

By og Byg Dokumentation 009

# Papirisolering

Varmeisoleringssevne  
målt med varmestrømsmåler



Statens Byggeforskningsinstitut  
Danish Building and Urban Research

# Papirisolering

Varmeisoleringssevne målt med varmestrømsmåler

Asta Nicolajsen

Titel	Papirisolering
Undertitel	Varmeisoleringsevne målt med varmestrømsmåler
Serietitel	By og Byg Dokumentation 009
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2001
Forfatter	Asta Nicolajsen
Sprog	Dansk
Sidetæl	44
Litteratur- henvisninger	Side 35
English summary	Side 33-34
Emneord	Isoleringsmaterialer, papirisolering, papiruld, varmeisolering, U-værdier, fugt
ISBN	87-563-1085-4
ISSN	1600-8022
Pris	Kr. 97,50 inkl. 25 pct. moms.
Tekstbehandling	Solveig Johansen
Tegninger	Peder Fynholm
Fotos	Jan Carl Westphall
Udgiver	By og Byg Statens Byggeforskningsinstitut, P.O. Box 119, DK-2970 Hørsholm E-post by-og-byg@by-og-byg.dk www.by-og-byg.dk

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen: *By og Byg Dokumentation 009: Papirisolering. Varmeisoleringsevne målt med varmestrømsmåler. (2001)*

# Indhold

Forord .....	4
Indledning .....	5
Baggrund .....	5
Formål.....	5
Metode.....	5
Sammenfatning og konklusion.....	6
Forsøg i Fugtforsøgshus.....	8
Forsøgsparametre.....	8
Fugtforsøgshusets opbygning.....	8
Facadeelementernes opbygning.....	9
Facadeelement 3: "Element" (285 mm Rockwool).....	10
Facadeelement 4A: "Papirisolering (285 mm)" .....	11
Facadeelement 4B: "Papirisolering (285 mm) med dampbremse" .....	11
Facadeelement 6: "Mineraluld" (190 mm Rockwool) .....	14
Påvirkninger .....	15
Undersøgelsesmetode .....	15
Varmestrømsmåler .....	16
Fugtmåler .....	16
Forsøgsperiode .....	17
Resultater.....	18
Fugtforhold .....	18
Varmestrøm .....	19
Varmestrømmens fugtafhængighed .....	23
MATCH-beregninger.....	25
Sammenligninger med andre målinger.....	28
Cellulose 38% bedre end glasuld ? .....	28
Uisolerede huse.....	28
Isolerede huse .....	30
Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold .....	32
Summary.....	33
Litteratur.....	35
Bilag 1 Forsøgspåvirkninger .....	36
Bilag 2 Fugtbelastning .....	39
Bilag 3 Målepunkternes placering.....	40
Bilag 4 Fugt og temperatur i facadeelementer .....	41

# Forord

Energistyrelsen iværksatte i 1997 udviklingsprogrammet *Miljø- og arbejds-miljøvenlige isoleringsmaterialer*, hvorunder denne rapport er udarbejdet som afrapportering af projektet *Varmestrømsmålinger under fugtbelastning* (J. nr. 75664/98-0005).

Udviklingsprogrammet sigter bl.a. på videnopbygning og dokumentation af anvendelse af organiske isoleringsmaterialer, produceret ved økologisk dyrkning eller genbrug.

Rapporten beskriver resultaterne fra en forsøgsserie, hvor varmeisoleringssevnen af forskelligt opbyggede træfacadeelementer er undersøgt.

Forsøgene er udført i instituttets Fugtforsøgshus i forbindelse med projektet *Fugtsikre træfacader*.

MATCH-beregningerne er udført af Morten Hjorslev Hansen.

By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut  
Afdelingen for Byggeteknik og Produktivitet  
Marts 2001

*Jørgen Nielsen*  
Forskningschef

# Indledning

## Baggrund

For papirisolering findes der kun et begrænset erfaringsmateriale, som kan bruges til at fastlægge det praktiske varmeledningstal ( $\lambda_p$ ) for materialet. Derfor er der behov for en bedre dokumentation af materialets isoleringsevne.

## Formål

Det er projektets formål at bestemme varmeisoleringsevnen for papirisolering. I den forbindelse bliver der i projektet specielt fokuseret på, hvilken indflydelse fugtforholdene har på isoleringsevnen.

