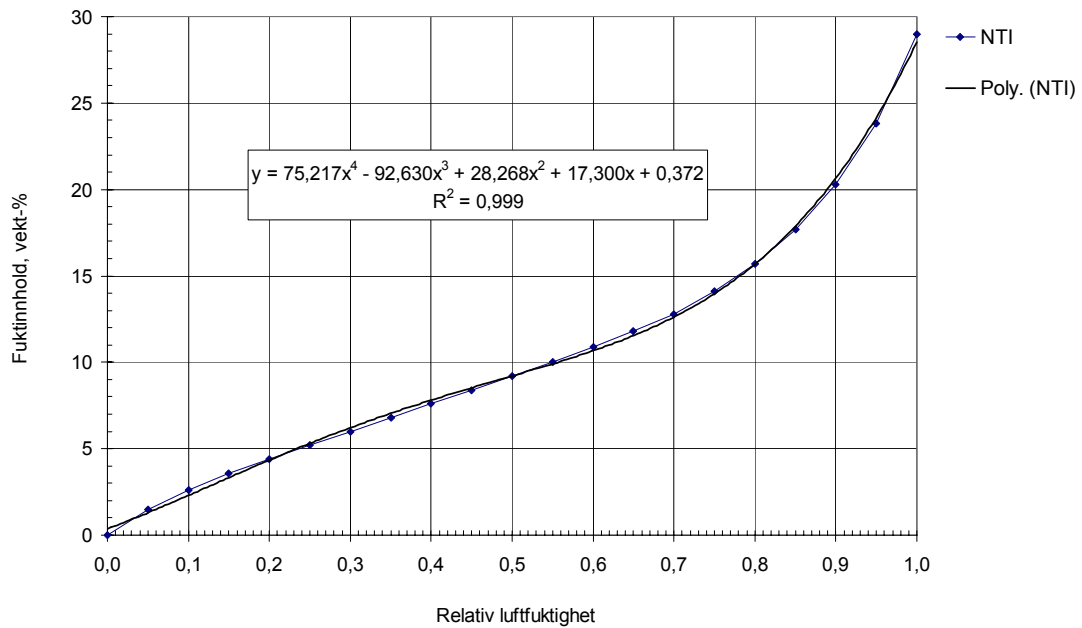
Figur V.3.5

Bare grunnventilasjon

Diagrammet viser hvordan fukttilskuddet ville vært uten ekstra, utetemperaturavhengig ventilasjon. Forøvrig samme inngangsverdier som for Figur V.3.4.

Vedlegg 4

Sorpsjonskurve for treverk



Figur V.4.1

Sorpsjonskurve for treverk

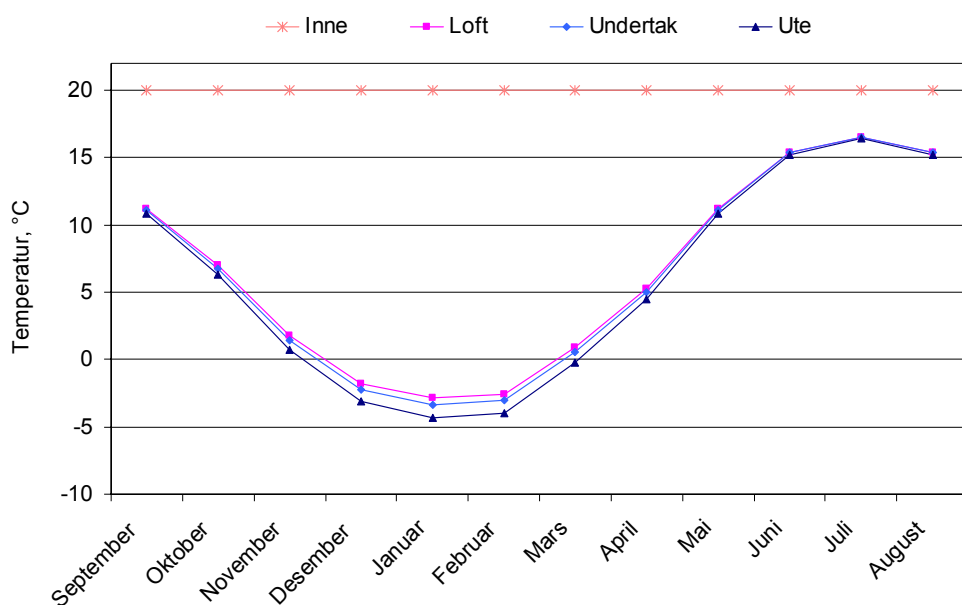
Kurven er basert på verdier fra Norsk Treteknisk Institutt, NTI [21]. I beregningene har vi brukt formelen, et 4. grads polynom, som er gitt i diagrammet. Virkningen av hysteresis på grunn av forskjellig likevektsfuktighet ved adsorpsjon og desorpsjon er neglisjert.

Vedlegg 5

Eksempler på hvordan fuktforhold, temperatur og muggvekst varierer over året

I dette vedlegget er det vist eksempler på hvordan beregnet temperatur, fuktforhold og muggvekstpotensial varierer måned for måned gjennom et år. Alle inngangsverdiene har sin "normalverdi" som i figur 5.2.1.

Alle diagrammene viser resultater fra nødvendige mellomberegninger for å bestemme ett punkt på én av kurvene i figur 5.2.1. Punktet finnes på kurven for undertak med s_d -verdi = 0,5 m når bygningens lekkasjetall $n_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ ved 50 Pa. Beregnet soppvekstpotensial for hele året er 16 maksdøgn. Se kapittel 4.6. Se også figur V.3.4 som viser ventilasjonsforhold og fukttilskudd for dette "normal tilfellet".



