



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

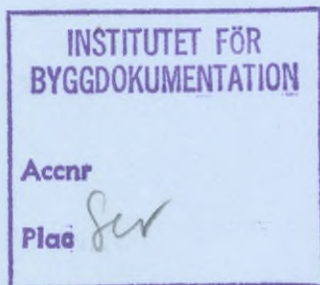
R89:1987

Fuktteknisk dimensjonering med statistikk

**En metode for vurdering av risiko
for byggskader**

Anker Nielsen

R
a/w



Byggforskningsrådet

R89:1987

FUKKTEKNISK DIMENSJONERING MED STATISTIKK

En metode for vurdering av risiko for byggskader

Anker Nielsen

Denne rapporten omhandler arbeid utført for forskningsbevilgning 840796-7 fra Statens råd for bygnadsforskning til Norges byggforskningsinstitutt, Trondheim, Norge.

REFERAT

Fuktteknisk dimensjonering har i svært stor grad anvendt seg av enkle beregninger eller empiriske erfaringer. Dette henger sammen med at mange størrelser innenfor fuktdimensjoneringen er dårlig kjent. Bruk av statistikk i vurderingen vil derfor ta hensyn til disse forholdene.

Den statistiske metoden består i å utnytte muligheten for å gjenskape en tilfeldig fordeling av observasjoner. Fordelingene er typisk histogrammer. Ved å anvende en generator av tilfeldige tall, kan fordelingene simuleres. For hver variabel i de fukttekniske modellene antas en fordeling av verdier. En simulering foretas ved å velge et tilfeldig tall for hver variabel, og på dette grunnlaget regne ut f.eks. kondensmengde, uttøringsmengde og sikkerhetsfaktor. Dette må gjentas et stort antall ganger - minst 200. Det første eksemplet er kondens i et massivt tak.

Sikkerhetsfaktoren (F) er definert som forholdet mellom fuktmengden som tørker ut dividert med kondensmengde på års-basis. Er F større enn 1, skjer det uttørring på årsbasis. Er F mindre enn 1, foregår det en fuktupphopning og det er risiko for byggskader.

Resultatene viser at det er stor forskjell på risikoen for kondensasjon. De avgjørende størrelsene i dette eksempelet er uteklima, fukttilskudd og soltilskudd.

Det andre eksemplet er en innvendig etterisolert teglvegg. Det tredje eksempelet er fuktuppsuging i teglstein i forbindelse med en fri vann-overflate.

Rapporten avsluttes med en oppsummering av de parametrene som må være kjent for å arbeide videre med metoden. Dette gjelder spesielt to områder -materialparametre og klimaparametre.

I Byggeforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprosjekt. Publiceringen innebær inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R89:1987

ISBN 91-540-4794-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

Forord

Dette arbeidet er inspirert av en artikkel i Scientific American fra mai 1983 om bruk av EDB-intensiv statistikk. Her fantes muligheter for å vurdere usikkerheten på problemer som var ganske kompliserte. Beregning av fukttransport og fuktbalanser er usikre på grunn av manglende kjennskap til variasjonene på de enkelte parametrene. Derfor var fuktdimensjonering et utmerket område til å prøve å utnytte statistikk.

Da forfatteren har hatt gode kontakter med "Fuktgruppen" ved Lunds Tekniska Högskola, var det naturlig å samarbeide med dem. Dette har dels medført at Statens Råd för byggnadsforskning (BFR) i Sverige har bevilget penger til arbeidet, og dels at det under arbeidet har vært flere møter med Fuktgruppen. Dette har vært til inspirasjon for begge parter. Jeg håper derfor at BFR også i fremtiden vil se med velvilje på prosjekter som utføres i et annet nordisk land i samarbeid med svenske forskere.

Norges byggforskningsinstitutt
Trondheimsavdelingen, desember 1986

Anker Nielsen

INNHold

1	INNLEDNING	6
1.1	Byggskader	6
1.2	Risiko for skader	7
1.3	Analysemetode	7
2	TEORETISK GRUNNLAG	8
2.1	Beregningsmetoder	8
2.1.1	Kondensberegning	8
2.1.2	Fuktoppsuging	10
2.2	Parametervariasjon	11
2.2.1	Risiko for skader	12
2.3	Statistikk	12
2.3.1	Observasjoner	12
2.3.2	Fordelinger	12
2.3.3	Simuleringsmetode	13
3	EKSEMPLER	14
3.1	Kondens i tak	14
3.1.1	Beregningsmetode	15
3.1.2	Konstruksjons-parametre	16
3.1.3	Klima-parametre	19
3.1.4	Parametervariasjoner	22
3.1.5	Simuleringer	26
3.1.6	Vurderinger	30
3.2	Kondens i vegg	34
3.2.1	Beregningsmetode	34
3.2.2	Parametervariasjoner	35
3.2.3	Simuleringer	39
3.2.4	Vurderinger	47

3.3	Fuktoppsuging	47
3.3.1	Beregningsmetode	48
3.3.2	Diffusiviteten for tegl	48
3.3.3	Parametervariasjoner	48
3.3.4	Simuleringer	51
3.3.5	Vurderinger	51
4	SAMMENFATNING AV PROSJEKTET	53
4.2	Forbedret kjennskap til materialparametre ..	53
4.3	Forbedret kjennskap til klimaparametre	53
4.4	Fremtidig innsats	54
4.5	Anvendelse av metoden på andre områder ...	55
5	REFERANSER	56

Sammendrag

Fuktteknisk dimensjonering har i svært stor grad anvendt seg av enkle beregninger eller empiriske erfaringer. Dette henger sammen med at mange størrelser innenfor fuktdimensjoneringen er dårlig kjent. Bruk av statistikk i vurderingen vil derfor ta hensyn til disse forholdene. Mange av byggskadene skyldes fukt. I mange tilfeller kan det forekomme skader i enkelte av en hel rekke like hus. Dette vil bare kunne forklares ut fra statistiske variasjoner av inneklime, uteklime, materialer og utførelse.

Det teoretiske grunnlaget i form av enkle fukttekniske beregningsmetoder gjennomgås kortfattet for de eksemplene som omtales senere. Den statistiske metoden består i å utnytte muligheten for å gjenskape en tilfeldig fordeling av observasjoner. Fordelingene er typisk histogrammer. Ved å anvende en generator av tilfeldige tall, kan foredelingene simuleres. For hver variabel i de fukttekniske modellene antas en fordeling av verdier. En simulering foretas ved å velge et tilfeldig tall for hver variabel, og på dette grunnlaget regne ut f.eks. kondensmengde, uttørkingsmengde og sikkerhetsfaktor. Dette må gjentas et stort antall ganger - minst 200. Dermed finnes en fordeling av resultatene, som avhenger av usikkerheten på variablene i den fukttekniske modellen.

Det første eksemplet er kondens i et massivt tak. Fuktberegningen skjer med diffusjonsmetoden. Sikkerhetsfaktoren (F) er definert som forholdet mellom fuktmengden som tørker ut dividert med kondensmengde på årsbasis. Er F større enn 1, skjer det uttørking på årsbasis. Er F mindre enn 1, foregår det en fuktopphopning og det er risiko for byggskader. Variable konstruksjons-parametre er varmeledningstall og diffusjonstall. Variable klima-parametre er innetemperatur, fukttilskudd til inneluften, utetemperatur, utefuktighet og soltilskudd. Det er gjennomført undersøkelser av hva de enkelte parametrene betyr for resultatene. Simuleringer med 500 tilfeller er gjennomført med uteklime fra Røros og Oslo.

Resultatene viser at 40 % av verdiene fra Røros har F under 1, mens det tilsvarende for Oslo er 7 %. En del av forskjellen skyldes et for lavt vurdert soltilskudd på Røros. Etter en revurdering fås 15 % i stedet for 40 %. De avgjørende størrelsene i dette eksempelet er uteklime, fukttilskudd og soltilskudd.

Det andre eksemplet er en innvendig etterisolert teglvegg. På grunnlag av resultatene fra første eksempel har vi bare variert fukttilskuddet inne, tegl-steinenes diffusjonsmotstand og den innvendige gipsplatens fuktmotstand. Det er foretatt bortimot 200 simuleringer. Opptegnes resultatene i avhengighet av variablene, kan en se at fukttilskuddet er den klart viktigste størrelsen. Holdes fukttilskuddet under ca. 3 g/m^3 , forekommer ikke kondensasjon i konstruksjonen.

Det tredje eksempelet er fuktoppsuging i teglstein i forbindelse med en fri vann-overflate. Her varieres diffusiviteten, og det utregnes hvilken fuktfordeling dette vil gi anledning til.

Prosjektet avsluttes med en oppsummering av de parametrene som må være kjent for å arbeide videre med metoden. Dette gjelder spesielt to områder - materialparametre og klimaparametre. Men ingen resultater av simuleringsmetoden er bedre enn den fukttekniske modellen som benyttes, så bedre fuktmodeller er ønskelig. Simuleringsmetoden er meget anvendelig også på helt andre problemer med usikkerhet. Den har vært brukt til vurdering av variasjonene i energiforbruk i boliger. Det er dermed mulig å forklare den store spredningen som ofte opptrer i resultatene.

1 INNLEDNING

Fuktteknisk dimensjonering har i meget stor utstrekning bestått i enten å bruke enkle beregninger eller utnytte tidligere erfaringer. På dette området er erfaringer meget viktig, enten de hentes fra bøker eller praktiske konstruksjoner. Dette har blant annet sammenheng med at de mange størrelsene innenfor fuktdimensjonering er dårlig kjent. Samtidig er mange beregningsmetoder så forenklet at det er viktig å vite om de overhodet kan brukes på et tilfelle. Dette er blitt påpekt allerede av Adamson et al. (1970), hvor det ble foreslått prinsipper tilsvarende statistisk dimensjonering med belastninger og tillatte laster. Men da fukttekniske størrelser og fuktbelastninger er dårlig kjent, er det i høy grad blitt med teorien.

I de senere årene har det vært interesse for å benytte statistikk i forbindelse med dimensjonering, Efron (1982). Dermed kan det tas hensyn til at det er forskjellig variasjon på forskjellige størrelser. Bruk av statistiske metoder på fuktteknisk dimensjonering vil i en viss utstrekning kunne ta hensyn til at det er stor usikkerhet for noen størrelser. For eksempel kan nevnes fukttransporten gjennom en vegg med en innvendig dampspærre. Her kan dampspærrens fuktmotstand variere, men dessuten kan det oppstå luftstrømninger (fuktkonveksjon), som er langt mer alvorlig. Dette kan det tas hensyn til ved å regne med stor spredning på dampspærrens fuktmotstand. Ett av problemene på det fukttekniske området er for eksempel at fukttransportkoeffisienter som skal brukes i beregningene, må tas fra litteraturen. I realiteten kan de angitte verdiene være 20 - 30 år gamle og materialet helt endret siden den gangen.

1.1 Byggskader

Mange byggskader har sammenheng med fukt. I en del tilfeller er det enkelt å forklare årsaken til skaden når konstruksjoner og fuktbelastninger er kjent. Disse tilfellene kunne vært unngått hvis det var foretatt en bedre dimensjonering. I andre tilfeller er det ikke så enkelt, som de neste eksemplene viser.

Eksempel 1.

I en bebyggelse med like hus viste det seg fuktskader i noen hus, mens andre var helt uten. Dette kan i mange tilfeller forklares ut fra forskjeller i bruksvaner i husene, men det kan også være variasjoner i utførelsen og materialer.

Eksempel 2.

Tilsvarende hus som fungerte godt i en del av landet, viser seg å få fuktskader hvis de bygges andre steder. Dette kan skyldes forskjeller i klima.

Eksempel 3.

Enkelte år kan det fra bestemte områder plutselig vise seg et større antall skader. Her vil det kunne være uteklimaet som er en typisk årsak, med mye regn og med høy utfuktighet. Dette kan forekomme selv om konstruksjonen normalt betraktes som sikker.

1.2 Risiko for skader

De foregående eksemplene viser tydelig behovet for å kunne ta hensyn til de tilfeldige variasjonene i klima og materialparametre. I realiteten er ingen konstruksjon helt sikker, fordi det kan oppstå uheldige kombinasjoner av størrelser som kan gi skader. Forskjellige konstruksjoner kan også reagere forskjellig på tilfeldige variasjoner. Dette kan uttrykkes ved å finne sannsynligheten for skader. Denne kunne være for eksempel 20 %, selv om konstruksjonen i middel ville klare de oppstilte kravene.

1.3 Analysemetode

I dette arbeidet er det beskrevet en metode som kan anvendes til å finne variasjonene i resultater fra fukttekniske beregninger. Det anvendes statistikk i form av Monte-Carlo simulering av variasjonen av de enkelte størrelsene. En beskrivelse av statistikken kan bl.a. finnes i Iversen (1982).

Det gis en beskrivelse av den anvendte statistikken, men hovedvekten ligger på anvendelsen på fukttekniske eksempler. Det regnes på et tak og en vegg samt et mer teoretisk eksempel med fuktoppsuging i teglstein. De anvendte beregningsmodellene er valgt forholdsvis enkle for ikke å få for lange beregningstider, men modellen kan uten videre benyttes på langt mer komplekse modeller.

Det har ikke vært formålet i dette arbeidet å sammenligne forskjellige konstruksjoner, da dette ville ha krevd bedre fuktmodeller og bedre materialdata. Det er ikke tatt spesielt hensyn til spredning fra arbeidsutførelse som vil kunne ha vesentlig betydning for skaderisiko. Dette ville ha krevd feltundersøkelser av virkelige konstruksjoner.

De variasjonene som er benyttet i analysen, er i mange tilfeller valgt på et løst grunnlag, da det ikke fantes tilstrekkelig med måleresultater til å gi nøyaktigere spredninger. Men forhåpentligvis kan dette arbeidet medvirke til å øke interessen for å skaffe materialdata. Hittil har dette vært uinteressant fordi det ikke har vært behov for kjennskap til spredninger.

Den anvendte metoden for angivelse av risiko er enkel, fordi det i mange tilfeller er dårlig kjennskap til maksimalt tillatte fuktmengder.

På grunn av de nevnte usikkerhetene i metodene og de brukte parametrene må de beregnede sannsynlighetene for skader på nåværende tidspunkt ikke oppfattes som verdier som uten videre kan overføres til praksis, men den beskrevne metoden kan være velegnet til vurdering av konstruksjoners usikkerheter i samarbeid med fukttekniske spesialister.

2 TEORETISK GRUNNLAG

Det gis først en gjennomgang av de fukttekniske beregningsmetodene som er anvendt i eksemplene. For en fullstendig gjennomgang av fukttekniske beregningsmetoder henvises til lærebøker, for eksempel litteratur Fukthandboken, Nevander og Elmersson (1981). Deretter gis en beskrivelse av den normale fremgangsmåten for vurdering av variasjoner på et inngående parameter. Metodens manglende muligheter for å vurdere risiko for skader omtales. Til slutt omtales den grunnleggende teorien for statistikk i forbindelse med simulering av fordelinger.

2.1 Beregningsmetoder

2.1.1 Kondensberegning

Ved beregning av fukttransporten i vegger og tak anvendes diffusjonsligningen:

$$g = -d \cdot \text{grad } c = -d \cdot dc/dx$$

hvor g er transportert fuktmengde ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
 d er diffusjonstallet (m^2/s)
 c er vanddampkonsentrasjonen (kg/m^3)
 x er tykkelsen (m)

Dette gjelder for en konstruksjon som består av et enkelt materiale.
Inneholder konstruksjonen flere materialer, må fuktmotstanden utregnes:

$$Z = d/t$$

hvor Z er fuktmotstanden (s/m)
 t er tykkelsen av materialet (m)

Den totale transporten gjennom en sammensatt konstruksjon blir derfor:

$$g = (c_i - c_u) / (Z_1 + Z_2 + Z_3)$$

hvis konstruksjonen inneholder tre materialer.

c_i er konsentrasjonen inne (kg/m)
 c_u er konsentrasjonen ute (kg/m)

Den siste formelen forutsetter at det ikke blir kondens i konstruksjonen. I et tak regnes takbelegget i de fleste tilfellene som diffusjonstett i forhold til motstanden av de øvrige lagene. Dette betyr at det vil opptre kondens om vinteren under takbelegget og dermed 100 % RF. Den transporterte mengden må betegnes ved å bruke metningskonsentrasjonen under takbelegget i stedet for konsentrasjonen ute. For sommerforholdene antas at fukten befinner seg samme sted når uttørkingen skal beregnes.

I en vegg kan det opptre kondens internt i veggen. Her må konsentrasjonens fordeling gjennom konstruksjonen beregnes. Ved å beregne fuktmengden som transporteres inn i og ut av konstruksjonen, kan kondensmengden beregnes:

$$g_{kond} = g_{inn} - g_{ut} = (c_i - c_{kond}) / Z_I - (c_{kond} - c_u) / Z_{II}$$

hvor c_{kond} er konsentrasjonen ved kondensgrensen (kg/m³)
 Z_I er summen av fuktmotstander innenfor kondensgrensen (s/m)
 Z_{II} er summen av fuktmotstander utenfor kondensgrensen (s/m)

Denne beregningsmetoden med bruk av diffusjon er sterkt forenklet, idet det er en rekke forutsetninger for å bruke den:

- 1) Beregningen forutsetter stasjonære forhold, noe som sjelden forekommer i ytterkonstruksjoner i bygninger.

- 2) Det tas ikke hensyn til andre former for fukttransport , for eksempel kapillarsuging.
- 3) Lufttrykkforskjeller som kan transportere store fuktmengder, tas det ikke hensyn til.
- 4) Diffusjonstallet regnes konstant, men er for mange materialer avhengig av den relative fuktigheten.
- 5) Det tas ikke hensyn til at kondens vil tilføre varme som kan endre temperaturfordelingen. Temperaturfordelingen endres også av høyere fuktinnhold.

Når metoden anvendes på tross av disse mange forutsetningene, henger dette sammen med at den er enkel og rask å bruke. Det er mulig å ta hensyn til en del av problemene ved å korrigere diffusjonstallet slik at det tas hensyn til fuktavhengighet og andre transportformer. Dessuten er det ikke mulig å måle et rent diffusjonstall, så de verdiene som angis, er for en samlet fukttransport, men med diffusjonen som den viktigste transportform. Problemene med at beregningen er stasjonær kan til dels motvirkes ved å regne på kortere tidsperioder, for eksempel månedsvis. Beregninger med mer kompliserte modeller viser at døgnsvingninger utjevnes.

De fleste beregningene med denne metoden foretas i et regnearksprogram på en PC. Alle resultatene er bearbeidet med regnearksprogrammer med grafikk.