Det er en del af formålet at bruge de udførte målinger til at vurdere, hvor velegnet computerprogrammet MATCH er til at simulere fugt- og varme-strømsforhold.

## Metode

Forsøgene er udført i instituttets Fugtforsøgshus, der giver mulighed for at måle varmestrømmen gennem facadeelementer med forskellige isoleringsmaterialer og isoleringstykkelser.

Papirisoleringens varmeisoleringsevne er bestemt ved at måle varmestrømmen gennem et facadeelement isoleret med Papiruld. Resultaterne er sammenlignet med tilsvarende målinger foretaget på facadeelementer isoleret med mineraluld af mærket Rockwool. Målingerne er foregået under naturlige fugt- og temperaturforhold.

Vurderingen af MATCH-programmet er foretaget ved at sammenligne programmets simuleringer af fugt- og temperaturforholdene i facadeelementerne med de tilsvarende eksperimentelt udførte målinger.

# Sammenfatning og konklusion

Fastsættelse af isoleringsmaterialers praktiske varmeisoleringssevne,  $\lambda_p$  ud fra den i laboratoriet på tørre materialer målte  $\lambda$ -værdi ( $\lambda_{10}$ ) bygger på en række erfaringer indhøstet gennem mange år. For papirisolering er der begrænset erfaringsmateriale til rådighed, da papirisolering ikke har været anvendt i Danmark i særligt mange år.

By og Byg har fået en bevilling til at undersøge papirisoleringens isoleringssevne i nogle facadeelementer herunder isoleringsevnenes afhængighed af fugtindholdet.

Isoleringsevnen er også afhængig af andre parametre for eksempel arbejdsudførelsen i forbindelse med isoleringen og eventuelle efterfølgende sætninger af isoleringsmaterialet. Dette bliver ikke undersøgt i nærværende projekt.

## Forsøg

For at finde fugtindholdets indflydelse på isoleringsevnen er varmemstrømmen gennem facadeelementer isoleret med henholdsvis Papiruld og Rockwool A-Batts bestemt med indbyggede varmemstrømmålere. Målingerne er foretaget i forbindelse med et projekt vedrørende fugtophobning i højisolerede træfacader.

Ved målingerne er det ikke isoleringsmaterialets isoleringsevne, der bliver bestemt, men facadeelementets samlede varmeisoleringssevne, målt midt i det isolerede felt i facadeelementet, hvor isoleringsarbejdet må formodes at være udført korrekt.

Der er målt på to facadeelementer isoleret med 285 mm Papiruld, det ene med dampbremse, det andet uden. Desuden er der som reference målt på to elementer isoleret med Rockwool, det ene med 285 mm isolering, det andet med 190 mm isolering, begge elementer er med dampspærre. Facadeelementerne er opbygget som lette træfacadeelementer med en ventileret klimaskærm af fyrrebrædder på klink.

Fugtindholdet i facadeelementerne blev to gange i døgnet registreret med fugtmåledyvlér anbragt i facadebeklædningen, afstandslisten, den udvendige side af konstruktionstræet, isoleringen bag vindspærre og i isoleringen på den udvendige side af dampspærre/dampbremse/indvendig beklædning. Temperaturen ude og inde, den relative luftfugtighed ude og inde og varmemstrømmen gennem facadeelementerne, blev registreret en gang i timen. Det maksimale fugtindhold, der blev registreret, er på 18 vægt-% (træfugt), og forekommer i isoleringen umiddelbart bag vindspærren. Der er ikke signifikant forskel på fugtindholdet i de enkelte elementer.

## Beregninger

Ud fra målingerne af varmemstrømmen gennem de fire facadeelementer er deres  $U$ -værdi (varmeisoleringssevne) beregnet. Disse "målte"  $U$ -værdier er sammenlignet med  $U$ -værdier beregnet efter DS 418 (Dansk Ingeniørforening, 1986). Desuden er  $U$ -værdierne, som en funktion af fugtindholdet, optegnet.

Fugt- og temperaturforholdene i to facadeelementer, isoleret med henholdsvis Papiruld og Rockwool, er simuleret med edb-programmet MATCH. Der er derefter foretaget sammenligning med de målte fugtindhold.