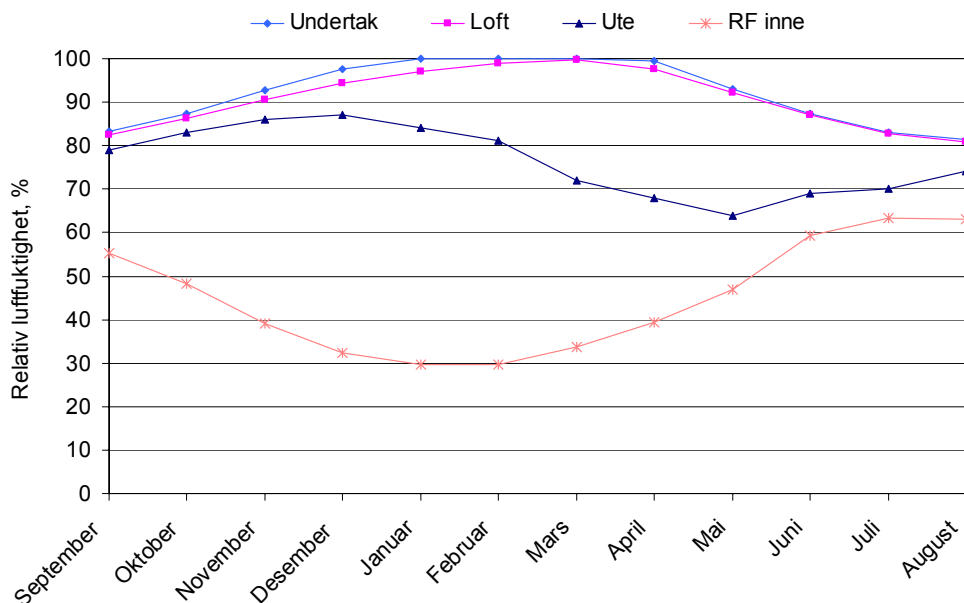
Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m³h50Pa), s_d -verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m³h), muggvekstpot.: 16 maksdøgn

Figur V.5.1

Temperaturer

Diagrammet viser hvordan ute- og innetemperatur samt beregnede temperaturer på undersiden av undertaket (taktroen) og inne på loftet varierer over året. Temperaturene er månedsmidler.

Tak med kaldt loft

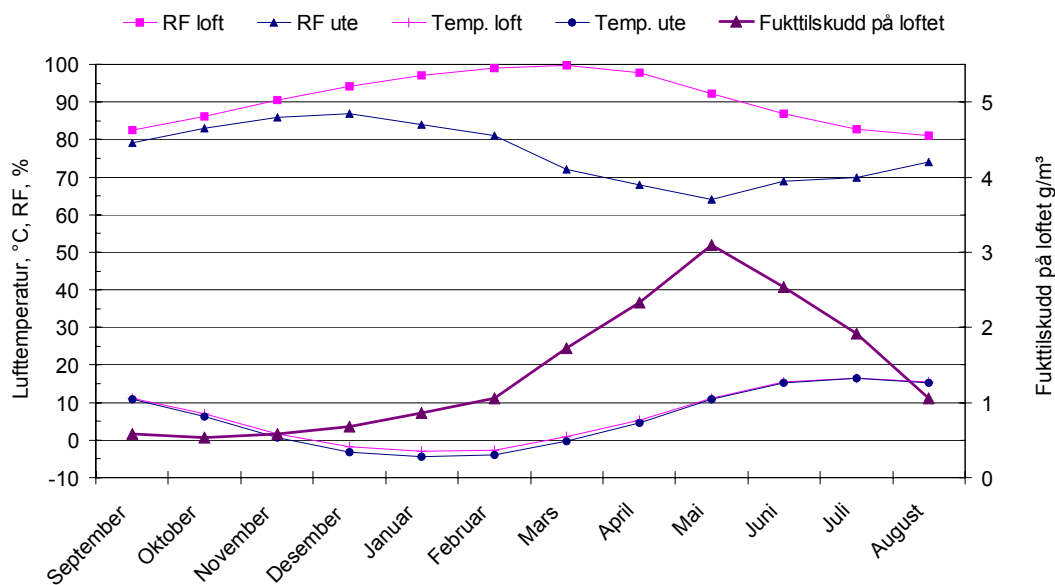


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), muggvekstpot.: 16 maksdøgn

Figur V.5.2

Relativ luftfuktighet, RF

Diagrammet viser hvordan beregnet RF på undersiden av undertaket (taktroen), RF i luften inne på loftet samt RF ute og inne varierer over året.