2.1.2 Fuktoppsuging

Den ikke-stasjonære fukttransport kan beskrives med differensialligningen:

$$dW/dt = d/dx (D dw/dx)$$

hvor W er fuktinnholdet (m^3/m^3)

t er tiden (s)

x er stedet (m)

D er diffusiviteten (m^2/s)

Da diffusiviteten er avhengig av fuktinnholdet, blir løsningen komplisert. I dette tilfellet brukes som eksempel et materiale som fra starten har et konstant fuktinnhold W_0 . Dette materialet bringes i kontakt med vann som suges opp i en retning. Det antas at fuktinnholdet straks vil stige til W_s i materialet som er i kontakt med vannet. Dette er ensbetydende med at betingelsene er:

$$W(x,t) = W_0 \text{ for } x > 0 \text{ og } t = 0$$

$$W(x,t) = W_s \text{ for } x = 0 \text{ og } t > 0$$

For dette tilfellet ønskes fuktfordelingene i materialet bestemt til forskjellige tidspunkter. Dette er mulig forutsatt at diffusivitetens avhengighet av fuktinnholdet er kjent. I så fall kan det foretas en omskriving av differensial-ligningen ved å bruk $\lambda = x \cdot t^{-1/2}$ (Boltzmann transformasjonen). Problemet kan derfor løses når λ er kjent som funksjon av fuktinnholdet, idet $x = \lambda(W) \cdot t^{1/2}$ gir fordelingene når t varieres. Utrekningen av $\lambda(W)$ ut fra kjennskap til $D(W)$ foretas ved en iterativ metode som er utviklet av J. R. Philips. En god beskrivelse av metoden finnes i Kirkham og Powers (1972).

Beregningen foretas med et EDB-program som er nærmere beskrevet i Nielsen (1975). Programmet er konvertert til bruk på PC. Resultatene fra beregningen skrives ut i en fil, som bearbeides videre i et regnearkprogram med grafikkmuligheter.

2.2 Parametervariasjon

Den alminnelige metoden til fuktteknisk dimensjonering har vært å innsette middelveier i beregningsmodellen, for eksempel å ta klimadata fra et middelår. Diffusjonstall og andre transportkoeffisienter er blitt valgt ut fra opplysninger i litteraturen, eventuelt med en vurdering av om verdien skal velges høyere eller lavere i et intervall gitt i litteraturen. Ut fra de innsatte verdiene er deretter fukttransporten beregnet, og det kan på dette grunnlaget vurderes om det for eksempel er større uttørking enn kondensasjon. I en del tilfeller er det foreslått å bruke kriteriet for godkjennelse av en konstruksjon at uttørkingen skal være 50 % større enn kondensasjonen.

Ved en litt grundigere dimensjonering er det også blitt undersøkt hvilke parametre som betyr mest for resultatene. Dette gjøres ved å sette inn forskjellige verdier for for eksempel diffusjonstallet og se hvilken betydning dette har for resultatene. Dette gir en mulighet for å analysere hvilke størrelser som har størst betydning for resultatene. Skal det skaffes bedre verdier, er det derfor spesielt viktig å konsentrere seg om disse størrelsene. Metoden som er benyttet her, gir muligheter for å vurdere innflytelsen fra mer enn en parameter ved å sette inn forskjellige verdier, men resultatene er vanskelig å fortolke, fordi det mangler opplysning om sannsynligheten for at disse kombinasjonene opptrer.

2.2.1 Risiko for skader

Vurdering av risiko for skader kan bestå av flere trinn. Det første kan for eksempel være å vurdere om uttørkingen på årsbasis er større enn kondensasjonen. Dette er blitt anvendt ved vurdering av resultatene fra takkonstruksjonen. I realiteten er dette ikke alltid tilstrekkelig for å vurdere risiko, idet det kunne forekomme at kondensmengden ble så stor at materialet selv ble skadet, for eksempel på grunn av sopp. Dette til tross for at konstruksjonen på årsbasis hadde større uttørking enn kondensasjon. Det kan derfor bli nødvendig å vurdere risiko for flere typer skader. I det valgte eksempelet er konstruksjonen likevel ikke særlig fuktfølsom, så en vurdering på årsbasis er tilstrekkelig.

Et særlig problem er et høyt fuktinnhold i konstruksjonen fra f.eks. byggfukt, som kan gi skader i visse tilfeller.

2.3 Statistikk

2.3.1 Observasjoner

Bruk av statistikk forutsetter at resultater er gitt i form av tallverdier. Disse tallverdiene kalles observasjoner. Et eksempel er utetemperaturer. Hvis det foretas mange observasjoner, kan disse opptegnes og det fremkommer dermed en fordeling som angir hvor stor andel av verdiene som finnes innenfor et gitt intervall. I statistikken er normalfordelingen viktig, idet den kan karakteriseres ved middelværdi og spredning. Inngår flere normalfordelte parametre i et uttrykk, kan den resulterende fordelingen utregnes teoretisk.

I en del tilfeller kan det ikke forutsettes normalfordelinger, og det må derfor benyttes andre beregningsmetoder. For eksempel er utetemperaturen ikke normalfordelt. I stedet må det konstrueres fordelinger på grunnlag av målingene. Typisk for disse vil være at de er histogrammer.

2.3.2 Fordelinger

For å kunne gjenskape en ønsket fordeling i en simulering, er det fordelaktig å benytte seg av en ideell tilfeldig tallsgenerator. Den kan generere en rekke tall som er rektangulært fordelt mellom 0 og 1. Det betyr at det er like stor sannsynlighet for å få et hvilket som helst tall

mellom 0 og 1. Ut fra en slik rektangulær fordeling kan det foretas en transformasjon til en vilkårlig fordeling, i dette tilfellet en empirisk fordeling dannet på grunnlag av observasjoner, f.eks. utetemperatur.

Normalt vil de observerte verdiene (t) være gitt i form av et histogram med et begrenset antall klasser. En klasse kan f.eks. bestå av utetemperaturer mellom 15 og 16 °C. Histogrammet utgjør en fordelingsfunksjon som er gitt ved rette linjestykker gjennom punktene

$$(t_0, f_0), (t_1, f_1), \dots, (t_i, f_i), \dots, (t_n, f_n)$$

hvor t er verdiene f.eks. innetemperaturen, og f_i er den kumulerte relative hyppighet av observasjoner i klassene 1, 2, ..., i . Klasse i omfatter intervallet $t_{i-1} \leq t < t_i$. Verdien for $f_0 = 0$ og $f_n = 1$.

Den kumulerte fordelingsfunksjon (F) er da gitt ved

$$F(t) = f_i + \frac{(f_{i+1} - f_i)}{(t_{i+1} - t_i)} (t - t_i) \quad t_i \leq t < t_{i+1}$$

Den inverse fordelingsfunksjon blir:

$$F^{-1}(f) = t_i + \frac{(t_{i+1} - t_i)}{(f_{i+1} - f_i)} (f - f_i) \quad f_i \leq f < f_{i+1}$$

Genererer vi derfor et tilfeldig tall U mellom 0 og 1, vil vi få en observasjon (T) fra den empiriske fordeling ved den inverse transformasjon:

$$T = t_i + \frac{(t_{i+1} - t_i)}{(f_{i+1} - f_i)} (U - f_i) \quad f_i \leq U < f_{i+1}$$

Dette er lett å programmere, og da de fleste EDB-maskiner inneholder en tilfeldig tallsgenerator, kan det oppnås ønskede fordelinger av verdier, f.eks. innetemperatur eller diffusjonstall.

2.3.3 Simuleringsmetode

På grunnlag av de fukttekniske modellene i avsnitt 2.1 bestemmes hvilke parametre som er variable. For hver av disse størrelsene må det framstilles en fordeling i form av et histogram. Formlene i avsnitt 2.3.2 anvendes til å transformere et tilfeldig tall mellom 0 og 1 til en verdi i

histogrammet. For å foreta en fuktberegning (simulering), kreves et tilfeldig tall for hvert parameter som simuleres. Antall nødvendige tilfeldige tall er lik antall simuleringer gange antall parametre. Metoder som her er beskrevet, medfører at de enkelte parametrene forutsettes å være uavhengig av hverandre.

Hvis dette kravet ikke er oppfylt, må simuleringen skje slik at det tas hensyn til avhengigheten. Et eksempel er temperatur og fuktighet i uteluft, som er avhengige. Dette løses ved at en i stedet velger et tilfeldig år og bruker temperatur og fuktighet for dette.

For å kunne vurdere spredningen på beregningsresultatene, må det foretas et stort antall simuleringer - minst 200, men normalt 500. Det medfører et vesentlig forbruk av EDB-tid og krever en generator av tilfeldige tall som ikke viser tegn til systematikk innenfor det nødvendige antallet verdier. Resultatene av simuleringene må gjemmes, slik at verdiene kan sorteres og oppteget som fordelinger.

Ved å foreta flere sett simuleringer med f.eks. 200 beregninger, kan det undersøkes om antall beregninger er stort nok til å gi en god beskrivelse av fordelingen. Hvis det kreves stor nøyaktighet i fordelingen, må antall beregninger økes og dermed EDB-tiden og omkostningene.

Den endelige bearbeidingen er i alle tilfeller foretatt med PC EDB-programmet SYMPHONY (1984) som inneholder regneark og grafikk. De fleste tegninger i denne rapporten er oppteget med dette programmet.

3 EKSEMPLER

3.1 Kondens i tak

Det er valgt et eksempel på beregning av fuktoppopping og uttørking i et ikke-utluftet tak. I ikke-utluftede tak vil det alltid skje en fuktoppopping om vinteren og en uttørking om sommeren på grunn av sol og høyere temperaturer på takflaten. Det er derfor viktig å kunne vurdere dels størrelsen av de kondenserte fuktmengdene og dels uttørkingen. Er det en større uttørking enn kondensasjon i løpet av et år, vil konstruksjonen kunne fungere, hvis den kondenserte mengden ikke gir anledning til skader. Konstruksjonen regnes å bestå av en 100 mm betongplate med 150 mm polystyrenisolering og takpapp.

3.1.1 Beregningsmetode

Beregningen av fuktoppnopning og uttørking foretas med diffusjonsmetoden, som beskrevet i avsnitt 2.1.1. For denne konstruksjonen regnes takpappen diffusjonstett.

Den kondenserte mengden beregnes for hver måned med aktuelle klimadata:

$$G = \frac{c_i - c_T}{Z}$$

hvor G er kondensmengden ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
 c_i er vanddampkonsentrasjonen inne (kg/m^3)
 c_T er metningsvanddampkonsentrasjonen under takbelegg (kg/m^3)
 Z er fuktmotstandstallet mellom inneluft og takbelegg (s/m)

Vanddampkonsentrasjonen inne er lik med vanddampkonsentrasjonen ute, pluss et fukttilskudd på grunn av personer og bruk av rommet. Vanddampkonsentrasjonen under takbelegget avhenger av temperaturen. Det betyr at temperaturfordelingen gjennom taket må beregnes. Derfor må innetemperaturen, varmeledningstallene for materialene i taket og varmeovergangsmotstandene være kjent.

I vintermånedene er c_T lavere enn c_i og det skjer en fuktoppnopning (G blir positiv). Om sommeren må det tas hensyn til solstrålingen, som vil heve overflatetemperaturen. Dermed økes c_T og fukten kan tørke ut, når c_T er større enn c_i (G blir negativ).

Den månedlige kondensmengden kan være enten positiv, svare til kondensasjon eller være negativ, dvs. svare til uttørking. Verdiene summeres på årsbasis, så kondensmengden G_K og uttørking G_U bestemmes.

Forholdet mellom uttørking og kondens kalles sikkerhetsfaktoren og betegnes med F :

$$F = G_U / G_K$$

Hvis F er større enn 1, er det på årsbasis en uttørking. Hvis F er lik 1, er det likevekt. Hvis F er lavere enn 1, blir det kondens. Det er derfor viktig å vite hvilken sannsynlighet det er for at F blir lavere enn 1. Disse tilfellene vil lett gi anledning til byggskader.

Men at F er større enn 1 er ingen absolutt sikkerhet mot skader, for den kondenserte fuktmengden kunne i løpet av vinteren bli så stor at det kan oppstå skader alene av den grunn. Så kondensmengden må også vurderes i relasjon til om konstruksjonen kan oppta fuktmengden uten fare.

3.1.2 Konstruksjons-parametre

Her inngår tykkelse, varmeledningstall og diffusjonstall for de materialer som benyttes. I alle de følgende beregningene er det regnet med at konstruksjonen består av 100 mm betong med 150 mm polystyren (EPS) og et diffusjonstett takbelegg. Tykkelsene er regnet konstant, da det ikke i denne vurderingen har vært meningen å inkludere variasjoner på grunn av unøyaktigheter. Det betyr at det er fire størrelser som inngår i simuleringen. For hver størrelse er funnet en fordeling som gir den beste beskrivelse av størrelsens variasjon.

1. Varmeledningstall for polystyren

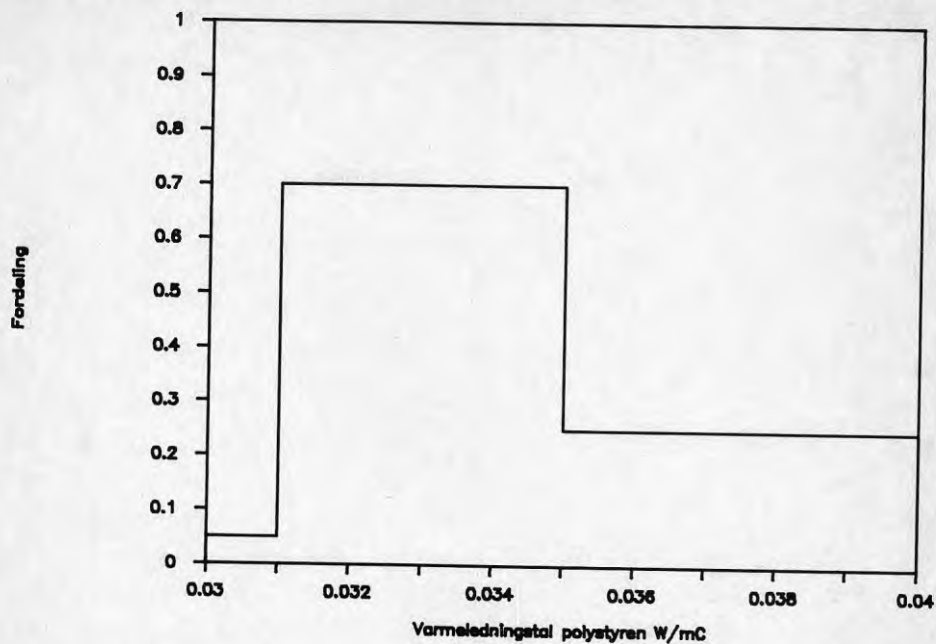
For varmeledningstallet for polystyren bygger tallene på vurderinger ut fra NBI-målinger. Fordelingen er gitt som et histogram (figur 1), hvor det ses at 5 % av verdiene faller mellom 0,03 og 0,031 W/m C, 70 % mellom 0,031 og 0,035 W/m C og de resterende 25 % mellom 0,035 og 0,04 W/m C. Ut fra denne fordelingen opptegnes den akkumulerte fordelingskurven (figur 2), som direkte viser hvilket varmeledningstall som fås ved et tilfeldig tall mellom 0 og 1. Helningen på kurven viser hvordan fordelingen er. En nesten vannrett linje svarer til at sannsynligheten i intervallet er meget liten. En nesten loddrett linje svarer til at sannsynligheten i intervallet er meget stor.

2. Varmeledningstallet for betong

Det regnes med like stor sannsynlighet for et hvert varmeledningstall mellom 1,6 og 1,8 W/m C. De angitte verdiene er vurdert, da varmeledningstallet for betong vil få liten betydning for resultatene.

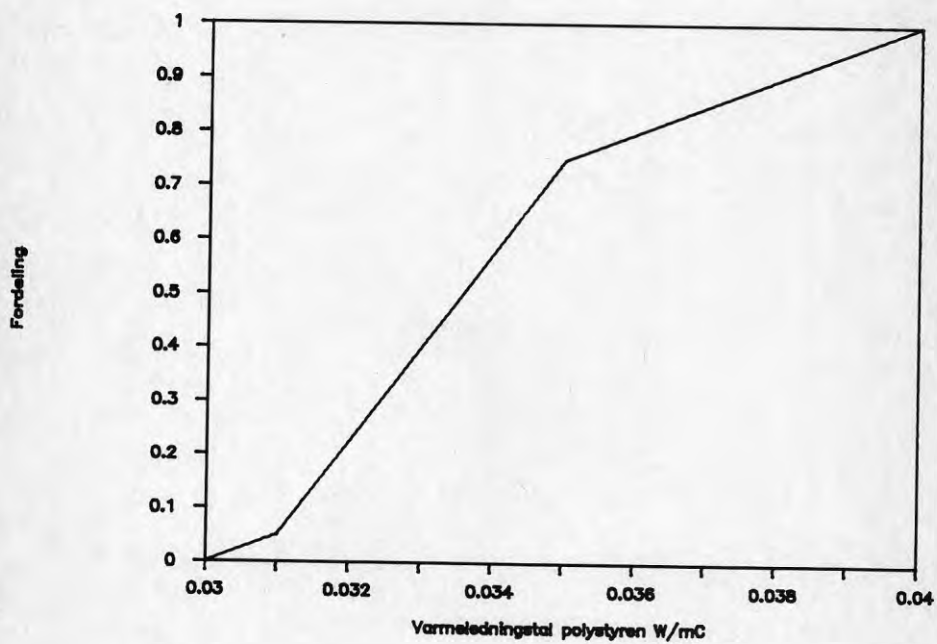
3. Diffusjonstall for betong

I figur 3 ses fordelingen med størstedelen (70 %) av verdiene mellom 0,5 og $1 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Dette tilsvarer verdier som normalt er angitt i litteraturen. Det er regnet med at i 25 % av tilfellene vil betongen være mer utett. Dette ville være typisk for tilfellet ved elementkonstruksjoner, hvor det kan skje en større transport ved utettheter.



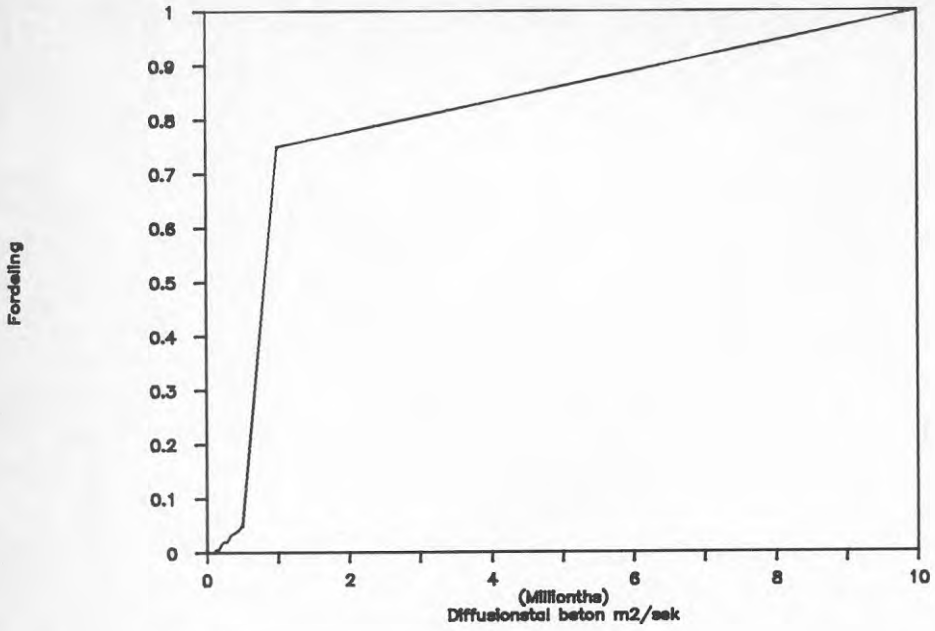
Figur 1.