## Konklusion

De her målte værdier for varmemstrømmen gennem facadeelementer isoleret med henholdsvis Papiruld og Rockwool viser:

- De to facadeelementer isoleret med Papiruld har en højere  $U$ -værdi end det tilsvarende facadeelement isoleret med Rockwool, dvs. der er en større varmestrøm gennem facadeelementer isoleret med Papiruld end gennem facadeelementer isoleret med Rockwool. Dette betyder, at for at opnå den samme isoleringsevne skal elementer isoleret med Papiruld have et tykkere lag isolering end elementer isoleret med Rockwool.
- De målte  $U$ -værdier er ca. 10 % lavere end de beregnede  $U$ -værdier. Dette var forventet, da der til brug for beregningerne, er benyttet  $\lambda_p$  værdier, hvor der er taget hensyn til eventuelle fejl i arbejdsudførelse og til sætninger.
- Varmeisoleringsevnen ændres ikke signifikant med ændringer i fugtindholdet i facadeelementerne i det undersøgte fugtområde.

MATCH beregningerne viser, at der er en rimelig god overensstemmelse mellem beregnet og målt fugtindhold i isoleringen bag vindspærren, uanset om facadeelementerne er isoleret med Papiruld eller med Rockwool. Dette viser, at MATCH beregningerne også kan bruges til at simulere fugtophobning i konstruktioner, der er isoleret med Papiruld, når konstruktionen er opbygget som de, ved disse forsøg anvendte konstruktioner.



# Forsøg i Fugtforsøgshus

## Forsøgsparametre

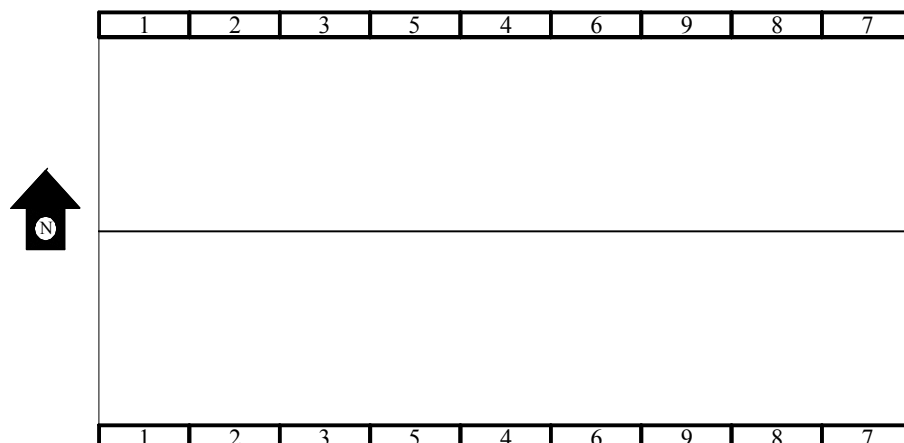
Varmestrømsmålingerne er foretaget på facadeelementer med forskellige isoleringsmaterialer, isoleringstykkelser og dampbremsere/dampspærre. De forskellige facadeelementer er udformet med henblik på at undersøge, hvilke faktorer der har indflydelse på fugtforhold og dermed holdbarheden og isole-ringsevnen af højisolerede træfacader.

## Fugtforsøgshusets opbygning

En af By og Bygs forskningsfaciliteter er et Fugtforsøgshus. Fugtforsøgshuset har et areal på 91,5 m<sup>2</sup>. Husets længde og bredde er henholdsvis 11,5 × 7,9 m, se figur 1. Til bestemmelse af varmemstrømmene gennem facadeelementerne er der indbygget varmemstrømsmålere i Fugtforsøgshusets nordvendte facade. Denne facade er inddelt i 9 felter og varmemstrømsmålerne er placeret i felterne 3, 4 og 6, som vist i figur 2.