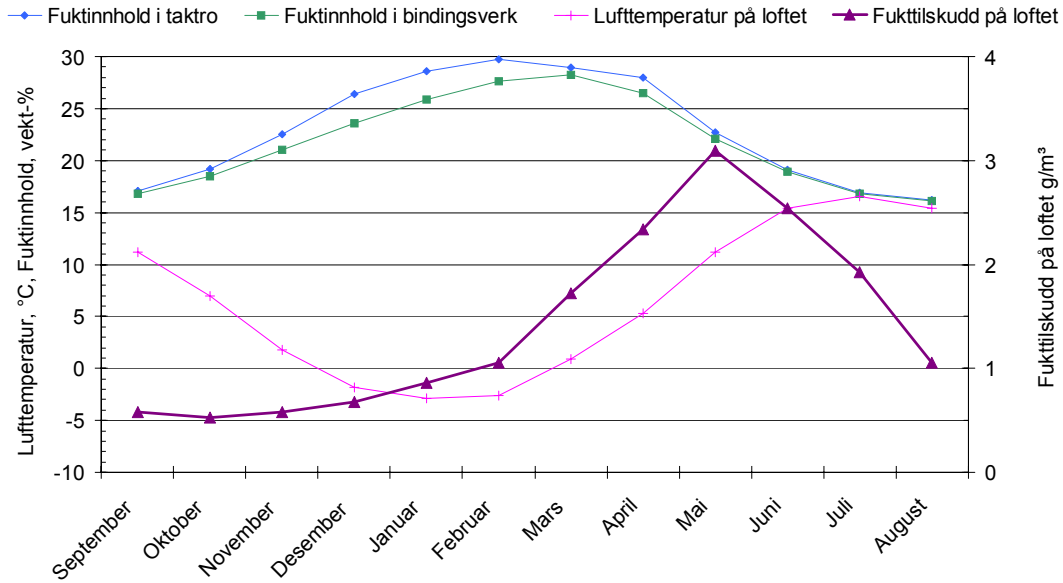
Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), muggvekstpot.: 16 maksdøgn

Figur V.5.3

Fuktforhold på loftet

Diagrammet viser beregnede temperatur- og fuktforhold samt fuktilskudd på loftet.

Tak med kaldt loft

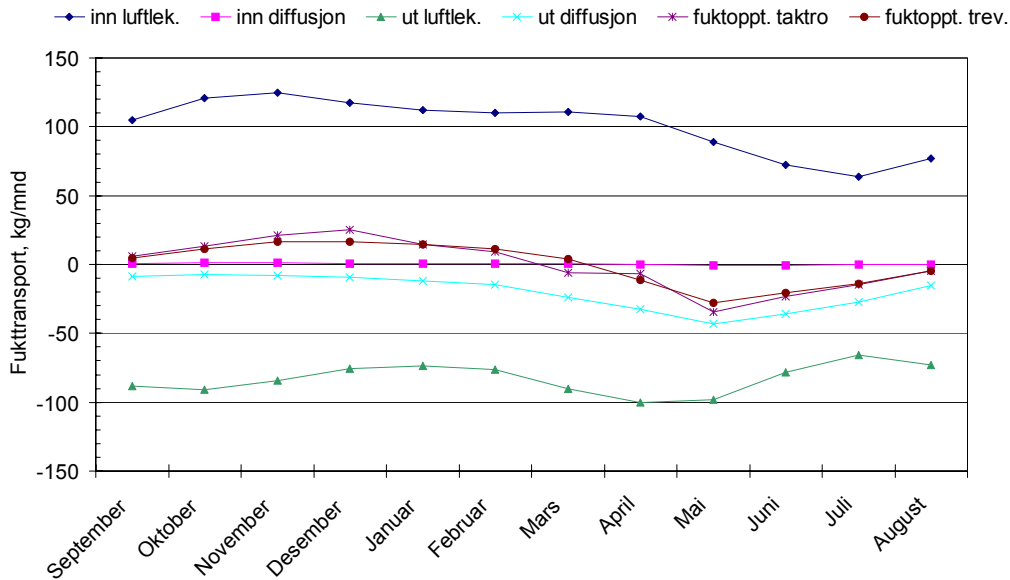


Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m³h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m³h), muggvekstpot.: 16 maksdøgn

Figur V.5.4

Fuktinnhold i treverk

Diagrammet viser hvordan beregnet fuktinnhold i taktro og bindingsverk varierer over året.



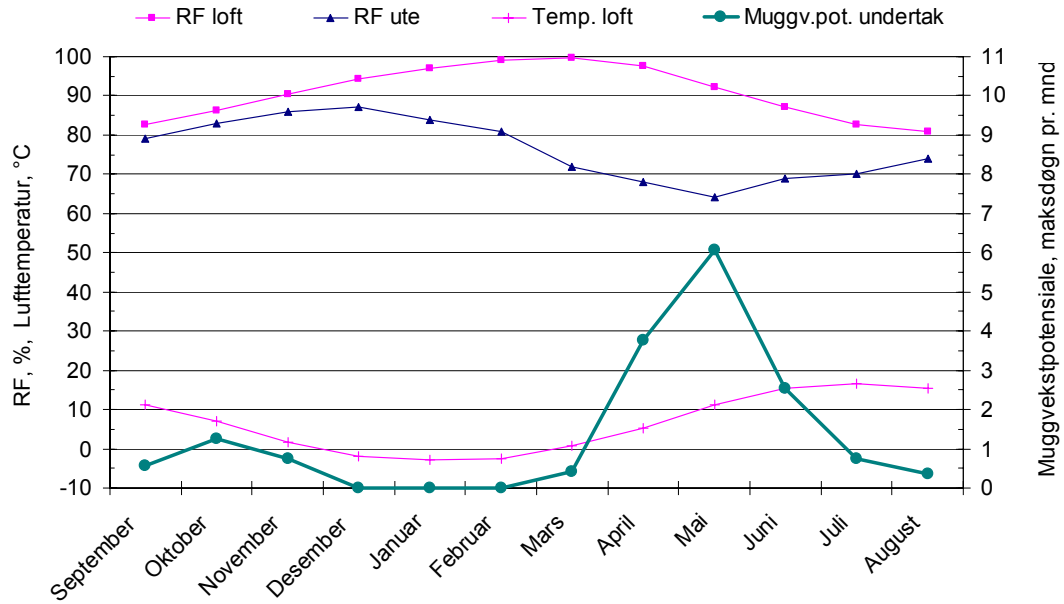
Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m³h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m³h), muggvekstpot.: 16 maksdøgn

Figur V.5.5

Fukttransport til og fra loftet

Diagrammet viser beregnet fukttransport fordelt på ulike transportmekanismer for "normaltilfellet".