Fordelingen av varmeledningstall for polystyren



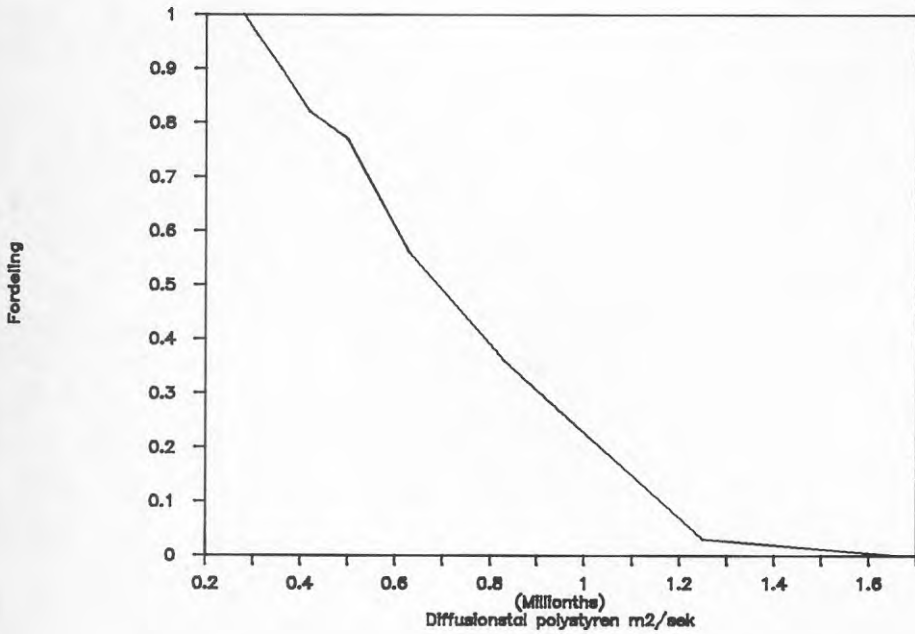
Figur 2.

Akkumulert fordeling av varmeledningstall for polystyren, utregnet fra figur 1.



Figur 3.

Akkumulert fordeling av diffusjonstall for betong



Figur 4.

Akkumulert fordeling av diffusjonstall for polystyren

4. Diffusjonstall for polystyren

I figur 4 ses fordelingen med størstedelen av verdiene liggende mellom 0,3 og

$1,2 \cdot 10^{-6}/s$. Tallene stammer fra tyske målinger (1) på alminnelig ekspandert polystyren. Det er ved fordelingen ikke tatt spesielt hensyn til innflytelsen fra sprekker mellom platene.

3.1.3 Klima-parametre

Her inngår både inneklima og uteklima. For inneklimaet er det temperaturen og fukttilskudd til uteluft som kommer inn. For uteklimaet er det temperatur og fuktighet samt temperaturtillegg på grunn av stråling. Det betyr at 5 størrelser inngår i simuleringen.

1. Innetemperatur

Figur 5 viser fordelingen av innetemperaturen. Det er regnet med en bygning som holdes oppvarmet til omkring 21 °C. Fordelingen er hentet fra en svensk undersøkelse av temperaturer i boliger, Widegren-Dafgård (1984).

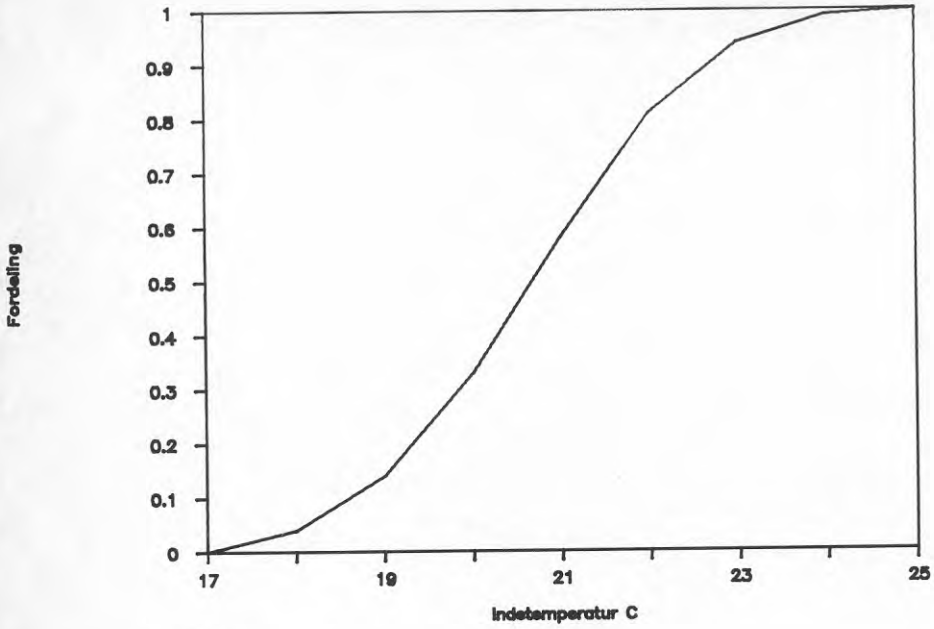
2. Fukttillegg

Figur 6 viser fordelingen av fukttillegg for uteluften på grunn av personer og bruk. Verdiene på $1 - 2 \text{ g/m}^3$ er vurdert ut fra Harderup (1983), idet det er regnet med en bygning med lav fuktbelastning.

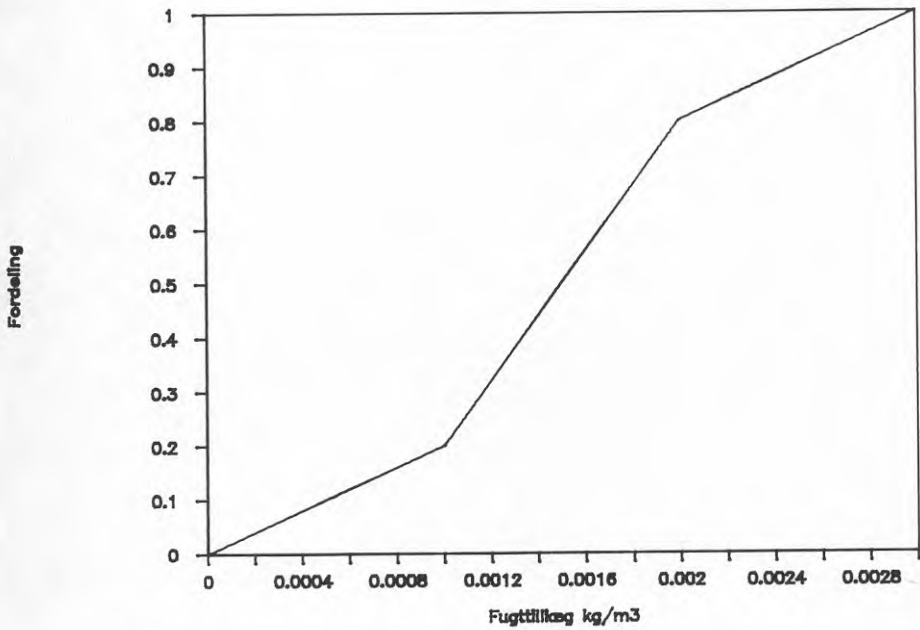
3. Utetemperatur

Det benyttes måleverdier fra Meteorologisk Institutt i Oslo for perioden 1950 - 1979,

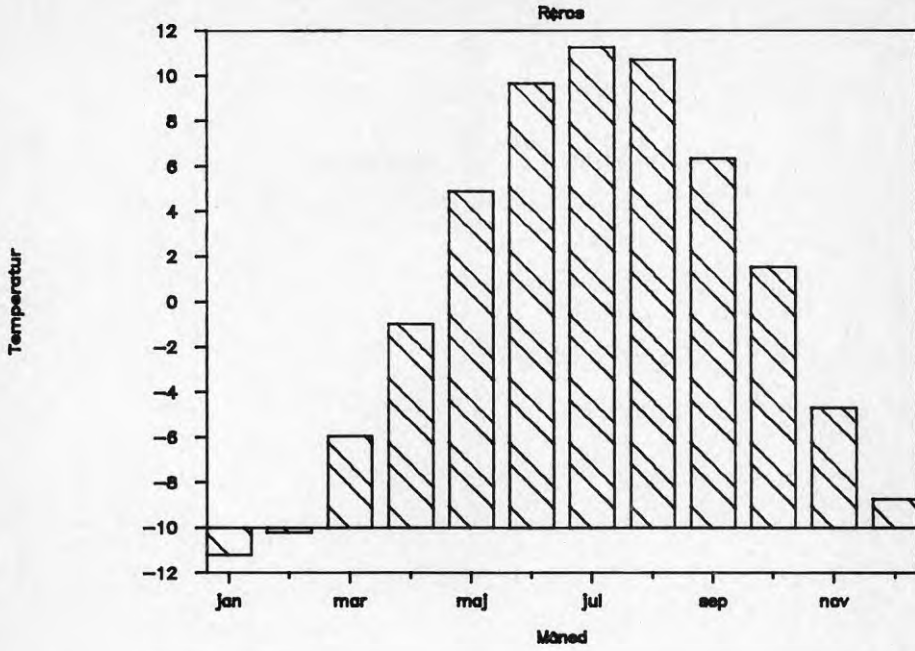
Norsk Meteorologisk Årbok. Det er valgt å benytte Røros som et eksempel på en by hvor det er kalde vintere og kjølige sommere. Røros ligger sydøst for Trondheim på 63° nord. Figur 7 viser middeltemperaturene for hver måned beregnet fra verdiene i 30-års perioden. Vintertemperaturen er typisk -10 °C og sommertemperaturen 10 °C. Når simuleringen skjer, velges et bestemt av de 30 årene, og månedstemperaturene fra dette året brukes. Det skjer altså ikke noe nytt valg hver måned. Fra samme år tas tilsvarende verdier for fuktigheten.



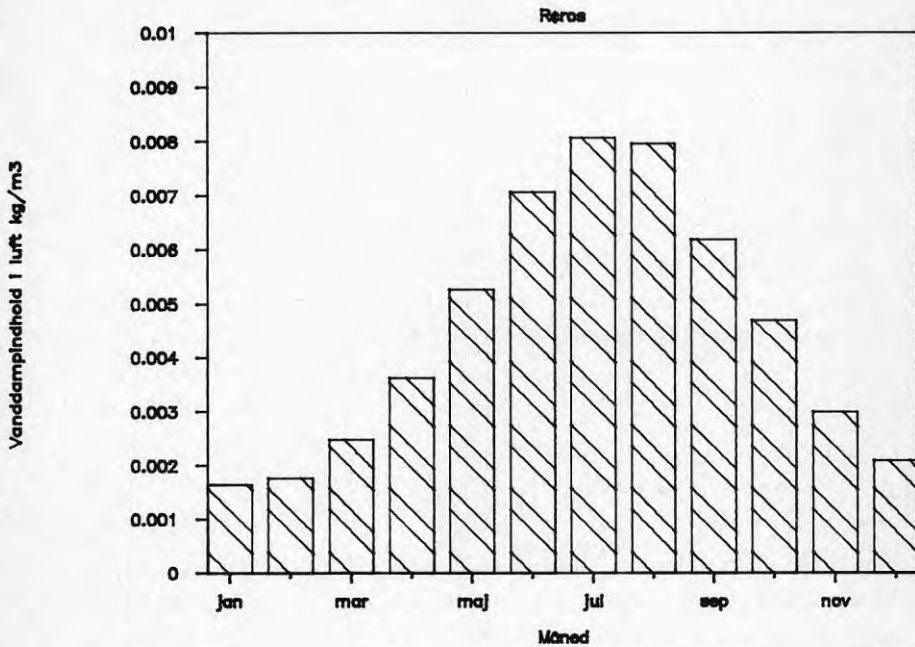
Figur 5.
Akkumulert fordeling av innetemperaturer fra Widegren-Dafgård (1984)



Figur 6.
Akkumulert fordeling av fukttilskudd for inneluften



Figur 7.
Månedsmiddeltemperaturer i Røros for perioden 1950 til 1979



Figur 8.
Månedsmiddel av vanddampinnholdet i uteluften i Røros for perioden 1950 til 1979

4. Utefuktighet

Figur 8 viser middelvandampinnholdet i luften for Røros fra samme periode, som er nevnt i forbindelse med utetemperatur.

5. Soltilskudd

For å ta hensyn til solstrålingen på takflaten, utregnes den ekvivalente utetemperatur:

$$T_{ek} = T_u + \frac{a \cdot I}{u}$$

hvor T_u er utetemperatur $^{\circ}\text{C}$

I er solstrålingen på takflaten W/m^2

a er absorpsjon av overflaten

u er utvendig varmeovergangstall $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$

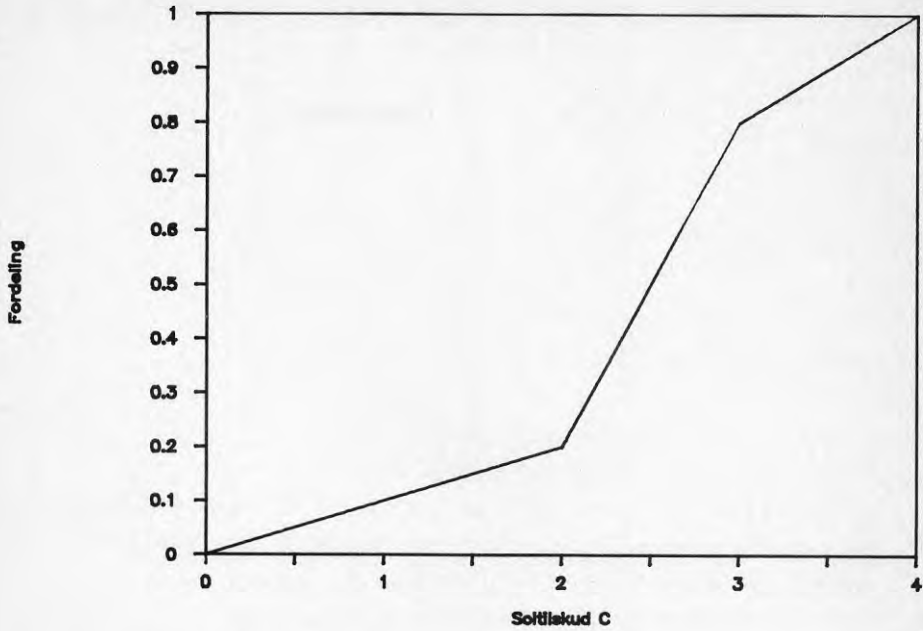
Det utvendige overgangstallet settes til $25 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$, tilsvarende $m_u = 0,04 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$. Absorpsjonen avhenger av overflatens farge og struktur - for mørke flater fås 0,9, for lyse flater 0,7 og for blanke flater 0,5.

Siste ledd i formelen er overtemperaturen i forhold til uteluften. Denne størrelsen betegnes i det følgende "soltilskuddet". For solstrålingen i Røros fås en vannrett flate ca. $200 \text{ W}/\text{m}^2$ i sommermånedene. Antatt en lys takflate, fås et soltilskudd på $5,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. I den første beregningen ble det valgt verdier mellom 0 og $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, se figur 9, men det ses at dette er en meget forsiktig vurdering. Konsekvensene av dette skal vi komme tilbake til.

På grunnlag av strålingsdata fra Gulbrandsen og Skartveit (1978) er valgt å ta hensyn til at solinnfallet varierer over året, så tillegget avhenger av måneden. Det tilfeldig valgte tillegg reduseres i en del måneder. I januar og februar regnes med 0 % av tillegget, i mars med 30 %, i april med 60 %, i mai, juni og juli med 100 %, i august med 90 %, i september med 50 %, i oktober med 10 % og i desember med 0 %.

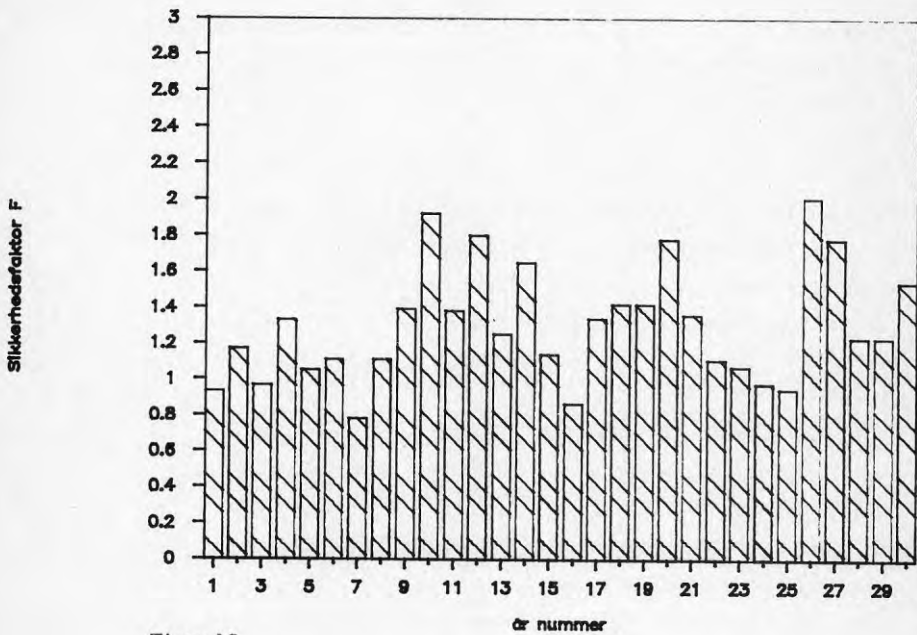
3.1.4 Parametervariasjoner

Det gjennomføres en gjennomregning av de enkelte parametrene innflytelse ved å variere hver parameter fra 0 til 1,0 i sprang på 0,05, når alle andre parametre settes til middelverdien. Samtidig utregnes den kondenserte fuktmengden (G_k), uttørkingen (G_u) samt sikkerhetsfaktoren F .



Figur 9.

Akkumulert fordeling av soltilskudd på grunn av solstråling på takflaten



Figur 10.