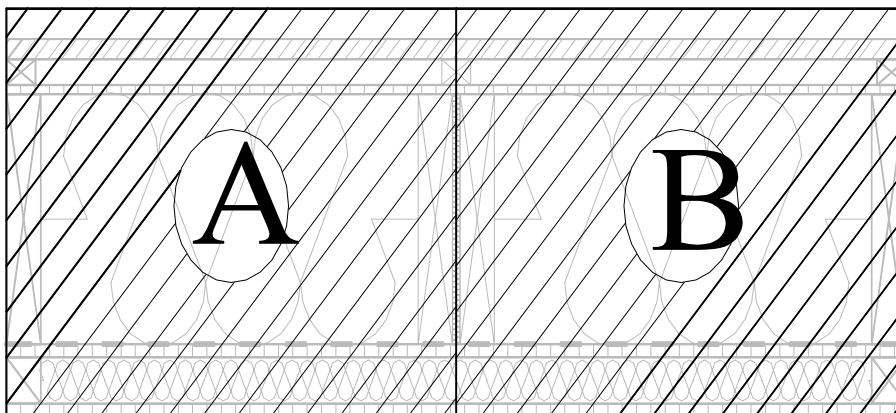


Figur 1. Fugtforsøgshuset set fra nordøst en vinterdag. Facaden vender mod nord og gavlen mod øst.



Figur 2. Facadeelementernes placering i Fugtforsøgshuset. Der er monteret varmemstrømsmålere i elementerne 3, 4 og 6 mod nord, idet denne placering mindsker måleusikkerheden.

Hvert facadeelement består af to ens elementer A og B, se figur 3, med en række målepunkter i hver. De primære fugtmålepunkter er placeret i element B, mens ekstra målepunkter (kontrolpunkter) er placeret i element A. Facadeelementet med papirisolering er dog udført med to forskellige elementer henholdsvis uden og med dampbremse.



Figur 3. Hvert facadeelement består af de to elementer A og B (vandret snit).

I tabel 1 vises en oversigt over de facadeelementer, der indgår i varme-strømsmålingerne. Der er desuden angivet det elementnavn, der bruges ved optegning af grafer.

Tabel 1. Oversigt over nummerering af facadeelementer, elementnavne, isoleringsmateriale og isoleringstykkelse.

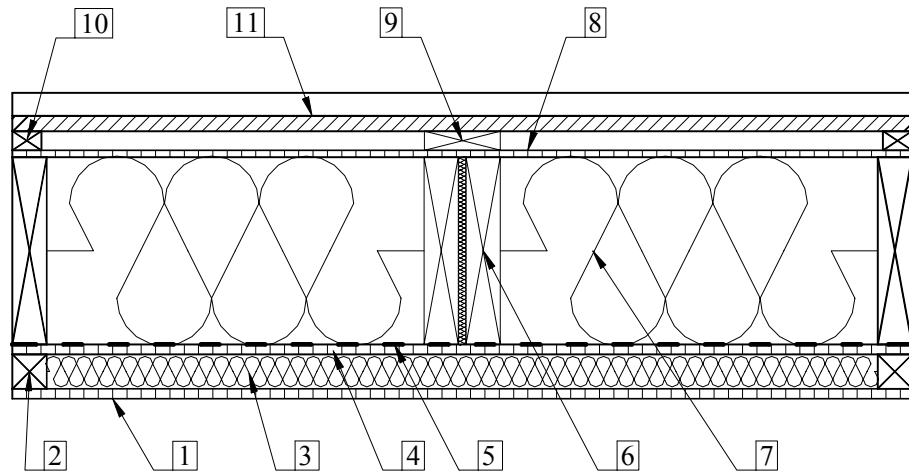
Facadeelementnummer	Facadeelementnavn	Isolering	Isoleringstykkelse
3	Element	Rockwool	285 mm
4 A	Papirisolering	Papiruld	285 mm
4 B	Papirisolering med dampbremse	Papiruld	285 mm
6	Mineraluld	Rockwool	190 mm

## Facadeelementernes opbygning

Facadeelementerne er opbygget af elementer, der er fremstillet af Taasinge Træ A/S og derefter monteret i Fugtforsøgshuset, hvor den endelige opbygning er udført. Elementerne var ikke udsat for regn i byggeperioden.

Elementerne er fremstillet med de ydre mål: tykkelse  $\times$  584  $\times$  2683 mm, hvor tykkelsen varierer afhængig af valg af isoleringsmateriale. Den principielle opbygning af facadeelementerne er følgende (se figur 4):