Tak med kaldt loft



Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², lekkasjetall: 4 m³/(m²h50Pa), sd-verdi undertak: 0,5 m, fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m²h), muggvekspot.: 16 maksdøgn

Figur V.5.6

Muggvekspotensial

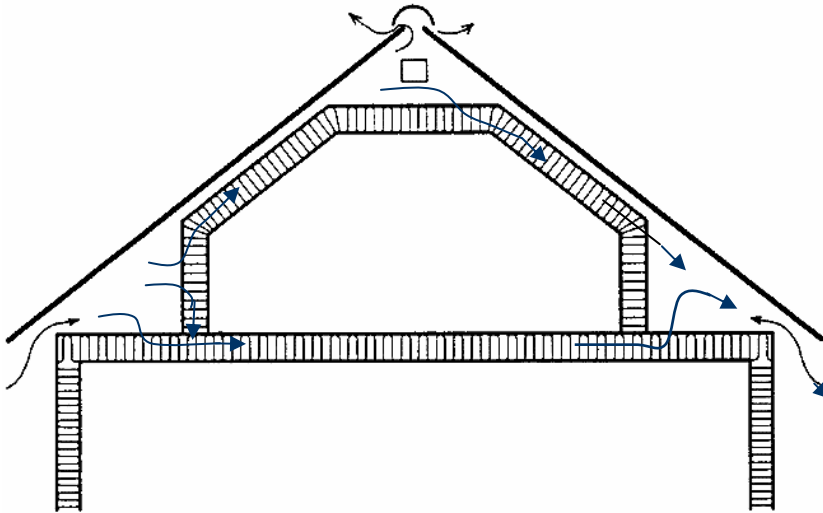
Diagrammet viser hvordan beregnet muggvekspotensial på undersiden av undertaket (taktroen) varierer over året. Det er størst vekst i april – mai når temperaturen stiger. Veksten avtar utover sommeren etter hvert som taktroen tørker. Om vinteren er det minimal vekst fordi temperaturen er for lav.

Vedlegg 6

Tak med loftrumstakstoler og kneloft - beregnet varmetap på grunn av luftgjennomstrømming i mellombjelkelag.

Luftet, åpent kneloft

I hus med loftrumstakstoler (A-takstoler) og luftede kneloft er det en stor fare for at kald uteluft blåser fra kneloft til kneloft gjennom mellombjelkelaget i perioder med vind. Se figur V.6.1. Det medfører ekstra varmetap og kalde golv på loftet. Luftgjennomstrømmingen skyldes at vindsperresjiktet på kneloftet oftest er mangelfullt og utett. Når takisolasjonen ligger i mange forskjellige flater som golv, knevegg, skråtak og hanebjelkelag blir det vanskelig og arbeidskrevende å få til et tett og kontinuerlig vindsperresjikt langs hele den kalde siden av isolasjonen. Alle overgurtene, kneveggstavene og undergurtene vil måtte gå igjennom vindsperresjiktet. På små kneloft vil det i tillegg gjerne være så trangt at det er vanskelig å komme til for å utføre gode skjøter og tette avslutninger mot gurter og staver.



Figur V.6.1

Strømningsmønster fra kneloft på lo side via mellombjelkelag og takisolasjon til kneloft på le side.

Når det blåser mot en bygning blir det et overtrykk på lo side av huset og et undertrykk på le side. Med tradisjonell lufting av kneloftene med spalteåpninger mot det fri under raftutstikkene blir det også en trykkforskjell mellom de to kneloftene når vinden blåser mot en av bygningens langsider. Denne trykkforskjellen fører til at det strømmer uteluft, ikke bare gjennom luftespalten i taket, men også inn gjennom de mange utetthetene i vindsperresjiktene på kneloftet og videre via isolasjonssjiktene i golv og knevegg og til mellombjelkelaget. Hvis mellombjelkelaget er bare delvis fylt med isolasjon vil det meste av denne kalde luften strømme i luftspalten over isolasjonen i mellombjelkelaget og kjøle ned golvet over. Hvis hele mellombjelkelaget fylles med isolasjon vil strømningsmotstanden øke og luftgjennomstrømmingen reduseres og fordeles jevnere i bjelkelaget.

På tilsvarende måte vil det også strømme luft fra kneloftet på lo side gjennom isolasjonssjiktene i skråtaket og ut igjen til kneloftet på le side.

Kaldt, ikke luftet kneloft

Ved å legge hele vindspærren på utsiden av takstolene er det mye enklere å få til et kontinuerlig og tett vindspærresjikt og dermed hindre at kaldluft blåser gjennom isolasjonssjiktene i taket. Aller best vindtetthet får en hvis takstolene stopper ved ytterkant vegg slik at vindspærresjiktet kan føres ubrutt forbi gurtene og avsluttes mot vindspærren i ytterveggene med et klemt omlegg. Det må da settes på ”løse” takutstikk som holdes fast ved hjelp av påføring på oversiden av overgurtene. På tak som skal ha tekking på lekter som f. eks. takstein bør en bruke kombinert undertak og vindspærre i stedet for en vanlig vindspærre. Det forenkler takoppbyggingen ved at det blir ett tettesjikt mindre og taket får et vindspærresjikt som også er regn- og vanntett. For at taket skal få uttørkingsevne er det viktig at undertaket er dampåpent og at sløyfene er høye nok til å gi god luftgjennomstrømning forbi steinlektene. Det blir på samme måte som for andre tak med kombinert undertak og vindspærre og all lufting i ett sjikt under tekningen. All takisolasjon bør legges i skråtaket.