Beregnet sikkerhetsfaktor for årene 1950 (nummer 1) til 1979 (nummer 30) med uteklima fra Røros

Middelverdiene for parametrene er:

Varmeledning polystyren	0,336 W/m C
Varmeledning betong	1,7 W/m C
Diffusjonstall betong	$0,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Diffusjonstall polystyren	$0,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Innetemperatur	20,7 °C
Fukttilllegg	0,0015 kg/m ³
Soltilllegg	2,4 °C
Årstall klima	1964

1. Klima

Figur 10 viser sikkerhetsfaktoren F beregnet for de 30 utvalgte årene. Sikkerhets-faktoren varierer fra 0,7 til 2,0. Det er 6 år hvor F er lavere enn 1, dvs. at kondensasjonen er større enn uttørkingen. Det betyr at allerede denne figuren viser at konstruksjonen ikke er særlig sikker. Figur 11 viser den beregnede kondensmengden for de samme år. Verdiene ligger på 40 - 60 g/m² år. Sammenlignes med figur 11, ser man at det er en tendens til at i år med stor kondensasjon, blir sikkerhetsfaktoren lav. Men ingen regel uten unntakelser. Den beregnede kondensmengden utgjør omkring 2 % vekt og gir derfor ikke anledning til spesielle problemer. Det skal større fuktmengder til for å endre på isoleringsevnen og dermed forverre resultatene.

2. Varmeledningstall

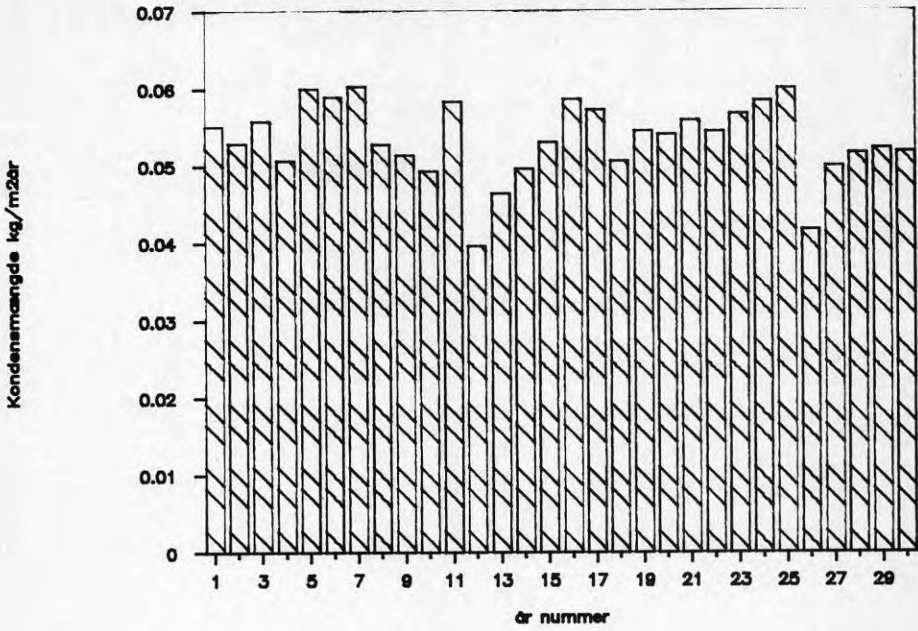
For varmeledningstallene for betong og polystyren gjelder at variasjonen på kondensasjon og uttørking er 0 for betongen og minimal for polystyrenen. Verdiene er som middelverdien for 1964 med kondensert mengde på 53 g/m² og uttørkingen på 60 g/m³. Sikkerhetsfaktoren blir derfor 1,1.

3. Diffusjonstall

For diffusjonstallene gjelder at endringer ikke forandrer sikkerhetsfaktoren, som blir 1,1. Men både kondensmengder og uttørking endres.

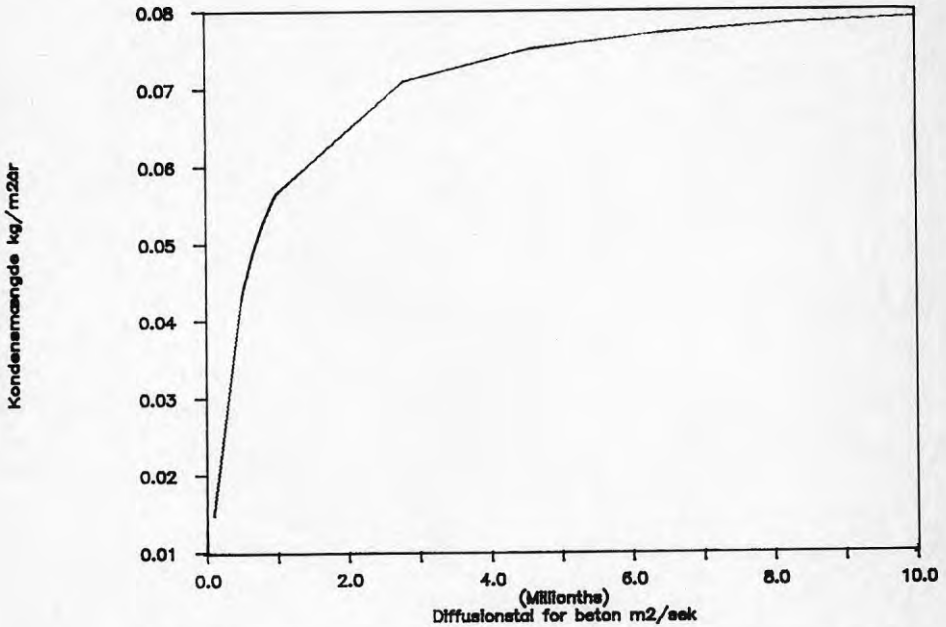
Figur 12 viser kondensmengdens avhengighet av betongens diffusjonstall. Sammenhengen er som forventet, - lave diffusjonstall reduserer kondensmengden. Det samme er tilfellet for uttørkingen, så den er ikke tegnet.

Figur 13 viser kondensmengdens avhengighet av polystyrenens diffusjonstall.



Figur 11.

Beregnet kondensmengde for årene 1950 (nummer 1) til 1979 (nummer 30) med uteklima fra Røros



Figur 12.

Beregnet kondensmengde som funksjon av diffusjonstall for betong

4. Innetemperaturen

Sikkerhetsfaktorens avhengighet av innetemperaturen er ubetydelig fra 1,10 til 1,17 og derfor ikke opptegnet. Kondensmengdens avhengighet av innetemperaturen er meget ubetydelig. Det betyr at innetemperaturen bare påvirker resultatene marginalt.

5. Fukttillegg

Fukttillegget er meget viktig da størrelsen påvirker både sikkerhetsfaktoren, kondensmengde og uttørking.

Figur 14 viser sikkerhetsfaktorens avhengighet av fukttillegget. Ved et fukttillegg på 0 blir F uendelig stor. Ved et fukttillegg på 1 g/m^3 er sikkerhetsfaktoren 3. Verdien av F blir under 1, når tillegget blir større enn $1,6 \text{ g/m}^3$. Det er tilfellet i 45 % av tilfellene, som det ses av fordelingen på figur 7.

Figur 15 viser kondensmengdens avhengighet av fukttillegget. Den øverste delen er nesten lineær. Av analysen fremgår at fukttillegget må bestemmes rimelig godt for å kunne finne den endelige sikkerhetsfaktor for konstruksjonsløsningen.

6. Soltilskudd

Solstrålingen på takflaten påvirker sikkerhetsfaktoren, kondensmengden og uttørkingen.

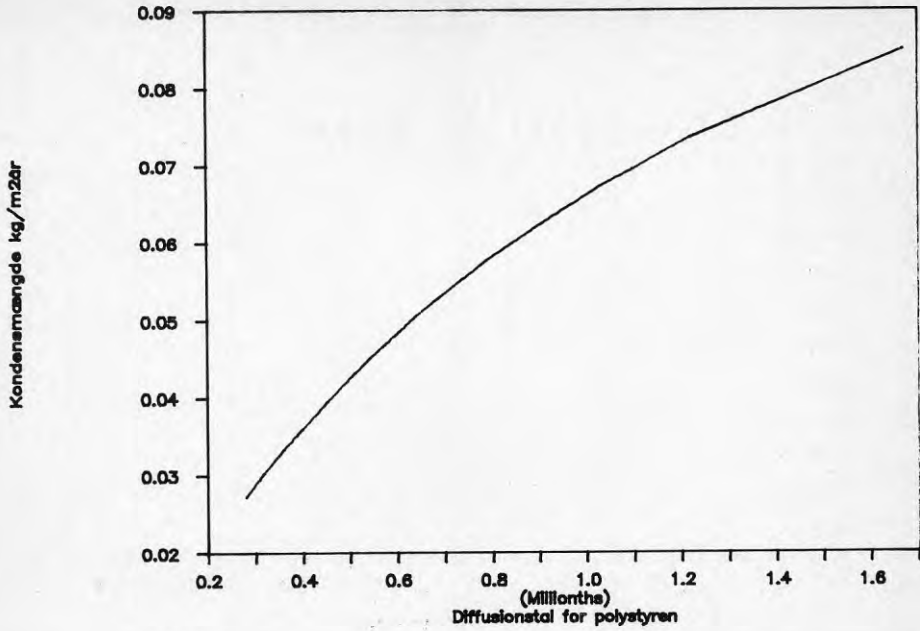
Figur 16 viser sikkerhetsfaktorens avhengighet av soltilskuddet. Ved verdier under $2 \text{ }^\circ\text{C}$ er sikkerhetsfaktoren mindre enn 1. Ved større verdier økes sikkerhetsfaktoren.

Figur 17 viser kondensmengden i avhengighet av soltillegget. Kondensmengden faller ved økende tilskudd.

3.1.5 Simuleringer

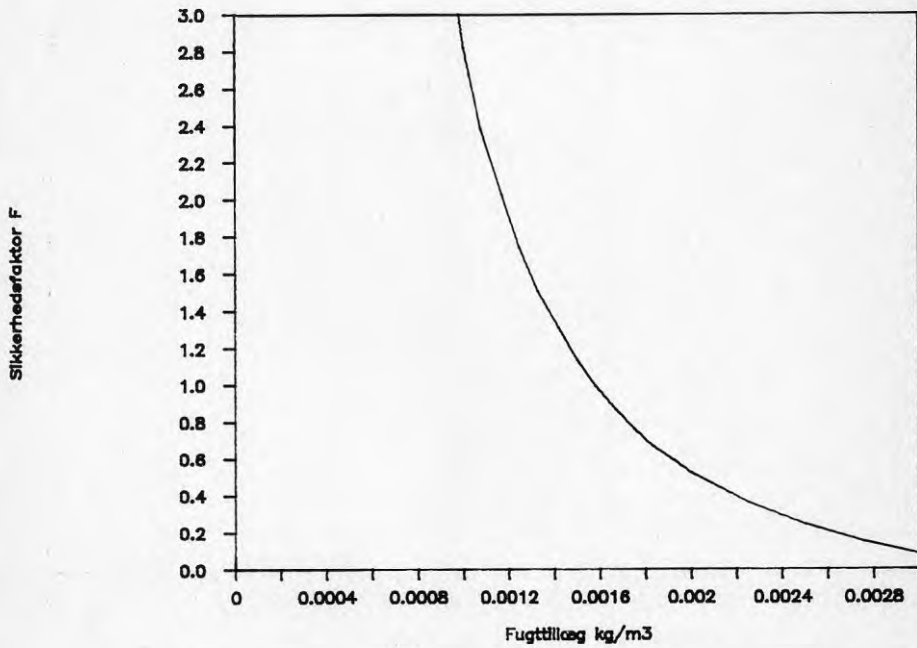
Det er med de tidligere beskrevne variasjonene foretatt 500 simuleringer hvor sikkerhetsfaktor, kondensmengde og uttørking er beregnet. For å undersøke betydningen av et annet klima, er tilsvarende beregninger foretatt for Oslo. Ytterligere beskrivelser av dette tilfellet finnes i Nielsen (1985a). Utetemperaturen er ca. 5°C høyere, og derfor vil sikkerhetsfaktoren bli høy i Oslo.

Figur 18 viser resultatene for både Oslo og Rørøs. For Rørøs vil 40% av tilfellene gi verdier under 1 og 65% under 2 i sikkerhetsfaktor. For Oslo vil 7% av tilfellene gi verdier under 1 og 18% under 2. Det er derfor en meget stor forskjell mellom de to tilfellene på grunn av klimaet.



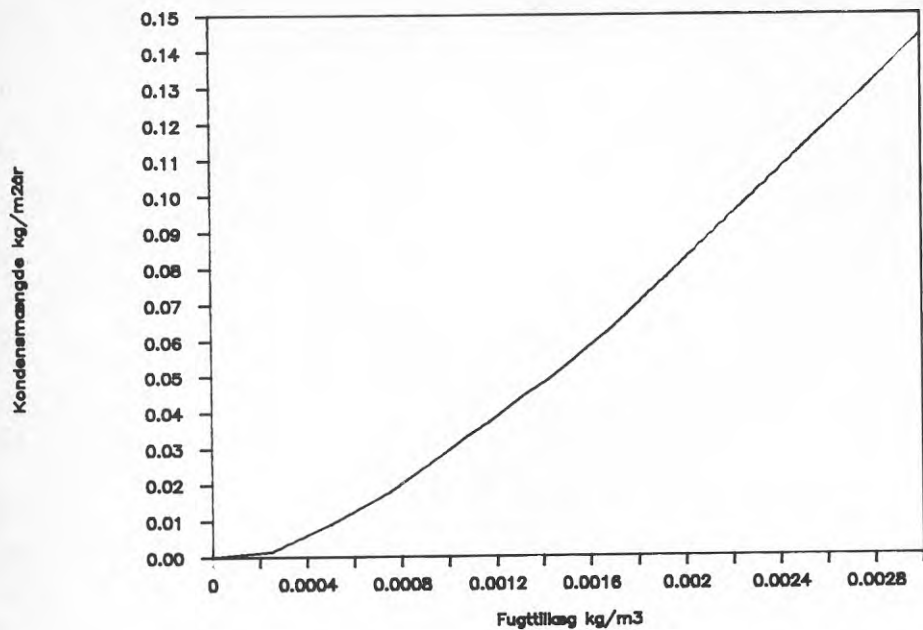
Figur 13.

Kondensmengde som funksjon av diffusjonstall for polystyren



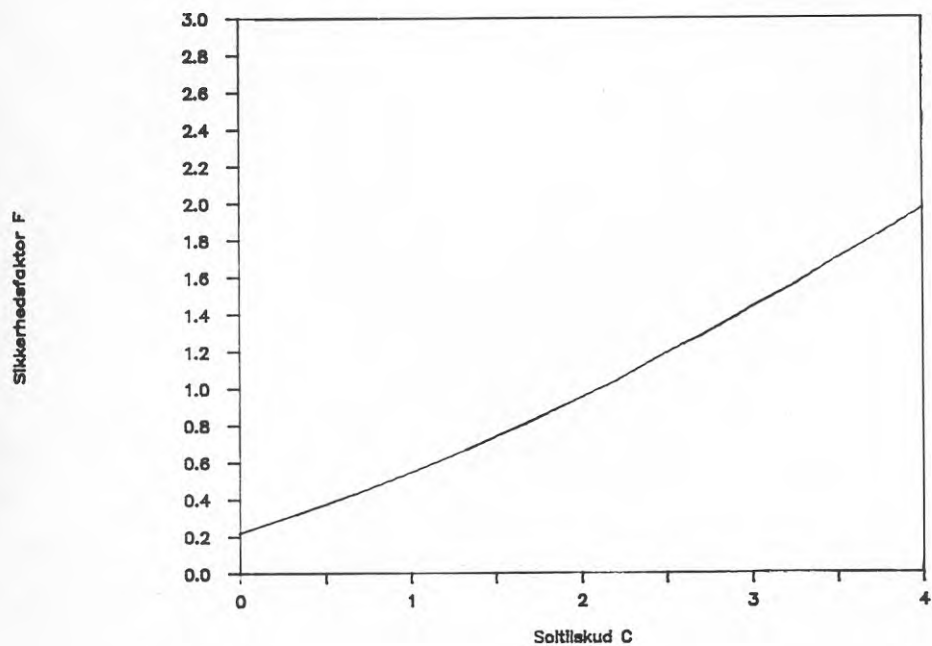
Figur 14.

Sikkerhetsfaktor som funksjon av inneluftens fukttilskudd



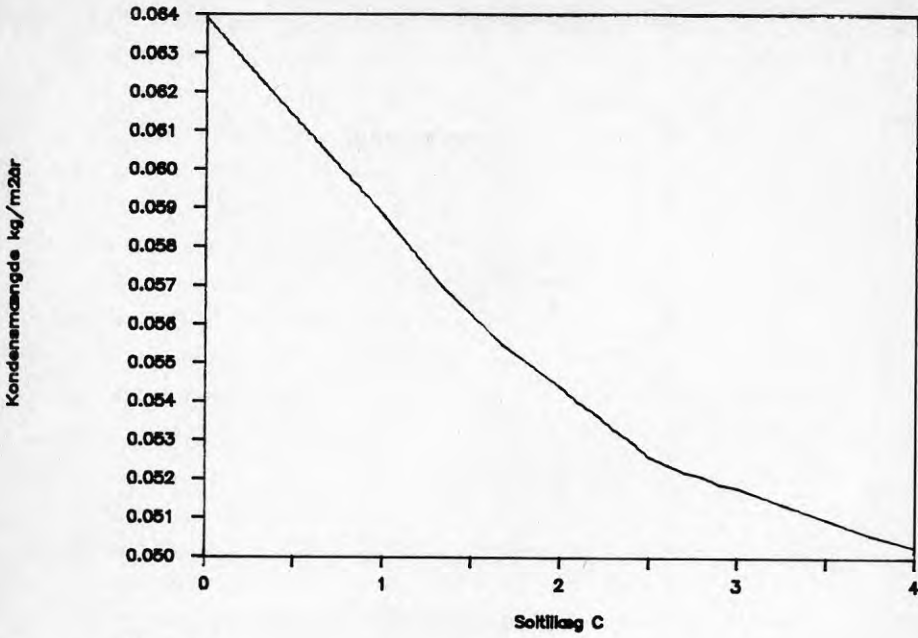
Figur 15.

Kondensmengde som funksjon av inneluftens fukttilskudd

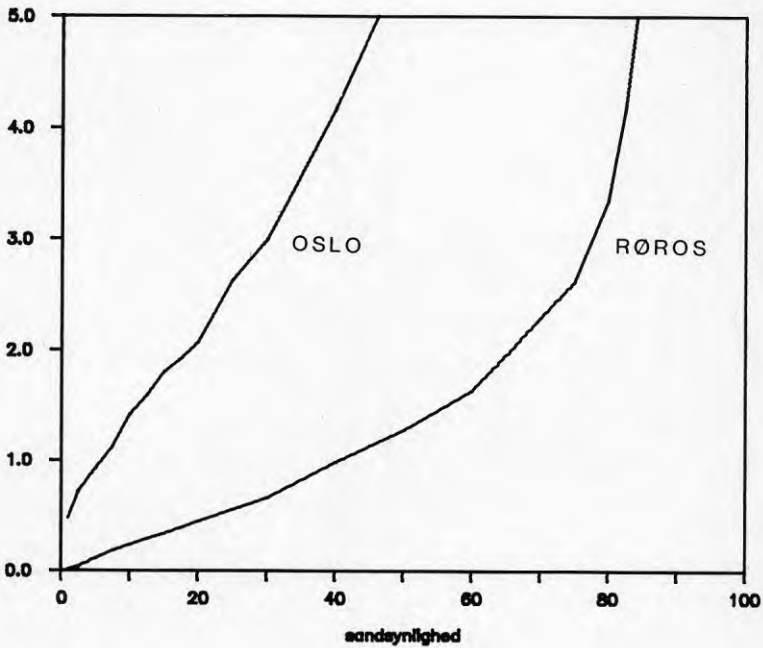


Figur 16.