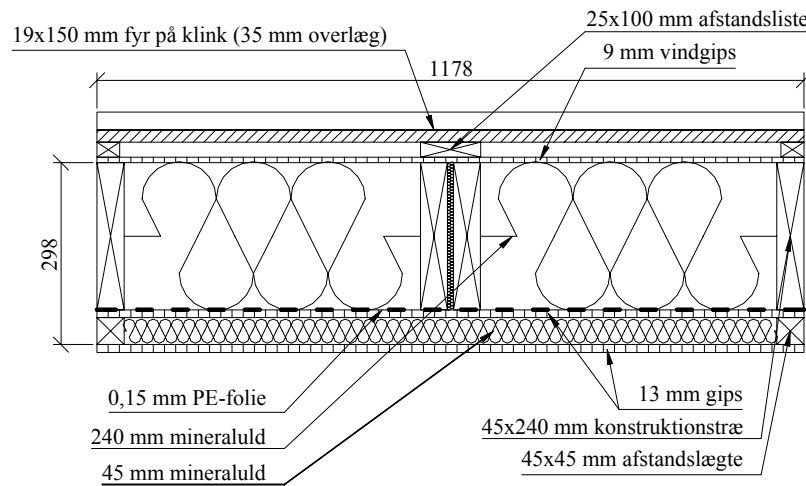
- 1 Indvendig beklædning (13 mm gipsplade)
- 2 Evt. afstandslægte (45  $\times$  45 mm gran)
- 3 Evt. indvendig isolering (45 mm mineraluld)
- 4 Evt. beskyttelse af dampspærre (13 mm gipsplade)
- 5 Evt. dampspærre (0.15 mm polyetylen) eller dampbremse (øko dampbremse)
- 6 Konstruktionstræ (145-285  $\times$  45 mm gran)
- 7 Isolering (145-285 mm Rockwool A-Batts eller Papiruld fra MILJØ ISOLERING ApS)
- 8 Vindspærre (9 mm gipsplade)
- 9 Afstandsliste ved samling mellem to ens elementer (25  $\times$  100 mm gran)
- 10 Afstandsliste ved samling til naboelement (25  $\times$  38 mm gran)
- 11 Udvendig beklædning (19  $\times$  150 mm fyr på klink, 35 mm overlæg).



Figur 4. Principskitse af facadeelementernes opbygning. Numrene henviser til teksten ovenfor figuren.

### Facadeelement 3: "Element" (285 mm Rockwool)

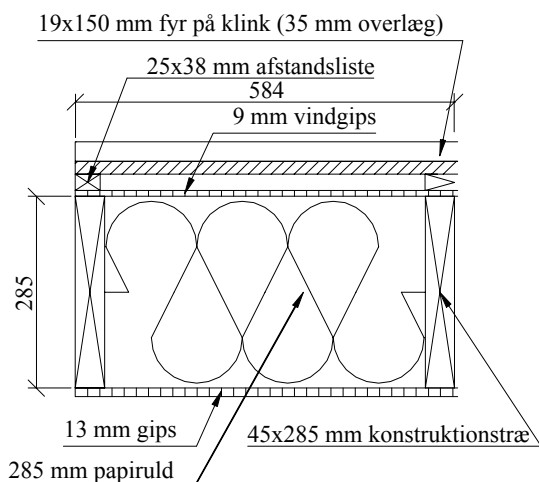
Facadeelementet, "Element" se figur 5, er en meget anvendt opbygning på markedet i dag. Facadeelementet adskiller sig dog fra de traditionelle trækonstruktioner ved større trædimensioner på grund af den øgede isoleringstykkelse på 285 mm. Facadeelementet benyttes som referenceelement i denne undersøgelse. Elementet er opbygget med dampspærren, placeret så den er beskyttet af en indvendig installationszone på 45 mm.



Figur 5. Opbygning af facadeelement "Element" (285 mm Rockwool).

#### Facadeelement 4A: "Papirisolering (285 mm)"

I undersøgelsen er medtaget et facadeelement isoleret med et alternativt isoleringsmateriale, se figur 6. Facadeelementet er isoleret med 285 mm Papiruld, og der er ingen dampbremse i denne konstruktion.

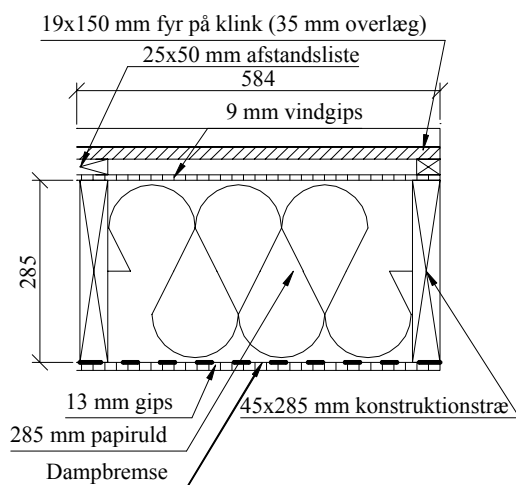


Figur 6. Opbygning af facadeelement "Papirisolering" (285 mm).