Ekstra varmetap på grunn av luftstrømning gjennom mellombjelkelag.

I diagrammene V6.2-4 har vi vist eksempler på hvor stort varmetap luftstrømning gjennom mellombjelkelag kan medføre. Diagrammene viser også hvordan dette varmetapet kan reduseres ved noen alternative løsninger. Beregningene er gjennomført ved hjelp av et regnearkbasert beregningsprogram vi har utviklet. Vindsperrer og isolasjonssjikt er modellert som et nettverk av seriekoblede og parallellkoblede strømningsmotstander. De enkelte strømningsmotstandene representerer en del av vindspærren eller en del av isolasjonen i de enkelte bygningsdelene. Strømningsmotstanden til en del er bestemt av geometrien til komponenten og strømningssegenskapene til de aktuelle materialene. Kneveggen og kneloftsgolvet er delt opp i mange deler for å få tilstrekkelig beregningsnøyaktighet.

Vindtrykkforskjell mellom kneloftene

Trykkforskjellen mellom lo- og le kneloft vil være bestemt av flere forhold som vindhastighet, vindretning, husform og hvordan samlet strømningsmotstand gjennom luftespaltesystemet i taket er fordelt. I beregningene som er vist her har vi forutsatt en midlere forskjell på 0,5 mellom vindtrykkfaktorene utvendig for spalteåpningene på bygningen som forklart i kapittel 4.2.2. Dette er en middelvei for alle vindretninger. Midlere forskjell mellom vindtrykkfaktorene på de to kneloftene har vi satt til 0,3. Det forutsetter at det er litt mindre trykktap mellom ute og kneloft enn mellom kneloft og hanebjelkeloft eller møne. Det stemmer omtrent for tak hvor spalteåpningene ved raft har omtrent like stort samlet tverrsnittsareal som luftespalten i skråtaket. Hvis åpningene ved raft er større enn i skråtaket vil forskjellen mellom vindtrykkfaktorene på kneloftene bli større enn 0,3 og gi tilsvarende større varmetap. I perioder med vindretning mot en av langsiden vil vindtrykkforskjellen bli opptil dobbelt så stor.

Inngangsverdier ved beregningene

De viktigste inngangsparametrene er listet opp i tabell V.6 nedenfor. I beregningsprogrammet kan verdiene varieres fritt, men for de viste diagrammene har de fleste parametrene hatt en fast verdi som er gitt i kolonnen til høyre i tabellen.

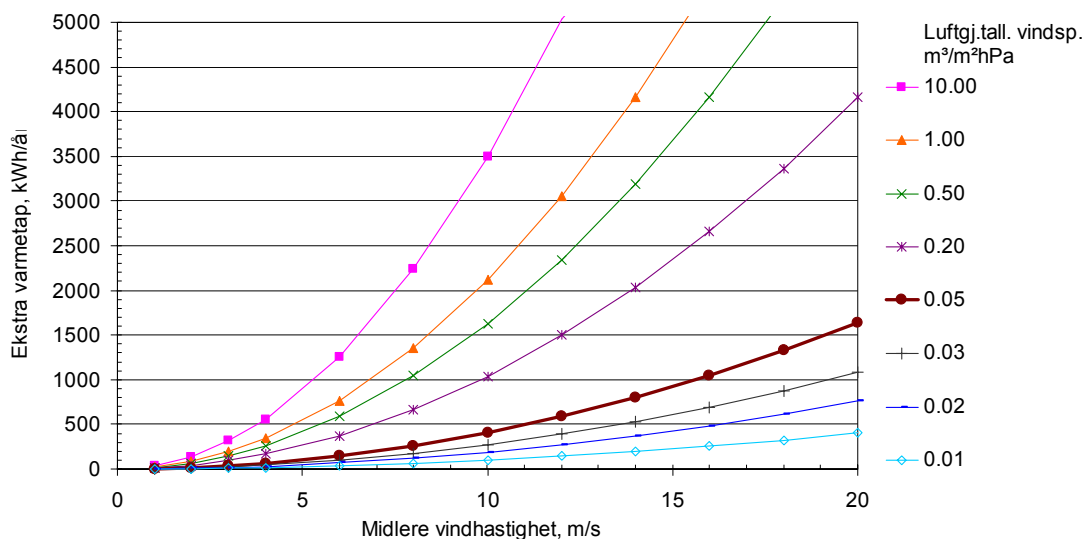
Tabell V.6

Oversikt over de viktigste inngangsparametrene med "normalverdier" i kolonnen lengst til høyre. "Normalverdien" er verdien som parameteren har hatt når den ikke er variert.