Sikkerhetsfaktor som funksjon av søltilskudd



Figur 17.
Kondensmengden som funksjon av salttilskudd



Figur 18.
Sannsynligheten for en gitt sikkerhetsfaktor utregnet på grunnlag av 500 simuleringer for Oslo og Røros uteklime

Den meget høye sannsynligheten for sikkerhetsfaktorer under 1 for Røros ga anledning til å revurdere soltilskuddet. Den nye vurderingen tilsvarer at 15% av tilfellene har et tilskudd på mellom 1 og 4°C, 75% mellom 4 og 6°C og 10% mellom 6 og 8°C. Ytterligere beskrivelse av dette tilfellet kan finnes i Nielsen (1985a)

Figur 19 viser fordelingen av sikkerhetsfaktorer. Den nederste kurven er Røros med lavt soltilskudd, og den midterste er Røros med revidert soltilskudd. Dette har svært stor betydning, da antallet av verdier under 1 reduseres fra 40 % til 15 %. Den øverste kurven er verdiene fra Oslo med lavt soltilskudd. Her er ca. 7 % under 1. En ny beregning for Oslo med revidert soltilskudd er ikke gjennomført, men den ville sikkert redusere verdiene under 1 til 2 - 3 %.

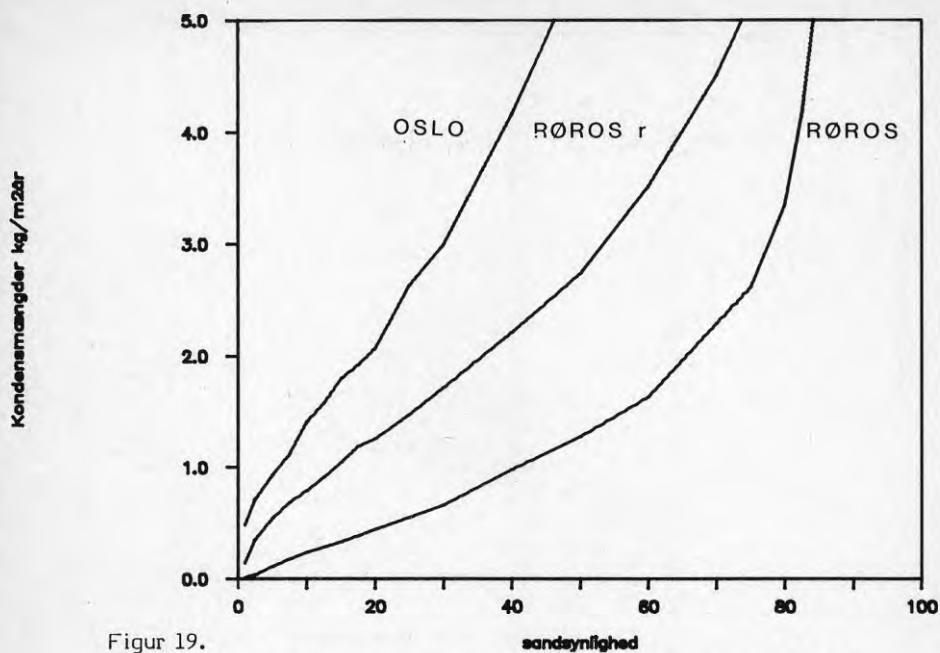
Figur 20 viser kondensmengdene i de tre tilfellene. Verdien kan komme opp i 220 g/m² og derved gi et middelfuktinnhold i polystyrenen på 7 % vekt. Det har ikke særlig stor betydning. Den nederste kurven er verdiene for Oslo. De to øverste er fra Røros med den høyeste svarende til lavt soltilskudd.

Figur 21 viser uttørkingen som kan komme opp i 500 g/m². Den øverste kurven er Oslo. De nederste er Røros med den laveste svarende til lavt soltilskudd.

3.1.6 Vurderinger

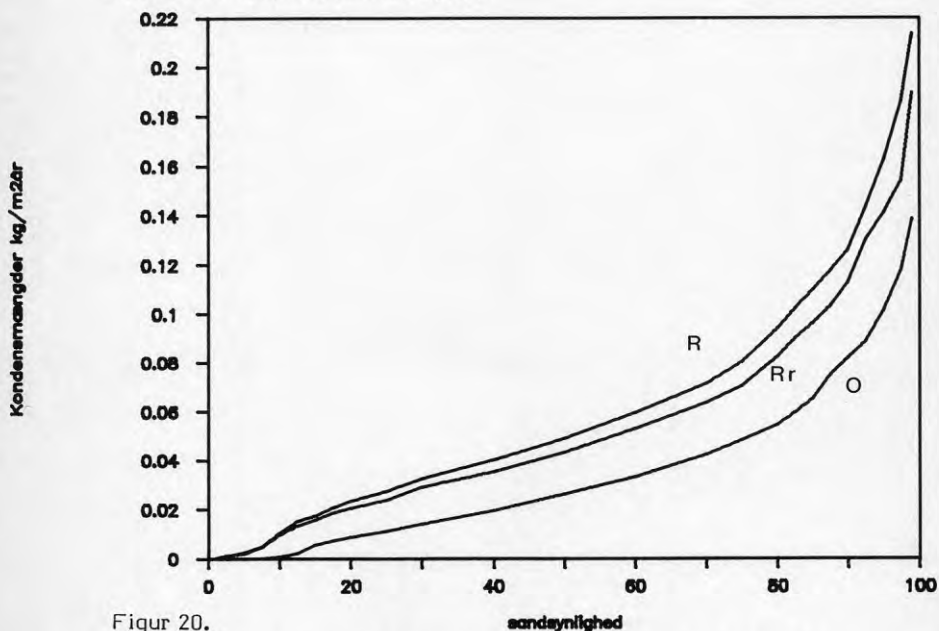
Den anvendte metoden for simulering gir muligheter for å vurdere kondensasjon, uttørking og forholdet mellom disse. Det er forholdsvis enkelt å gjennomføre simuleringen når modell og parametervariasjoner er kjent. Det kan sies å være risiko for fuktskader i to tilfeller:

1. Uttørkingen er mindre enn kondensasjonen, dvs. sikkerhetsfaktoren er mindre enn 1. Andelen kan finnes ved simulering et passende antall ganger. Bruk av verdien 1 som grense gir ingen ekstra sikkerhet i beregningen, men sikkerhet kan være innregnet ved å foreta en forsiktig vurdering av spredningen på parametrene. En annen mulighet er å anta en normal spredning på parametrene og i stedet kreve at sikkerhetsfaktoren skal være større enn f.eks. 2.
2. Kondensasjonen må ikke kunne medføre skader. Noen materialer som tre vil kunne skades på grunn av høyt fuktinnhold. Det er derfor viktig



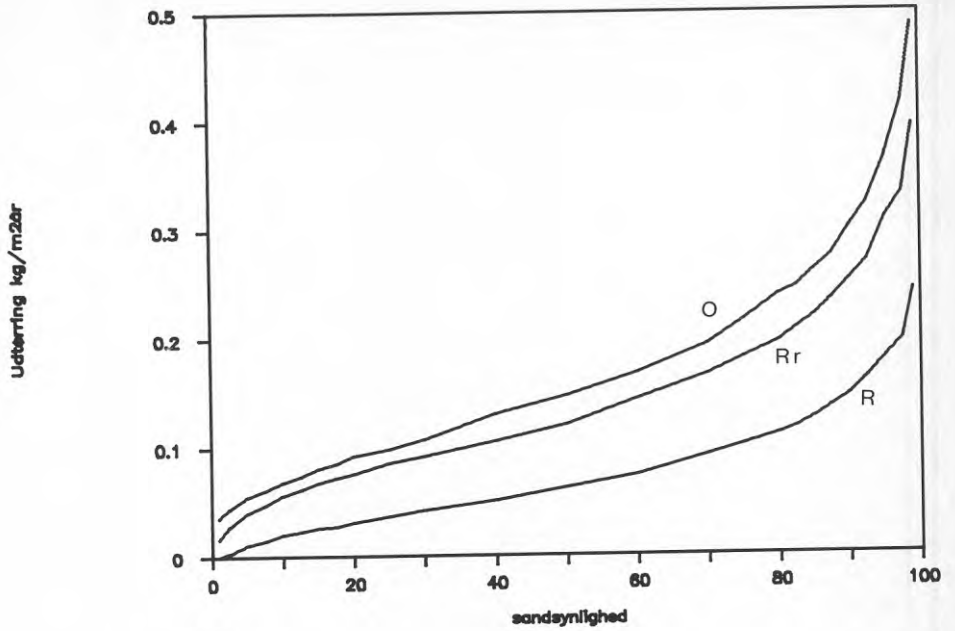
Figur 19.

Sannsynligheten for en gitt sikkerhetsfaktor for Rørøst uteklima med forskjellig vurdering av saltisakk. Den reviderte verdien gir større sikkerhet. Kurven for Oslo er også inntegnet.



Figur 20.

Sannsynligheten for en gitt kondensmengde for Rørøst uteklima med forskjellig vurdering av saltisakk. Den reviderte verdien gir mindre kondens. Kurven for Oslo er også inntegnet.



Figur 21.

Sannsynligheten for en gitt uttørkingsmengde for Røros uteklime med forskjellig vurdering av soltilskudd. Den reviderte verdien gir større uttørring. Kurven for Oslo er også inntegnet.

å finne fordelingen av kondensmengdene. Det er mulig at en del av tilfellene allerede er dekket ved at de inngår i gruppen med sikkerhetsfaktoren mindre enn 1, men det er ikke sikkert.

Anvendelsen av metoden krever kjennskap til variasjonen i de parametre som inngår. Det betyr at det blir mer nødvendig å kjenne normale variasjoner for inngående størrelse. Her er et klart behov for ytterligere målinger av dagens materialer.

De gjennomførte parameteranalysene viser at for den valgte konstruksjon er det nødvendig å kjenne en rekke størrelser bedre. Det er spesielt:

1. Uteklimaet

Her er det meget store forskjeller mellom Oslo og Røros, og det er helt nødvendig med beregninger fra flere steder. Det finnes i dag måleresultat fra Meteorologisk Institutt for en lang rekke steder. Disse opplysninger må overføres til bruk av simuleringer av denne typen.

2. Inneklimaet

Den avgjørende faktoren er her fukttilskudd til inneluften, som i litteraturen angis til 2 -4 g/m³. Det er svært ønskelig å få gjennomført undersøkelser i dagens boliger og andre bygninger for å få bedre informasjon om de virkelige variasjonene i et større antall bygninger. Etter analysene ser innetemperaturen ut til å ha liten betydning, men den kan være viktig hvis energisparinger skal vurderes.

3. Soltilllegg

Solinnfallet på konstruksjonen har stor betydning for sikkerhetsfaktoren. Størrelsen kan antakelig beregnes teoretisk, men er nok stadig usikker. Her har det også betydning at det i Norge finnes få stasjoner som måler solstråling. Verdiene er derfor normalt beregnet teoretisk ut fra skydekke.

I den her valgte konstruksjonen har materialegenskapene ikke særlig stor betydning, men i konstruksjoner hvor stor kondensering kan gi skader, vil diffusjonstall for materialer samt fuktmotstandstall for fuktsperre være viktige. Det er derfor helt nødvendig med større kjennskap til spredning av materialenes fukttekniske egenskaper.

3.2 Kondens i vegg

En massiv teglvegg med en tykkelse på 190 mm er pusset innvendig med gipsmørtel. Denne vegg er senere blitt ekstraisolert med 50 mm mineralull og 13 mm gipsplate på innsiden. Det er ikke satt inn noen dampsperre i konstruksjonen. Dette tilfellet stammer fra RILEM TC 35-PMB, hvor det ble foretatt sammenligninger mellom forskjellige beregningsmetoder for tilfellet.

Innetemperaturen ble satt til 20 °C, og utetemperaturen tilsvarte Trondheims klima, se tabell 1.

Den innvendige fuktigheten ble antatt enten 3 g/m³ eller 5 g/m³ over uteluftens fuktighet.

Tabell 1.

Uteklima for Trondheim

	Temperatur °C	Fuktighet g/m ³
Januar	-3,4	2,88
Februar	-2,9	2,92
Mars	-0,7	3,44
April	3,2	4,58
Mai	7,9	6,08
Juni	11,3	7,96
Juli	14,4	9,76
August	13,3	9,36
September	9,5	7,54
Oktober	5,1	5,61
November	1,5	4,30
Desember	-1,0	3,54

3.2.1 Beregningsmetode

Fukttransporten og kondensmengden ble beregnet med diffusjonsmetoden som ble nærmere beskrevet i avsnitt 2.1.1. Beregningene ble foretatt for hver måned, og de beregnede fuktmengdene ble deretter summert.

I de første beregningene ble det brukt:

Diffusjonstall	tegl	$2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
	mørtel	$3,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
	mineralull	$2,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Fuktmotstand	gipsplate	3000 s/m

For å ta hensyn til solinnstrålingen ble det regnet med en ekvivalent utetemperatur som på grunn av innstrålingen er høyere enn den rene utelufttemperaturen. F.eks. blir temperaturen i juni hevet fra 11,3 °C til 15,3 °C.

Med de tidligere gitte tallverdiene og et fukttilskudd på 5 g/m³ blir kondensmengden på årsbasis 5,1 kg/m². Kondensasjonen skjer på gipsmørtelen. Under forutsetningen av at fukten befinner seg samme sted om sommeren, kan uttørkingen beregnes til 2,0 kg/m³. På årsbasis er det en kondensmengde på 3,1 kg/m³. Sikkerhetsfaktoren (F) - forholdet mellom uttørking og kondensmengde - blir 0,39. I praksis vil kapillarsuging i mørtel og tegl medføre en endret fordeling av fukten.

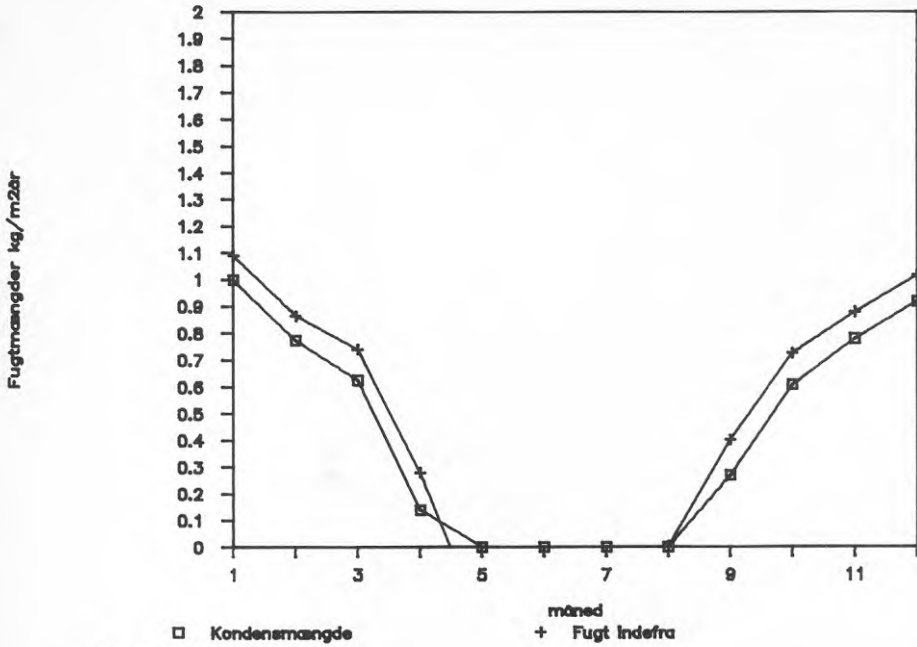
Figur 22 viser kondensmengdene for standardtilfellet og fuktmengden som blir transportert inn i taket nedenfra hver måned. Kondensmengden er mindre enn fukt-transporten, idet det tas hensyn til takdekningens fuktmotstand. Man ser at mulighetene for uttørking er til stede fra mai til august. Figur 23 viser relativ fuktighet i konstruksjonen. Like over takdekningen utvendig svinger verdiene mellom 60 og 75 %.

Den innvendige fuktigheten varierer på grunn av uteluftens fuktighet og fukttilskuddet. Minimum er 45 % om vinteren og maksimum er 85 % om sommeren. Den viste kurven viser relativ fuktighet ved kondenspunktet - gipsmørtelens innerside. I vinterperioden med kondensasjon fås 100 %, mens verdiene om sommeren faller til 90 %.

Figur 24 viser fuktbalansen over året. Når starten er ved 0 den første januar, når man et maksimum i april med 2,6 kg/m³. Deretter skjer en uttørking ned til 0,6 kg/m³ i august, og atter en stigning. På årsbasis stiger fuktinnholdet i konstruksjonen med 3,1 kg/m³.

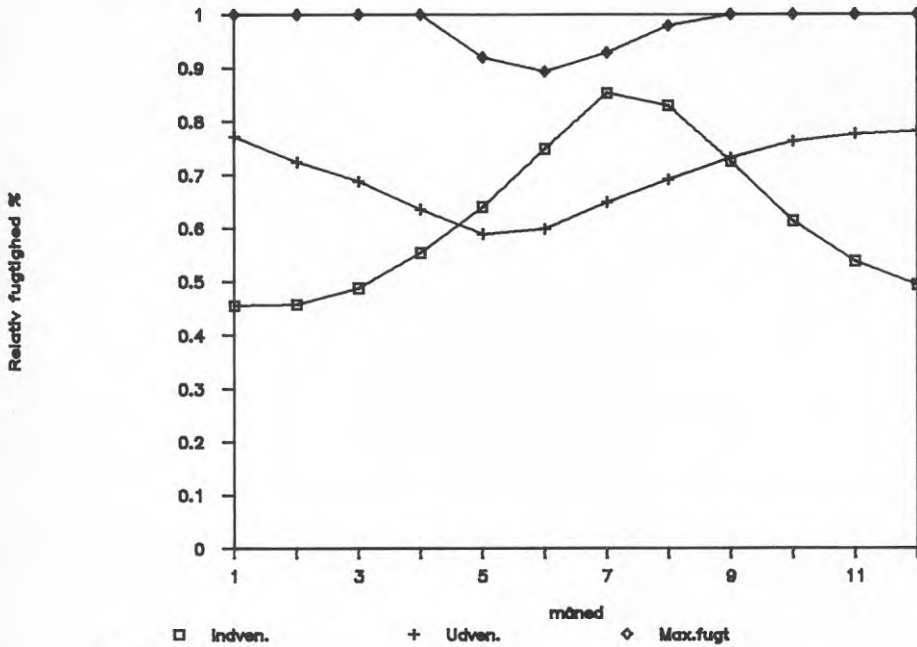
3.2.2 Parametervariasjoner

For tilfellet med et fukttilskudd på 5 g/m³, er det beregnet hvilken betydning variasjon i en rekke parametre har. Ut fra de tidligere eksemplene er det valgt å variere diffusjonstallet for teglsteinene, fuktmotstanden for gipsplate, fukttilskuddet og utetemperaturen.