#### Facadeelement 4B: "Papirisolering (285 mm) med dampbremse"

I forsøgsfelt 4B er indbygget et facadeelement isoleret med Papiruld, se figur 7, med en dampbremse som er leveret af Papiruldsproducenten: *Øko Dampbremse B2* (2 lag brunt kraftpapir samlet med glasfibernet og polyethylenklæber), med en opgivet Z-værdi (dampdiffusionsmodstandstal) på 15 GPa s<sup>2</sup>/kg. By og Byg har målt Z-værdier for dette produkt fra 2 til 12 GPa s<sup>2</sup>/kg).

Af hensyn til indblæsningen af Papirulden er dampbremsen placeret lige bag den indvendige beklædning til forskel fra facadeelement "Element", (figur 5) med Rockwool.



Figur 7. Opbygning af facadeelement "Papirisolering (285 mm) med dampbremse".

### Indblæsning og sætning

Ved indblæsning af Papiruld i element 4A blev vindspærren (gipspladen) forneden i elementet presset 16 mm ud på grund af elementets lufttæthed, se figur 8.



Figur 8. Udbøjning af gipsplade efter indblæsning af Papiruld i element 4A.

Inden den videre indblæsning af Papiruld i element 4A blev gipspladens fastgørelse til elementerne forstærket med trælægter, og der blev boret et ekstra hul, så luften kunne komme ud fra elementerne ved indblæsningen, se figur 9 og figur 10.



Figur 9. Indblæsning af Papiruld i element 4B.





Figur 10. Element 4B til venstre forstærket med trælægter og med to "indblæsningshuller" så luften kan slippe ud af elementet.

I forbindelse med nedtagningen af elementerne blev elementerne med Papiruld åbnet, og der viste sig sætninger i alle elementerne isoleret med Papiruld, se figur 11. Det kunne konstateres, at en del af sætningen var sket før åbningen, men den største del af sætningen skete i forbindelse med åbningen af elementerne.



Figur 11. Sætning i Papiruld ved demontering af element. Den største del af sætningen skete i forbindelse med åbningen af elementerne. Efterfølgende forsøg tyder på, at den del af sætningen, der skete før elementerne blev åbnet, skyldtes, at vægtykkelsen er 285 mm, mens den indblæste densitet ville være acceptabel til en 190 mm tyk isolering.

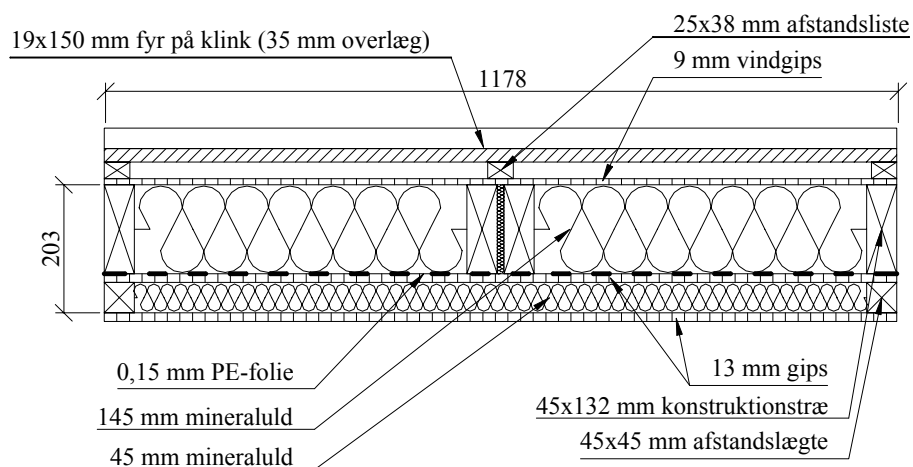
Efter nedtagningen af facadeelementerne blev Papirulden vejlet med det formål at bestemme densiteten af isoleringsmaterialerne. Densiteten af Papirulden i de to elementer blev bestemt til henholdsvis 51 og 58 kg/m<sup>3</sup>.