Parameter	"Normalverdi"	enhet
Bygningens bredde	8	m
Bygningens lengde	12	m
Takvinkel	35	°
Innvendig knevegghøyde	1,2	m
Bjelkehøyde i mellombjelkelaget	0,200	m
Isolasjonstykkelse i mellombjelkelaget	variert	m
Isolasjonstykkelse i kneloftsgolvne	0,200	m
Isolasjonstykkelse i kneveggene	0,200	m
Isolasjonens luftpermeabilitet, på tvers	2×10^{-9}	m^2
Isolasjonens luftpermeabilitet, på langs	4×10^{-9}	m^2
Vindsperresjiktets luftgjennomgangstall	variert	m^3/m^2hPa
Vind/lufttetting på tvers i mellombjelkelaget	ingen	
Vindhastighet	variert	m/s
Forskjell i vindtrykkfaktor mellom lo- og le kneloft	0,3	-
Klima, graddagstall (Trondheim)	4000	°C x døgn

Beregningsresultater

En del beregningsresultater er vist i form av diagrammer i figurene V.6.2 – V.6.5 De

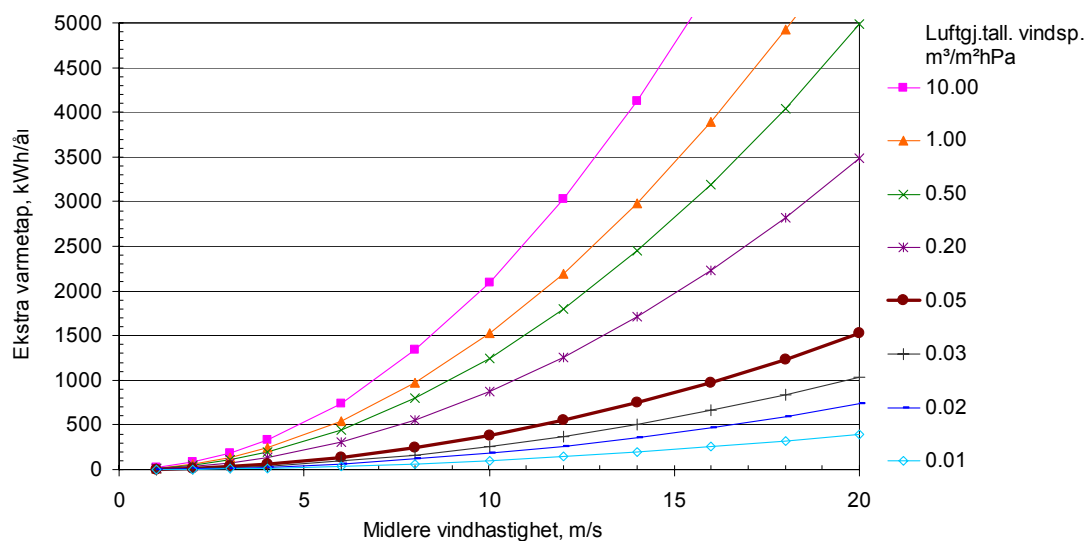


Husbredde: 8 m, takvinkel: 35°, knevegghøyde: 1.2 m, golvareal på oppvarmet loft: 49.5 m^2 , stedets graddagstall: 4000 °C*døgn, vindtrykkfaktor, forskjell mellom lo og le kneloft: 0.3, mellombjelkelag med 0.15 m isolasjon og 0.05 m luftspalte over

Figur V.6.2

Tradisjonelt A-takstoltak med kalde luftede kneloft og mellombjelkelag bare delvis fylt med isolasjon. Diagrammet viser beregnet ekstra årlig varmetap på grunn av luftstrøm fra kneloft til kneloft via mellombjelkelaget. Det er vist verdier for ulike kombinasjoner av vindhastighet og midlere luftgjennomgangstall for vindsperresjiktene på kneloftet. De viktigste inngangsverdiene er gitt under diagrammet, mens de øvrige er gitt i Tabell V.6.

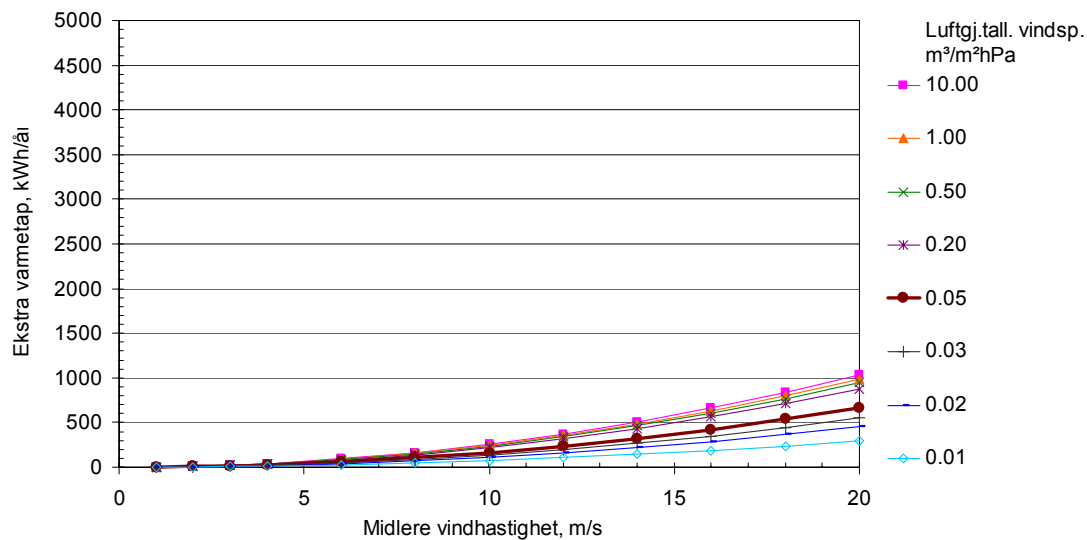
Tak med kaldt loft



Husbredde: 8 m, takvinkel: 35°, knevegghøyde: 1.2 m, golvareal på oppvarmet loft: 49.5 m², stedets graddagstall: 4000 °C*døgn, vindtrykkfaktor, forskjell mellom lo og le kneloft: 0.3, mellombjelkelag med 0.195 m isolasjon og 0.005 m luftspalte over