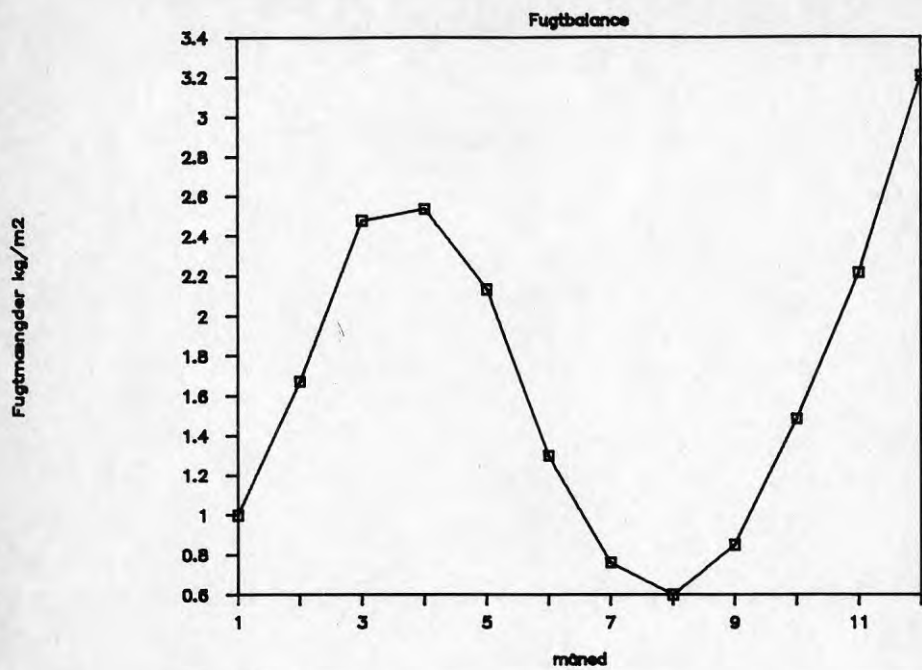
Figur 22.

Kondensmengder og fukttransport innefra i en innvendig etterisolert teglvegg med data gitt i avsnitt 3.2.1



Figur 23.

Relativt fuktighet innvendig, utvendig og ved kondenspunktet (med høyest relative fuktighet) for teglvegg med etterisolering



Figur 24.

Fuktbalanse for teglvegg med innvendig etterisolering

Diffusjonstall	Kondensmengde	Uttørking	F
Teglstein	kg/m ²	kg/m ²	
2,0 · 10 ⁻⁶ m ² /s	5,2	1,8	0,35
2,4 · 10 ⁻⁶ m ² /s	5,1	2,0	0,39
3,6 · 10 ⁻⁶ m ² /s	4,6	2,3	0,50

Diffusjonstallet for teglstein har mindre betydning for den kondenserende mengden idet det blir variasjoner i kondensmengden på bare ca. 10 % innenfor det interessante intervallet. Uttørkingen og sikkerhetsfaktorene viser også små variasjoner. Det skal en meget stor endring til i diffusjonstallet for å få en sikkerhetsfaktor over 1.

Fuktmotstand	Kondensmengde	Uttørking	F
Gipsplate	kg/m ²	kg/m ²	
1000 s/m	8,5	2,7	0,31
2000 s/m	6,4	2,2	0,35
3000 s/m	5,1	2,0	0,39
4000 s/m	4,1	1,8	0,43

Fuktmotstanden for gipsplater kan gi store utslag på kondensmengde og uttørking. Til gjengjeld endres sikkerhetsfaktoren bare litt. Det ses at en dårlig innvendig tetning -tilsvarende en lav diffusjonsmotstand - vil gi store kondensmengder.

Fukttilskudd	Kondensmengde	Uttørking	F
g/m ³	kg/m ²	kg/m ²	
3	0,0	8,2	> 5
4	1,8	4,4	2,4
5	5,1	2,0	0,39
6	9,1	0,4	0,04

Disse resultatene viser at fukttilskuddets størrelse har meget stor innflytelse på alle størrelser.

Utetemperatur	Kondensmengde	Uttørking	F
soltilskudd	kg/m ²	kg/m ²	
uten	8,2	0,0	0
normalt	5,1	2,0	0,39
maksimalt	4,1	6,6	1,61

For tilfellet uten soltilskudd regnes utetemperaturen uten korreksjoner. Dermed fås dobbel så stor kondensmengde som når det tas hensyn til innstrålingen, og ingen uttørking. Sikkerhetsfaktoren blir sterkt avhengig av innstrålingen på veggen.

3.2.3 Simuleringer

For å kunne vurdere variasjoner i praksis fra en slik beregning hvor de enkelte størrelsene ikke er særlig godt kjent, er det foretatt en simulering med tre variable parametre.

1. Fukttilskudd til inneluften

Her er valgt verdier mellom 2 og 6 g/m³ med samme sannsynlighet for alle verdier. Intervallet som bygger på typiske verdier for boliger, har vært 2 til 4 g/m³, men i dag må det forventes høyere verdier på grunn av tettere hus. Et intervall fra 2 til 6 g/m³ kan derfor være en rimelig fordeling.

2. Utetemperaturen

Her regnes et intervall mellom den normale utetemperaturen og en ekvivalent utetemperatur hvor det tas fullt hensyn til solinnstrålingen. Overtemperaturen varierer f.eks. fra 0 til 8 °C i juni. Verdiene er avhengig av solstrålingen de enkelte månedene. I praksis vil verdiene kunne variere i dette intervallet på grunn av bygningens orientering og overflate. Det regnes med samme sannsynlighet for enhver verdi i intervallet. Det valgte forholdet mellom minimum og maksimumsverdi brukes i samtlige måneder. Det gunstigste tilfellet vil være med ekvivalent utetemperatur som gir høyeste overflatetemperatur.

3. Fuktmotstand for gipsplaten

Det velges verdier mellom 1500 og 4000 s/m. Fra litteraturen finnes typiske verdier på 3000 til 4000 s/m, men disse verdiene er målt på platestykker, så det tas ikke hensyn til skjøter og utførelse i praksis. Dette vil ha en tendens til å gi lavere verdier, så 1500 s/m er valgt som nedre grense. Det regnes med samme sannsynlighet for alle verdier i intervallet. Det gunstigste tilfellet er en høy fuktmotstand.

Det er som tidligere nevnt en forutsetning at de parametrene som simuleres er uavhengig av hverandre. Det vil være oppfylt i dette tilfellet. Simulering er foretatt ved bruk av en tabell over tilfeldige valgte tall.

For hvert tilfelle er det valgt tre tilfeldige tall - et for hvert av de tre parametrene. Beregningene er foretatt i et regneark hvor også alle resultatene er plassert for senere uttegnning.

Figur 25 og 26 viser et eksempel hvor det på årsbasis er uttørking av konstruksjoner. Figurene kan sammenlignes med nr. 23 og 24, som viste et tilfelle med kondens på årsbasis.

I det følgende ses først på kondensasjon og deretter på fuktbalansen og sikkerhetsfaktoren.

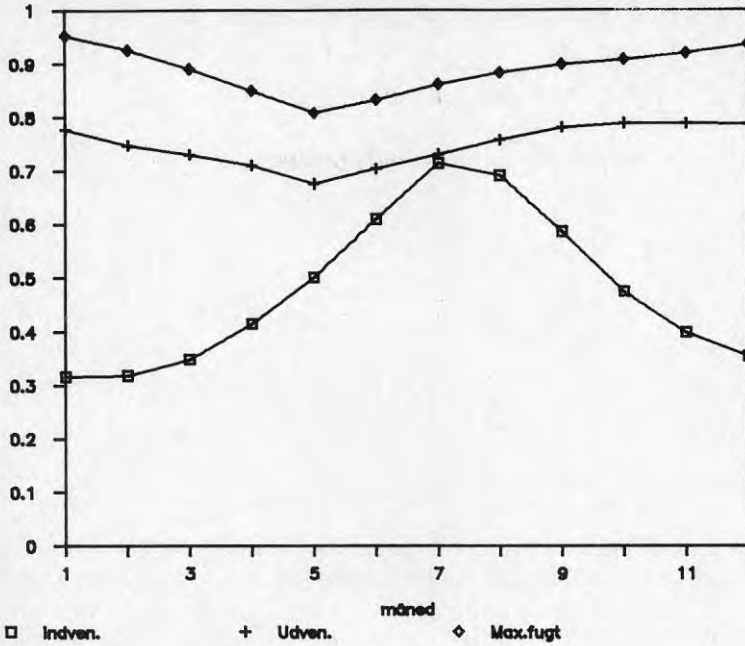
Figur 27 viser den årlige kondensasjonen i kg/m^2 for 200 tilfeller i den tilfeldige rekkefølgen de ble beregnet. Verdiene ser som forventet tilfeldige ut.

Figur 28 viser de samme verdiene som i foregående figur, men nå sortert innen opptegningen. Hermed kan man se at i 60 tilfeller eller 30 % vil det ikke være kondensasjon i veggen. I 50 % av tilfellene vil kondensasjonen være mindre enn 2 kg/m^2 . I 75 % vil kondensasjonen være mindre enn 5 kg/m^2 . For 10 % av tilfellene vil kondensasjonen overskride 9 kg/m^2 . Resultatene kan også sorteres etter de parametrene som inngår. Dette er skjedd i de neste figurene.

Figur 29 viser kondensasjonen i avhengighet av temperaturen i juni. Den laveste verdien tilsvarer utetemperaturen uten korreksjon for solstrålingen. Den høyeste til full korreksjon tilsvarer $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Man ser ikke noen klar sammenheng mellom temperatur og kondensmengde.

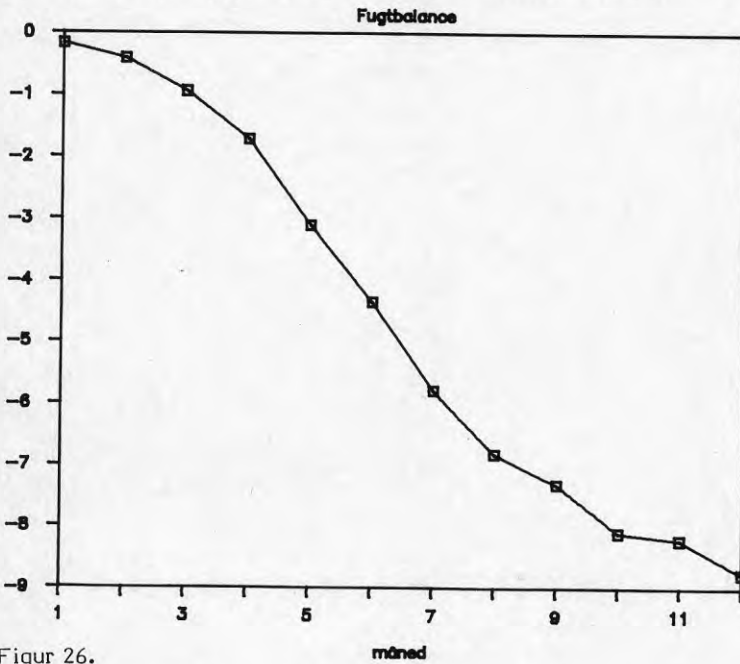
Figur 30 viser kondensasjonen i avhengighet av gipsplatens fuktmotstand. Det er meget stor spredning i resultatene og ikke noen entydig sammenheng.

Figur 31 viser kondensasjonen i avhengighet av fukttilskuddets størrelse. Her ses en meget tydelig avhengighet, idet det under ca. 3 g/m^3 ikke forekommer kondensasjon. Over denne verdien stiger kondensmengden i klar avhengighet av fukttilskuddet. Men samtidig blir spredningen større. Det er mulig å tegne opp en kurve av minimumsverdiene og en av maksimumsverdiene hvor alle verdiene finnes.



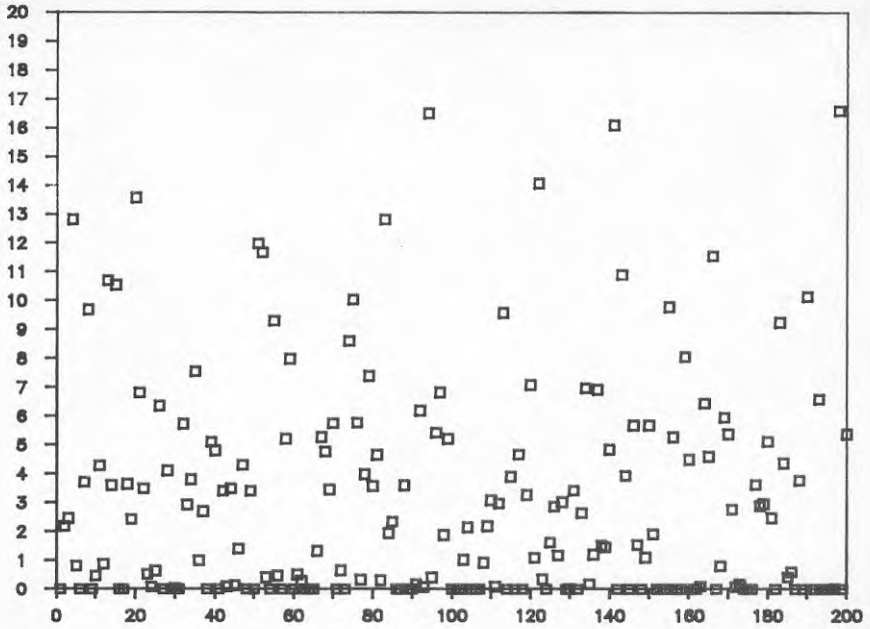
Figur 25.

Relativ fuktighet innvendig, utvendig og ved kondenspunktet for teglvegg med etterisolering. Ett av de 200 simulerte tilfellene



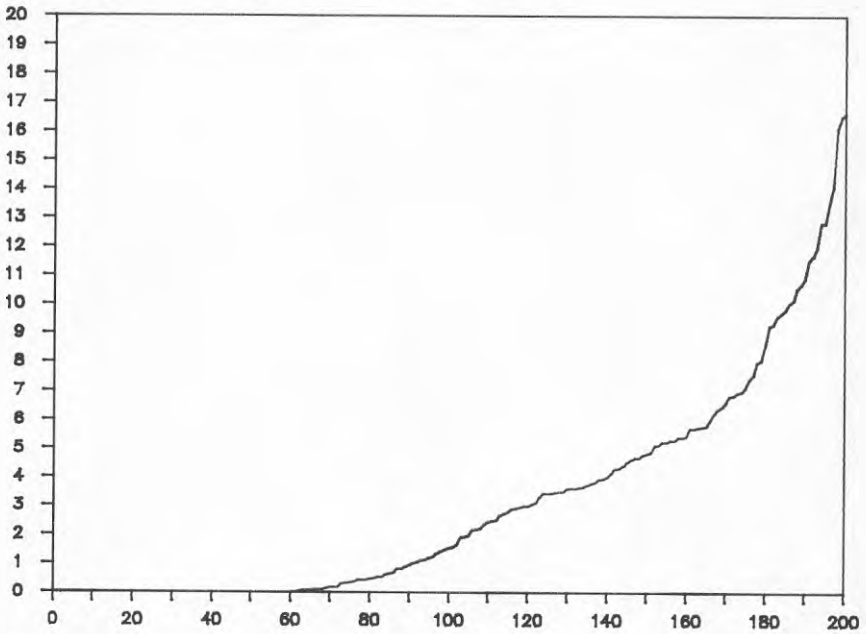
Figur 26.

Fuktbalanse for teglvegg med innvendig etterisolering. Simulert tilfelle med uttørking på årsbasis



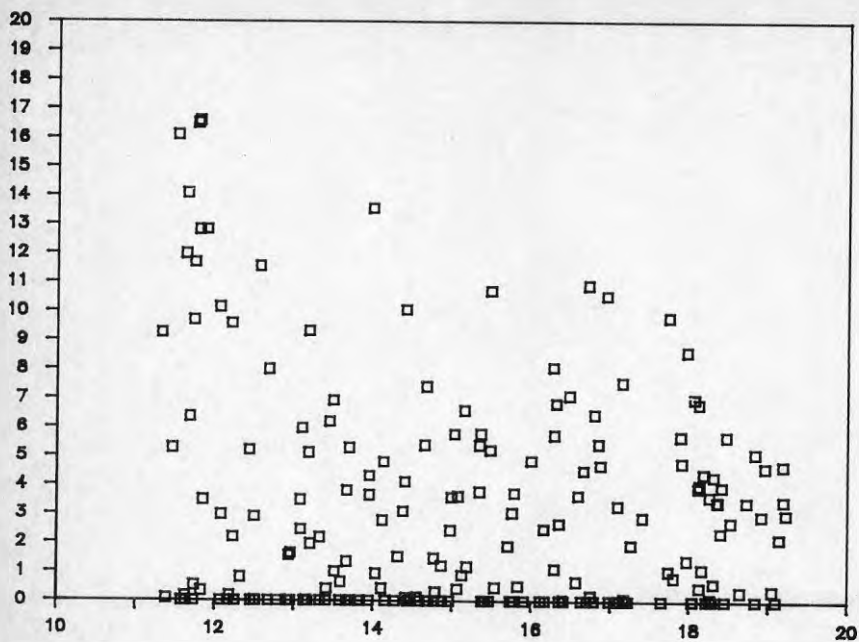
Figur 27.

Simulering av fukt i etterisolert vegg. Den årlige kondensmengden er opptegnet i avhengighet av simuleringsrekkefølgen.