Figur V.6.3

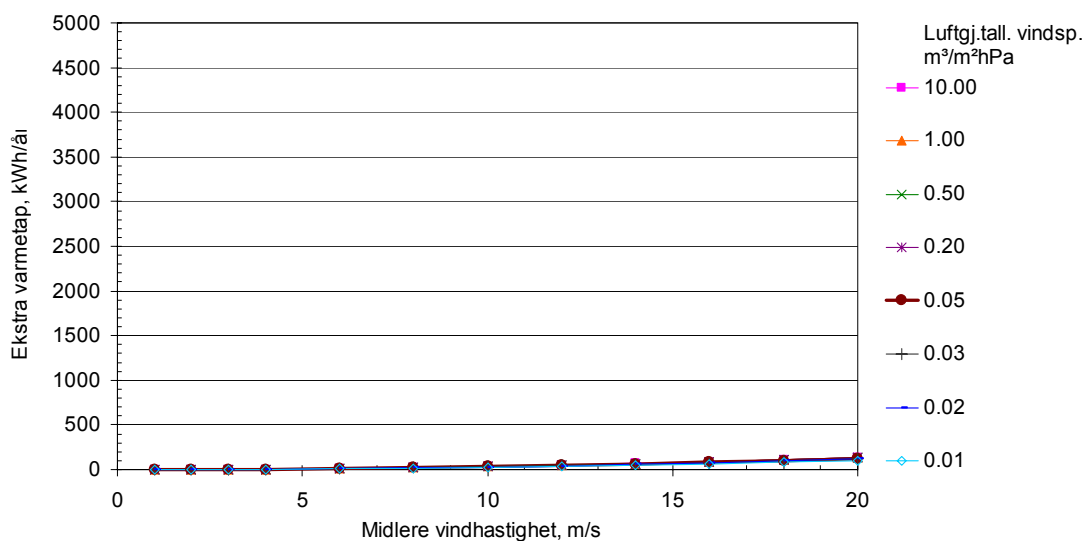
Samme bygning og betingelser som for figur V.6.1, men her er mellombjelkelaget nesten fylt med isolasjon og luftespalten over isolasjonen er bare 5 mm tykk.



Husbredde: 8 m, takvinkel: 35°, knevegghøyde: 1.2 m, golvareal på oppvarmet loft: 49.5 m², stedets graddagstall: 4000 °C*døgn, vindtrykkfaktor, forskjell mellom lo og le kneloft: 0.3, mellombjelkelag med 0.2 m isolasjon og 0 m luftspalte over

Figur V.6.4

Samme bygning og betingelser som for figur V.6.1, men her er mellombjelkelaget helt fylt med isolasjon og det er ingen luftspalte over isolasjonen.



Husbredde: 8 m, takvinkel: 35°, knevegghøyde: 1.2 m, golvareal på oppvarmet loft: 49.5 m², stedets graddagstall: 4000 °C*døgn, vindtrykkfaktor, forskjell mellom lo og le kneloft: 0.3, mellombjelkelag med 0.15 m isolasjon og 0.05 m luftspalte over

Figur V.6.5

Samme bygning og betingelser som for figur V.6.1, men her er mellombjelkelaget stengt for luftgjennomstrømning ved hjelp av kubbing, dampsperre, eller et ekstra vindsperrsjikt rett ned for kneveggen. I beregningene er det forutsatt at dette tettesjiktet har et luftgjennomgangstall på 0,05 m³/m²hPa som er det samme som anbefalt øvre grense for vindsperrsjikt for utvendig beskyttelse av vareisolasjon i vegger og tak.

Kommentarer

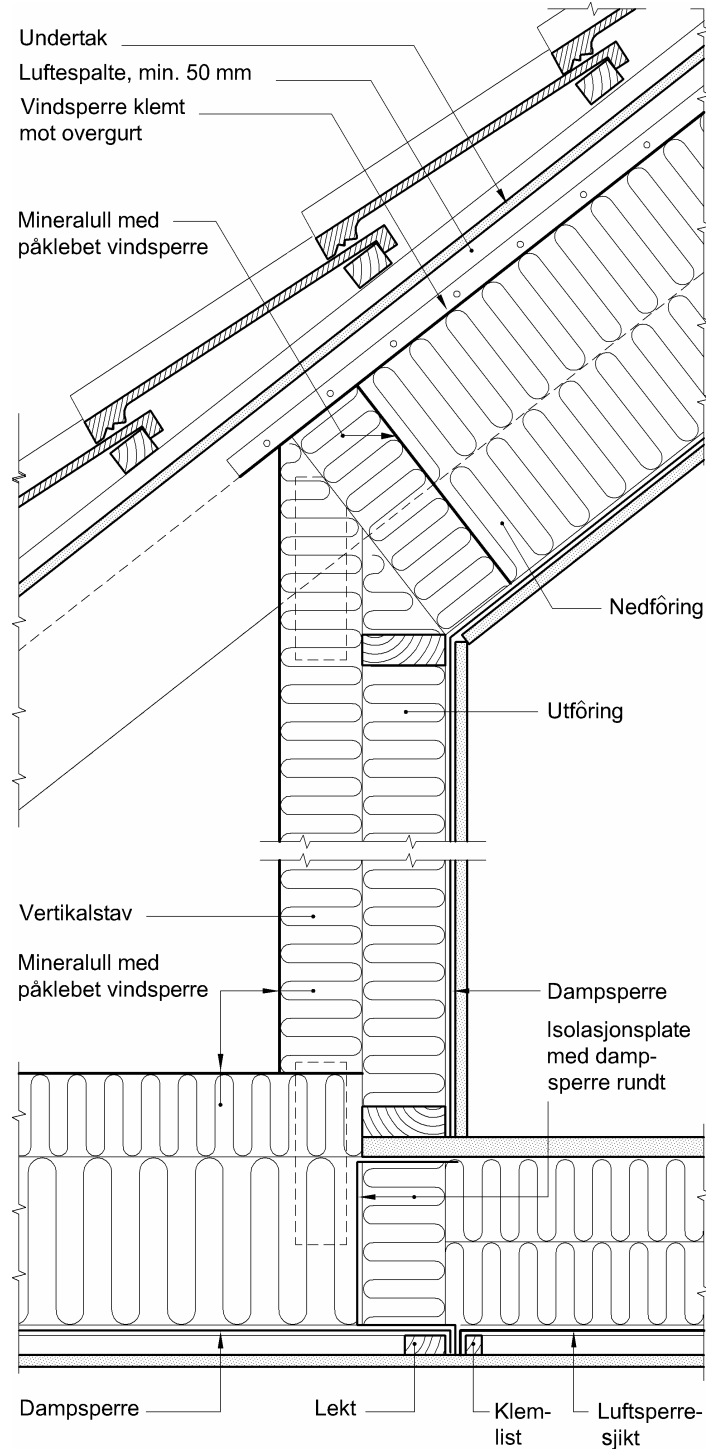
I følge figurene V.6.2 og V.6.3 kan årlig varmetap for et småhus med loftromstakstoler og luftede kneloft bli opp til 2000 – 3000 kWh ekstra pr. år som følge av at luft blåser gjennom mellombjelkelaget. Det kan være tilfellet hvis det ikke er noen effektiv vindsperre utvendig for varmeisolasjonen i kneloftet. For de øverste kurvene i figurene er ”vindsperrrens” luftgjennomgangstall satt til 10 m³/m²hPa som tilsvarer omtrent at det ikke er noe vindsperrsjikt. Videre gjelder disse varmetapstallene når bjelkelaget er bare delvis fylt med isolasjon, slik at det er en 5 mm eller tykkere luftspalte mellom isolasjonen og golvet over, og midlere vindhastighet er ca 8 m/s som for eksempel i Vardø.

For de fleste stedene i Norge er midlere vindhastighet i fyringssesongen vesentlig lavere. Se vedlegg 2. Ved en midlere vindhastighet på ca. 4 m/s vil årlig ekstra varmetap med samme utførelse av takkonstruksjonen som beskrevet ovenfor være mindre enn ca. 500 kWh/år i følge beregningene. Til sammenligning er det omtrent det samme som det en vil redusere varmetapet med i et småhus ved å redusere U-verdien for vinduene fra 1,6 til 1,4 W/m²K som foreslått i forslag til nytt forslag til TEK (Teknisk forskrift til Plan og bygningsloven, 2005).

Hvis all isolasjonen i taket beskyttes av et kontinuerlig vindsperrsjikt som tilfredsstiller Byggforsk sine generelle anbefaling til lufttetthet for vindsperrsjikt inklusive skjøter, lekkasje < 0,05 m³/m²hPa, blir årlig ekstra varmetap mindre enn ca.. 300 kWh/år selv for de mest vindutsatte småhusene.

Hvis bjelkelaget fylles helt slik at isolasjonen har varig god kontakt med golvet over blir faren for luftgjennomblåsing betydelig redusert slik det framgår av figur V.6.4.

Et enda mer effektivt tiltak for å stoppe denne formen for ekstra varmetap for tak med luftede kneloft er å stenge bjelkelaget for luftgjennomstrømning. Se figur V.6.5. Bjelkelaget kan stenges for luftgjennomstrømning ved å montere en vindsperre, dampspærre eller en plate som deler av hulrommet mellom bjelkene/undergurtene rett ned for kneveggen for eksempel som vist i figur V.6.6



Figur V.6.6

Tetting av mellombjelkelaget for å hindre at kald luft blåser gjennom isolasjonen i mellombjelkelaget. (Byggdetaljer 525.107:2005)



Norges byggforskningsinstitutt's forskningsprogram Klima 2000 – Klimatilpasning av bygningskonstruksjoner retter søkelyset mot klimatilpasning av bygninger og bygningskonstruksjoner under strengere ytre klimabelastninger. Programmet vil pågå frem til utgangen av 2006 og består av 14 ulike prosjekter. Programmets hovedmål er gjennom forskning og utvikling å oppdatere prinsipløsninger for konstruksjoner som både gir økt bestandighet mot og økt pålitelighet ved ytre klimapåkjenninger, samt kartlegge mulige virkninger av klimaendringer på det bygde miljø – og hvordan samfunnet best kan tilpasse seg endringene. Hensikten er å definere klarere kriterier og anvisninger for prosjektering og utførelse av kritiske konstruksjonsdetaljer, hovedsakelig knyttet til bygningers ytre klimaskjerm.