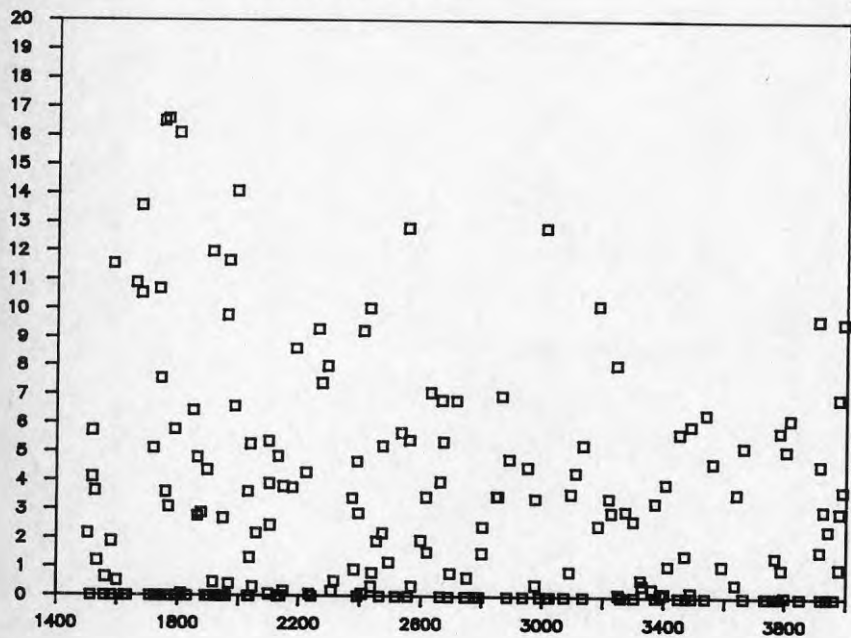
Figur 28.

Simulering av fukt i etterisolert vegg. Den årlige kondensmengden er sortert etter størrelse.



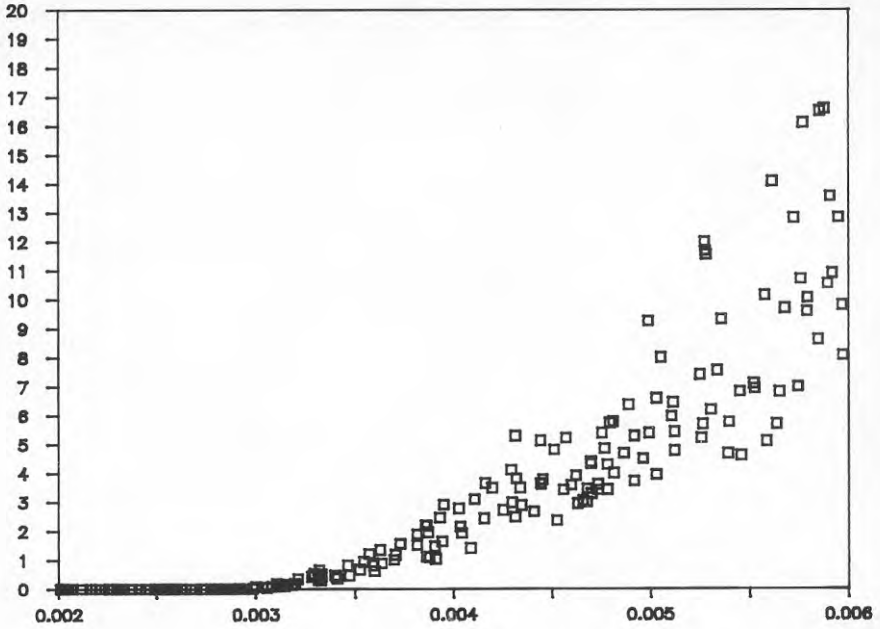
Figur 29.

Simulerte verdier for kondensasjon i en teglvegg i avhengighet av den ekvivalente utetemperaturen i juni



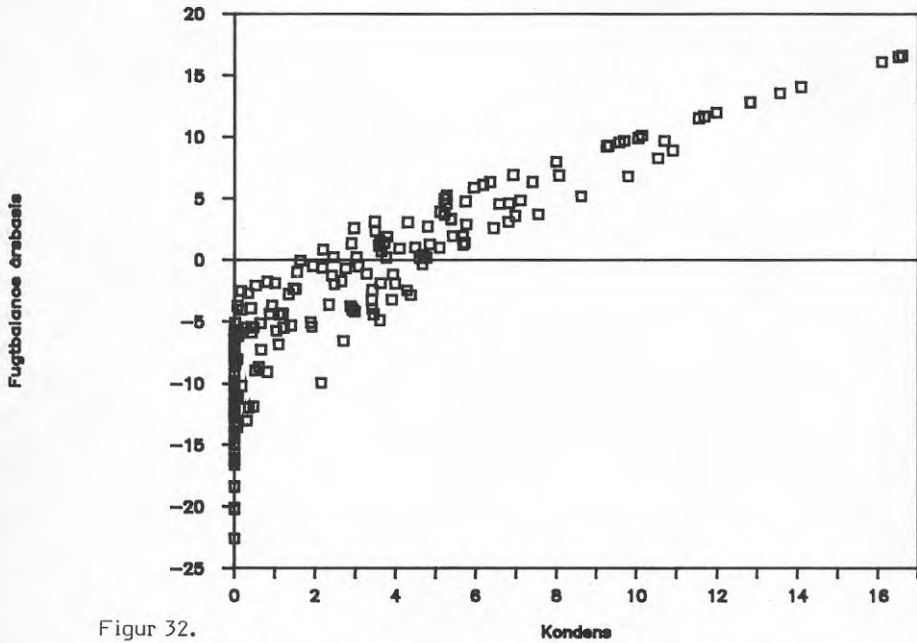
Figur 30.

Simulerte verdier for kondensasjon i en teglvegg i avhengighet av den innvendige gipsplatens fuktmotstand



Figur 31.

Simulerte verdier for kondensasjon i en teglvegg i avhengighet av fukttilskuddet til inneluften



Figur 32.

Sammenligning mellom kondensmengden og fuktbalansen på årsbasis, sortert på grunnlag av kondensmengdens størrelse. Øverste kurve er kondensmengden og nederste er fuktbalansen.

Figur 32 viser en sammenligning av kondensmengden og fuktbalansen. Forskjellen mellom kurvene er et uttrykk for den mulige uttørkingen i sommermånedene, under forutsetning av at fukten finnes samme sted. Ved de største kondensmengdene er uttørkingen praktisk talt 0, men uttørkingen økes ved lavere kondensmengder. Det er ikke noen entydig sammenheng mellom kondensmengden og fuktbalansen.

Figur 33 viser sammenhengen mellom kondensmengde og fuktbalanse. Er kondensasjonen mindre enn 3 kg/m^3 , blir fuktbalansen nesten alltid negativ, tilsvarende en uttørking. Man ser at i de gunstigste tilfellene ville det kunne skje en uttørking på $10\text{-}20 \text{ kg/m}^2$ på et år.

Figur 34 viser sikkerhetsfaktoren (F), som er forholdet mellom uttørkingen og kondensasjonen. For halvparten av alle tilfellene er F større enn 3. For 65 % er F større enn 1. Det er derfor bare 35 % av tilfellene hvor kondensasjonen ikke kan tørke ut.

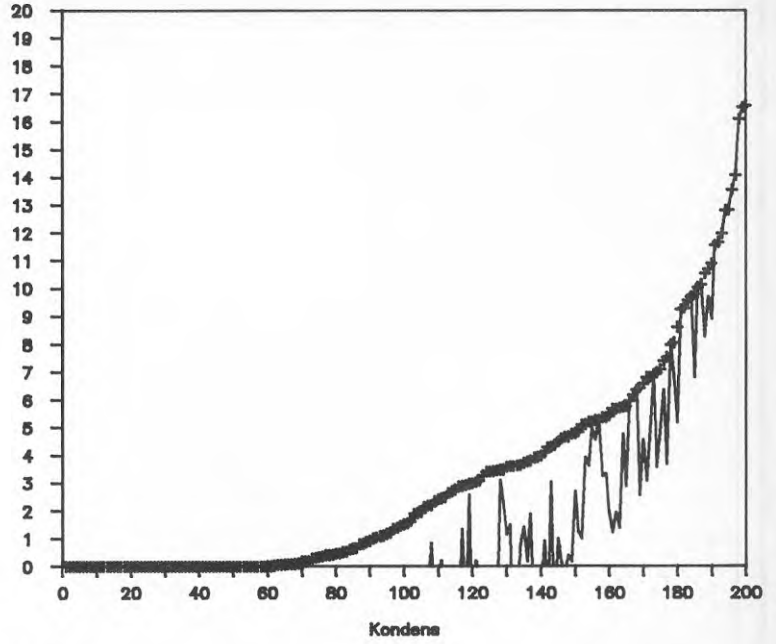
Opptegninger av sikkerhetsfaktorens avhengighet av temperatur, gipsplatens fuktmotstand og fukttilskuddet viser samme sammenheng eller mangel på samme som allerede er vist for kondensmengden. Den avgjørende størrelsen er fukttilskuddet. Dette kan vises i følgende tabell.

Fukttilskudd mindre enn g/m^3	Antall tilfeller med kondens		Alle tilfeller
	antall	%	antall
3	0	0	61
4	3	3	104
5	29	19	154
6	70	35	200

Er fukttilskuddet under 4 g/m^3 , er det kun 3 % sannsynlighet for at fukten ikke kan tørke ut på årsbasis. Er fukttilskuddet under 5 g/m^3 , øker sannsynligheten til 19 %, idet det er ca. 50 % sjanse for at et tilfelle med fukttilskudd mellom 4 og 5 g/m^3 ikke har en sikkerhetsfaktor på over 1.

For å undersøke om simuleringen med 200 tilfeller var tilstrekkelig til å beskrive forholdene, er det foretatt en ny simulering med 500 tilfeller med andre tilfeldige tall.

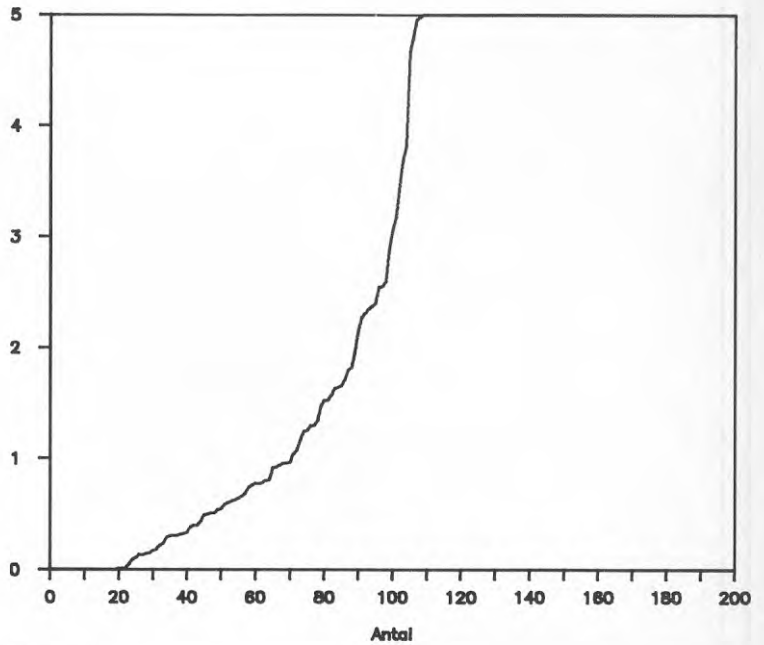
Fugtbalance årbaseis



Figur 33.

Sammenhengen mellom fuktbalansen og kondensmengden

Sikkerhetsfaktor



Figur 34.

Sikkerhetsfaktorens fordeling for de 200 simuleringene

Resultatene er:

Fukttilskudd mindre enn g/m ³	Simuleringer	
	200 tilfeller % med kondens	500 tilfeller % med kondens
3	0	0
4	3	3
5	19	16
6	35	36

Det er god overensstemmelse mellom de to simuleringene, så alt tyder på at 200 tilfeller er tilstrekkelig for denne typen beregninger.

3.2.4 Vurderinger

Resultatene av parameteranalyse og simulering viser at i dette tilfellet er det viktigste parameteret fukttilskuddet til inneluften. Holdes denne verdien tilstrekkelig lav, under 4 g/m³, vil de øvrige parametrene ikke ha noen betydning. I praksis er forholdene nok gunstigere, idet alt tyder på at fukttilskuddet ikke er konstant over hele året, minst om sommeren bl.a. på grunn at bedre utlufting. Dette vil kunne øke uttørkingsmulighetene for sommerperioden. Fukttilskuddet kan i praksis holdes lavt ved å ha en lav fuktproduksjon i bygningen og en passende stor ventilasjon. Dessuten er den valgte konstruksjonen ikke særlig fuktfølsom, idet fukten som kondenseres kan suges opp av gipsmørtel og murverk. Det kunne oppstå problemer med treverk som skal holde gipsplatene på plass, men dette motvirkes ved å bruke impregnert tre eller sikre en god tetting av alle samlinger mellom gipsplatene. Men i mange tilfeller vil dessuten en innvendig dampspærre bli satt opp mellom gipsplater og varmeisolering, og dermed gi større sikkerhet. Ved en korrekt utførelse vil veggen ikke gi spesielle problemer, men det skal kort nevnes at for en sydvendt vegg med sterk sol og slagregn, kan fukten under sommerforhold bevege seg utenfra og kondensere på baksiden av en eventuell dampspærre.

3.3 Fuktoppsuging

Det regnes på fuktoppsuging i teglsten i forbindelse med fri vannoverflate. Det regnes med homogene stein, og det tas ikke hensyn til fuger. Dette tilfellet skiller seg ut fra de to tidligere ved å behandle et mer teoretisk

tilfelle, hvor det med alminnelige statistiske metoder ikke har vært mulig å vurdere hvor stor innflytelse variasjonene i diffusiviteten for teglmaterialet har på fuktfordelingen.

3.3.1 Beregningsmetode

Beregningen av fuktfordelingene i tegl foretas med metoden beskrevet i avsnitt 2.1.2. Forutsatt at materialets diffusivitet er kjent i avhengighet av fuktinnholdet, kan fuktfordelingene regnes ut til forskjellige tidspunkter.

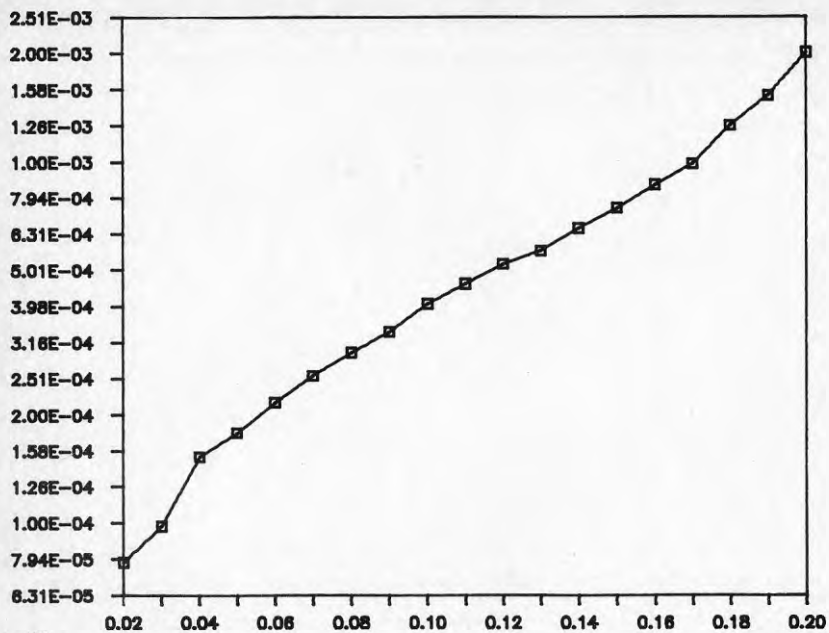
3.3.2 Diffusiviteten for tegl

Teglmaterialets diffusivitet er tatt fra målinger utført ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, Nielsen (1976). Her ble det foretatt en rekke målinger av fuktfordelinger med bruk av gammastråling, avhengig av tiden. Teorien finnes nærmere beskrevet i Nielsen (1974). Det ble målt på alminnelig teglstein som ble tilfeldig valgt. På grunnlag av fuktfordelingen ble diffusiviteten beregnet avhengig av fuktinnholdet. For beregningen ble det brukt data for gule teglstein med densitet på ca. 1800 kg/m^3 . Startfuktinnholdet er 2 % vol og maksimalfuktinnholdet er 20 % vol ved oppsuging. Brukes vakuutfylling, kan fuktinnholdet nå ca. 23 %. Diffusivitetskurven ses i figur 35. Med denne kurven er det i figur 36 utregnet fuktfordelinger til forskjellige tidspunkter.

3.3.3 Parametervariasjoner

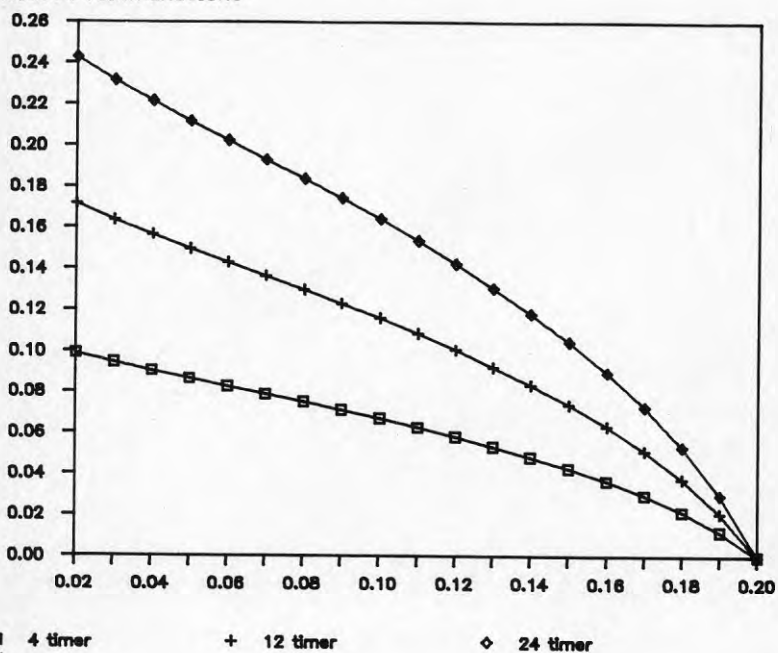
Bestemmelsen av diffusiviteten ut fra målinger av fuktfordelinger er beheftet med en vesentlig usikkerhet som ikke fremgår tydelig av resultatene fra Nielsen (1976), da det ennå ikke er foretatt en grundig usikkerhetsberegning.

I dette tilfellet er det valgt å gå ut fra den tidligere viste kurven og anta at verdiene kan variere fra 50 % lavere til 50 % høyere enn middelverdien. Mellom disse grensene er sannsynligheten den samme for hver verdi. Det antas at diffusiviteten ved forskjellig fuktinnhold er uavhengige. Det betyr at det kreves 20 forskjellige tall for hver kurve når det benyttes inn-delinger med sprang på 1 % vol. Resultatet av denne genereringen er en sagtakket kurve. Figur 37 viser en opptegning av 5 diffusivitetskurver. De tilsvarende beregnede fuktfordelingene etter 24 timer er vist i figur 38.



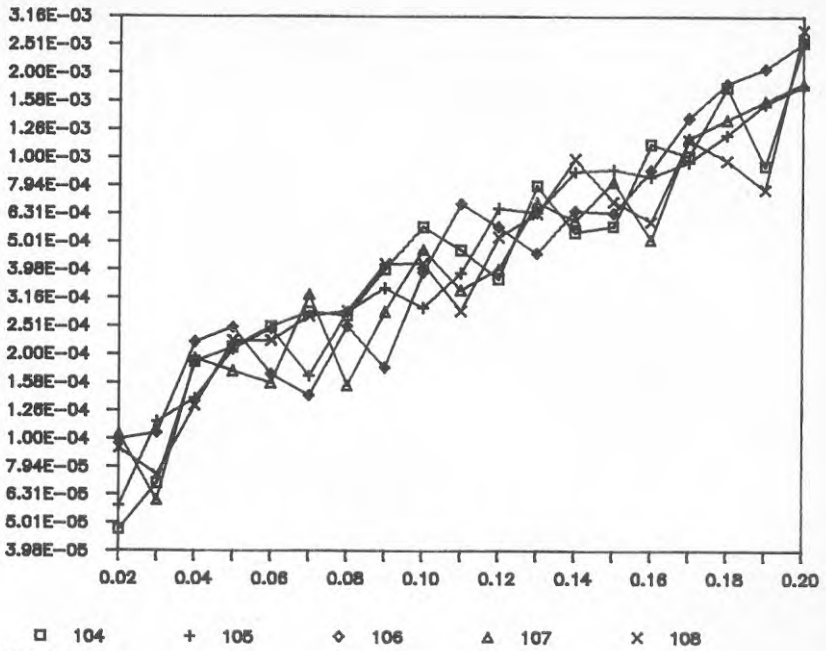
Figur 35

Diffusiviteten (m²/s) for teglsten i avhengighet av fuktinnholdet i volumandelene



Figur 36.

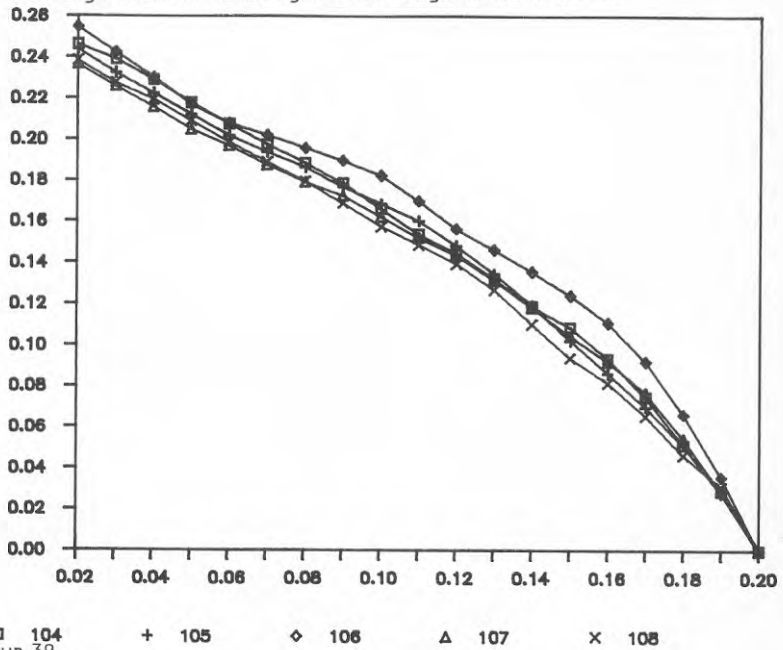
Fuktfordelinger i teglsten etter væskeoppsugning fra vannoverflate på tre tidspunkter. Y-aksen angir sted (m) i stenen målt fra vannflaten. X-aksen angir fuktinnholdet.



Figur 37.

Fem tilfeldig utvalgte simulerte diffusivitetskurver for teglsten.

Y-aksen angir diffusiviteten og X-aksen angir fuktinnholdet.



Figur 38.

Utregnete fuktfordelinger etter 24 timers vannoppsuging for de fem stenene som det er gitt diffusiviteter for i figur 37. Y-aksen angir sted og X-aksen fuktinnhold.

3.3.4 Simuleringer

Utvelgelsen av tilfeldige diffusivitetskurver er foretatt 200 ganger. Figur 39 viser beregnet middelværdi av diffusiviteten, samt maksimum og minimum for de 200 simuleringer. I samme figur er også inntegnet diffusiviteten fra figur 35 og verdier tilsvarende 0,5 ganger og 1,5 ganger denne diffusivitet.

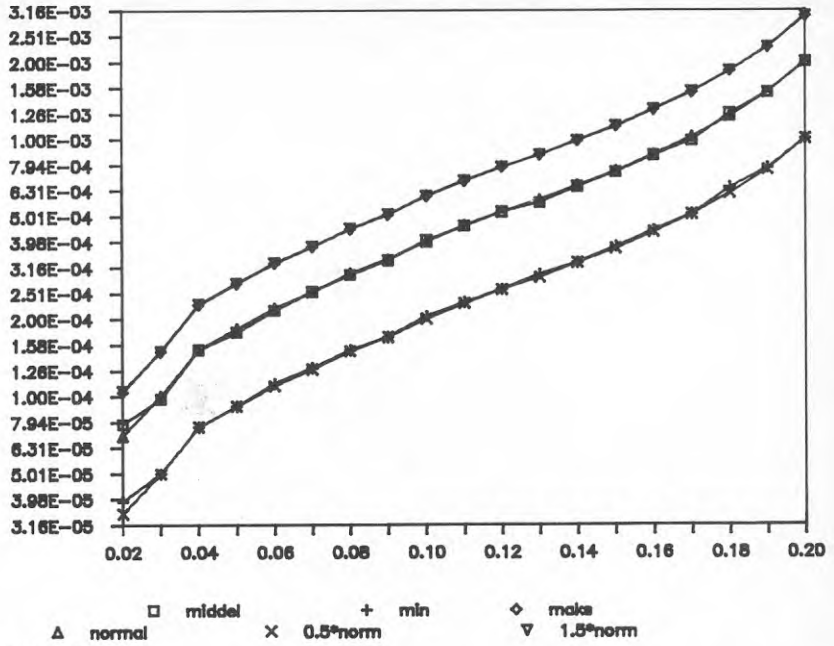
Såfremt de 200 simuleringene er virkelig tilfeldige skal middelværdi tilsvare middelkurve og dessuten grensekurvene til hverandre. Dette er tydelig tilfellet. Merk at avstanden i figuren fra middelkurven til maksimumskurven er mindre enn avstanden fra middelkurven til minimumskurven på grunn av at y-aksen har en logaritmisk skala.

Figur 40 viser de beregnede fuktfordelingene etter 24 timer i form av middelværdi og maksimum og minimum. For maksimum- og minimumskurvene gjelder at disse ikke utgjøres av et bestemt tilfeldig kurve-nummer, men det kan være stumper fra flere kurver. Man ser at middelkurven praktisk talt svarer til den som ble funnet i figur 36. For yttergrensene ser man at en beregning med alle diffusiviteter som minimum gir en langsommere oppsuging enn minimum av de 200 simuleringene, spesielt hvis fuktinnholdet er lavere enn ca. 14 %. Dette henger sammen med at det er meget usannsynlig at alle diffusiviteter i en kurve er lik den minste verdien. Tilsvarende forhold gjør seg gjeldende for maksimumskurvene.

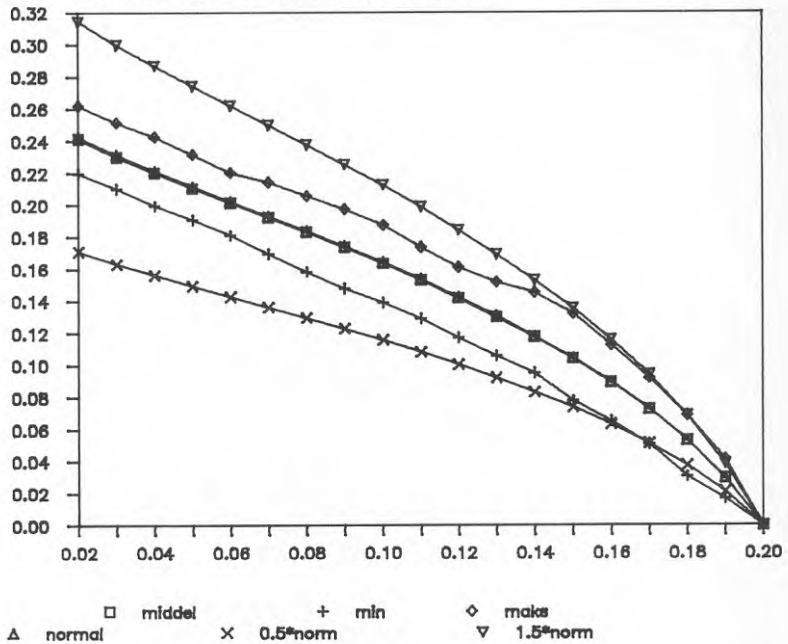
3.3.5 Vurderinger

Simulering av diffusivitet med tilfeldige tall gir mulighet for å vurdere hvilken spredning som vil forekomme på fuktfordelingene som måtte følge av dette. Som man ser vil en beregning med yttergrensene - i dette tilfellet med 0,5 og 1,5 gange normalkurven, gi en for stor spredning på resultatene. Det er også mulig å beregne fraktiler på grunnlag av simuleringene. Hermed kan det sies noe om sannsynligheten fra avvikelse fra middelkurven.

Beregningsmetoden kan benyttes til å vurdere hvor stor spredning det må være på diffusiviteten for å forklare spredningen på fuktfordelingene.



Figur 39. Utregnede minimum, maksimum og middelværdier for 200 simuleringer av diffusiviteter. Dessuten er inntegnet normalkurven fra figur 35 samt kurver for 0,5 og 1,5 ganger normalkurven.



Figur 40. Beregnede minimum, maksimum og middelværdier for 200 simuleringer av fuktfordelinger etter 24 timer. Dessuten er kurver for normaldiffusivitet og 0,5 og 1,5 ganger denne inntegnet.

4 SAMMENFATNING AV PROSJEKTET

De gjennomregnede tre eksemplene viser hvordan statistikk kan benyttes i forbindelse med vurdering av fukttransport. De to første eksemplene viser en lang rekke felles trekk med hensyn til hvilke størrelser som er vesentlig for resultatene. I begge tilfeller er materialparametre og inne- og uteklimate de viktigste størrelsene.

Det er ikke sammenlignet forskjellige konstruksjoner, da dette ville medføre en større vurdering, hvor det også måtte inngå økonomi, bestandighet og arbeidsutførelse. Det siste punktet er det vanskeligste å vurdere, men det kan i mange tilfeller bli avgjørende for resultatet. F.eks. vil den alminnelige diffusjonsberegningen ikke uten videre kunne brukes hvis det også skjer luftstrømninger i konstruksjonen. De benyttede beregningsmetodene kan derfor være delvis feilaktige i enkelte tilfeller. Men anvendelse av den her omtalte simuleringsmetoden kan også skje på større og mer kompliserte beregningsmodeller.

4.2 Forbedret kjennskap til materialparametre

I de fleste fukttekniske beregningene anvendes verdier fra bøker som Nevander og Elmersson (1981). Disse verdiene kan i realiteten være svært gamle, idet de i mange tilfeller svarer til verdier i enda eldre bøker. Dessuten er materialene i tabellene ikke alltid beskrevet så godt at det er mulig å vurdere om en verdi er representativ for et materiale. Det er gjennom en årrekke foretatt mange målinger av fukttransport, men i de fleste tilfellene på materialer som lettbetong, tre, tegl og betong. Det finnes derfor målinger, men i de fleste tilfellene er det anvendt materialer som er spesielt utvalgt som ensartede og homogene for å gi nøyaktige måleresultater.

I forbindelse med mer praktisk bruk av diffusjonstall og fuktmodstand ville det være minst like så viktig å kjenne variasjonene for de enkelte materialene. Dermed kunne en oppnå bedre fuktdimensjonering med simuleringsmetoden som er beskrevet her. I Andersson (1985) er det foretatt sammenligninger av beregninger og målinger for en rekke materialer og konstruksjoner. Resultatene viser tydelig at for å forklare en del av avvikelserne mellom målte og beregnede fuktfordelinger, må det foretas til dels store korreksjoner av fuktparametrene som absorpsjonskurve, diffusjonstall og kapillarledningstall. Dette forskningsprosjektet er svært nyttig, idet det også viser spredningen mellom prøvestykker, idet det

normalt foretas fem parallelle forsøk. Det var ønskelig at alle verdier i rapporten fantes på disketter. Forhåpentlig vil det i fremtiden bli flere forsknings-prosjekter som kan gi en bedre informasjon om spredningen på resultatene.

4.3 Forbedret kjennskap til klimaparametre

Inneklimaet og uteklimaet har stor betydning for fuktdimensjoneringer. For uteklimaet finnes målinger fra de meteorologiske instituttene. Disse resultatene finnes i Sverige bearbeidet i Tæslær (1972). Denne inneholder en lang rekke tabeller med fordelinger som kan brukes til vurdering av variasjonene av uteklima. F.eks. finnes relative frekvenser av lufttemperaturer og luftfuktighet. Men det ville være sterkt ønskelig at alle disse tallverdiene også kunne leveres på disketter. Dermed ville det bli mulig å utnytte opplysningene meget bedre.

For inneklimaets vedkommende er det nødvendig å skaffe opplysninger om fukttilskuddet til uteluften. Dette tilskuddet er avhengig av luftskiftet, volum og fuktproduksjon. For de fleste bygningene vil luftskifte og fuktproduksjon variere over døgnet og året på grunn av bruksmåte. Dette er derfor et område hvor det bør skaffes målinger av typiske variasjoner i inneluftens fuktinnhold som Harderup (1982).

4.4 Fremtidig innsats

For å kunne utnytte metoden i større utstrekning bør det satses på å skaffe bedre opplysninger om typiske variasjoner:

1. Fukttransportkoeffisienter
En mer systematisk måling på materialer som anvendes i bygninger.
Måling på flere prøvestykker
2. Klimaparametre
Bedre tilgjengelighet til verdier fra de meteorologiske instituttene for utetemperaturer, utefuktighet og solstråling. Målinger av inneklima - spesielt fukttilskuddets variasjon i enkeltbygninger og større antall bygninger
3. Utførelse
Det bør gjennomføres feltundersøkelser for å skaffe kjennskap til

typiske feil. Dette vil kunne supplere og verifisere resultatene fra teoretiske beregninger av sikkerhetsfaktorer.

4. Fuktmødeller

Bedre modeller for beregning av fukttransport og kondens er ønskelig. I mange tilfeller kan mer kompliserte modeller ikke brukes fordi fukttransportkoeffisientene er dårlig kjent. I første omgang vil simuleringer med metoden som er beskrevet her kunne brukes, idet det foretas vurderinger av spredningen på parametrene.

4.5 Anvendelse av metoden på andre områder

Den beskrevne metoden til simulering kan anvendes på mange andre områder enn fuktdimensjonering for å gi opplysninger om sannsynlig spredning av resultatene.

Metoden har allerede vært brukt på en vurdering av variasjonene i energiforbruk i boliger, Nielsen (1985). I bebodde hus er enkelte størrelser som innetemperatur, luftskifte og tilskuddsvarme helt avhengig av bruksmåte. Dessuten varierer uteklimaet. For en typisk bolig er det antatt variasjoner på disse størrelsene når disse ikke er målt. Med en simulering av 500 tilfeller er funnet energiforbruk, varmetap og varmetilskudd. Middelenergiforbruket er 10,2 MWh/år. Men 10 % har energiforbruk lavere enn 7,7 MWh/år og 10 % har høyere energiforbruk enn 14,3 MWh/år. Det er derfor en faktor 2 mellom energiforbruket i de 10 % med høyest og lavest energiforbruk. Dette er helt i overensstemmelse med mange måleresultater for mange boliger i forbindelse med energibesparende tiltak. Det er derfor nødvendig med et stort antall boliger, eller målingene må være mer nøyaktige. En simulering med forutsetninger om godt kjennskap til parametrene viser at energiforbruket varierer $\pm 10\%$. Energibesparelser under 10 % kan derfor bli vanskelig å kontrollere.

5 REFERANSER

Adamson, B. Ahlgren, L. Bergström, S. G. og Nevander, L. E. 1970.
Fukt- Byggnadstekniska fuktproblem. (Statens råd för byggnadsforskning),
Programskrift 12, Stockholm.

Andersson, A. C., 1985.

Verification of calculation methods for moisture transport in building
materials.

(Swedish Council for Building Research), D6:1985, Stockholm

Efron, B. 1982

The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans.

(Society for Industrial and Applied Mathematics), SIAM Monograph no 38,
Philadelphia USA

Gulbrandsen, A. og Skartveit, A. 1978

Solstråling på skrå og vertikale flater i Norge.

(Geofysisk Institutt avd. B, Universitetet i Bergen.) Rapport nr. 6, Bergen

Harderup, L. E. 1983

Luftfuktighet i bostäder.

(Institutionen för byggnadsteknik, Lunds Tekniska Högskola), Rapport
TVBH-3009, Lund

Iversen, V. B. 1982

Noter til Numerisk Simulation

(IMSOR, Danmarks Tekniske Højskole), København

Kirkham, D. and Powers, W. L., 1972

Advanced Soil Physics

(Wiley-Interscience), New York

Nevander, L. E. og Elmarsson, B. 1981

Fukthandbok.

(Svensk Byggtjänst), Stockholm

Nielsen, A. F. 1974

Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport.

Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse
nr. 29, København

Nielsen, A. F. 1975

Computer Programme for Philips Numerical solution of equations of the Diffusion Type with Diffusivity Concentration-Dependent.
(Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark), report no 36, København

Nielsen, A. F. 1976

Free-water intake of cellular concrete and bricks measured with gamma-ray attention.
(Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark), Report no 41, København

Nielsen, A. F. 1985

Vurdering av energiforbruk i eneboliger ved bruk av statistikk.
(Norges byggforskningsinstitutt), Intern arbeidsrapport nr. 336, Oslo

Nielsen, A. F. 1985

Kondens i massivt tak vurdert ved bruk av statistikk.
(Norges byggforskningsinstitutt), Intern arbeidsrapport nr. 336, Oslo 1960 - 1979

Norsk Meteorologisk Årbok, fra 1950 til 1979

(Det Norske Meteorologiske Institutt), Oslo

SYMPHONY, 1984

IBM-PC computer programme from Lotus Development Corporation,
Cambridge, United States

Taesler, R., 1972

Klimatdata för Sverige
(Statens råd för byggnadsforskning), Stockholm

Widegren-Dafgård, K. 1984

Värmedebitering och inomhustemperatur. VVS & Energi nr. 1, p. 54-58,
Stockholm

Denne rapporten omhandler arbeid utført for forskningsbevilgning 840796-7
fra Statens råd for bygnadsforskning til Norges byggforskningsinstitutt,
Trondheim, Norge

R89: 1987

ISBN 91-540-4794-3

Statens råd för bygnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6707089

Abonnemangsgrupp:
Z. Konstruktioner och material

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 36 kr exkl moms