Et efterfølgende forskningsprojekt "Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering" er igangsat for at undersøge, hvorledes sætning af cellulosebaseret løsfyldsisolering kan undgås. Der er foretaget teoretiske beregninger samt laboratorieforsøg. De foreløbige resultater viser, at sætningerne afhænger af isoleringens densitet og væggenes overflade (ruhed). Resultaterne tyder på, at den valgte densitet er for lille til en 285 mm tyk væg, men acceptabel til en 190 mm tyk væg.

Forskningsprojektet er under afrapportering (Rasmussen, 2001).

### Facadeelement 6: "Mineraluld" (190 mm Rockwool)

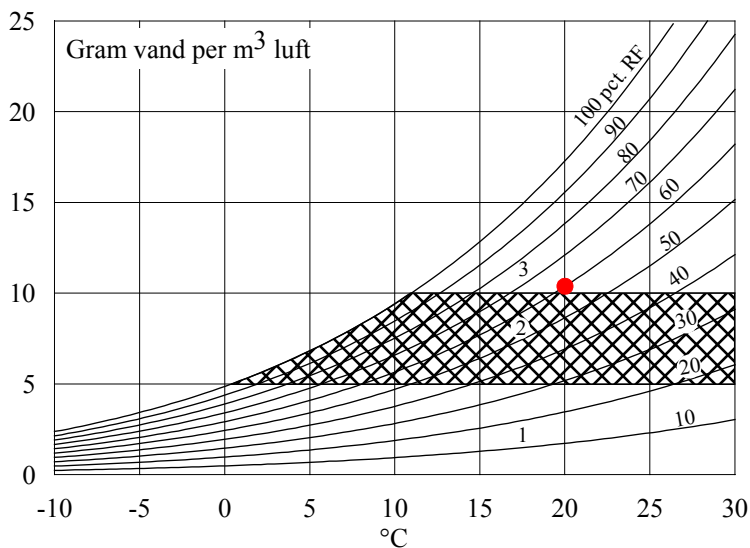
Som reference til de nu gældende isoleringskrav undersøges et facadeelement isoleret med 190 mm Rockwool, se figur 12. Facadeelementet er opbygget med en bærende trækonstruktion på 145 × 45 mm.



Figur 12. Opbygning af facadeelement. "Mineraluld" (190 mm Rockwool).

## Påvirkninger

Temperaturen og fugtbelastningen inde i Fugtforsøgshuset blev valgt til 20 °C og 60 % RF (svarende til toppen af rumklimaklasse 2, se figur 13).



Figur 13. Rumklimaklasserne indtegnet i vanddampdiagram, hvor det skraverede område er rumklimaklasse 2, som er det område boligens klima befinder sig i. I diagrammet angiver symbolet ●, hvilket indeklime der er valgt i Fugtforsøgshuset i forsøgsperioden. Opdeling i rumklasse er beskrevet i (Andersen, Christensen & Nielsen, 1993).

Der er i forsøgsperioden registreret følgende klimapåvirkninger:

- Udelufttemperatur
- Indelufttemperatur
- Udeluftens relative fugtighed
- Indeluftens relative fugtighed
- Nedbør
- Solstråling.

Klimapåvirkningen fremgår af bilag 1 Forsøgs påvirkninger.

Det ses, at den ønskede indetemperatur på 20 °C kun har været opretholdt en del af vinteren.

Påvirkningerne fra det aktuelle udeklima er blevet sammenlignet med påvirkningen i referenceåret, se bilag 2. Fugtbelastningen under forsøgene har været 9 % lavere end i referenceåret.

## Undersøgelsesmetode

Undersøgelserne er baseret på:

- En forsøgsperiode, der mindst strækker sig over en hel vinter med efterfølgende forår for at få belyst opfugtningen i vinterperioden og udtørringen i forår-/sommerperioden.
- Varmestrømsmålinger i 4 facadeelementer.
- Fugtmålinger i målepunkter med sammenlignelig placering i de forskellige facadeelementer.

En gang i timen registreres:

- Varmestrøm gennem facadeelementerne
- Temperatur i udeluften
- Temperatur i indeluften
- Relativ luftfugtighed i udeluften
- Relativ luftfugtighed i indeluften
- Nedbør
- Solstråling på den nordlige tagflade.



To gange i døgnet registreres:

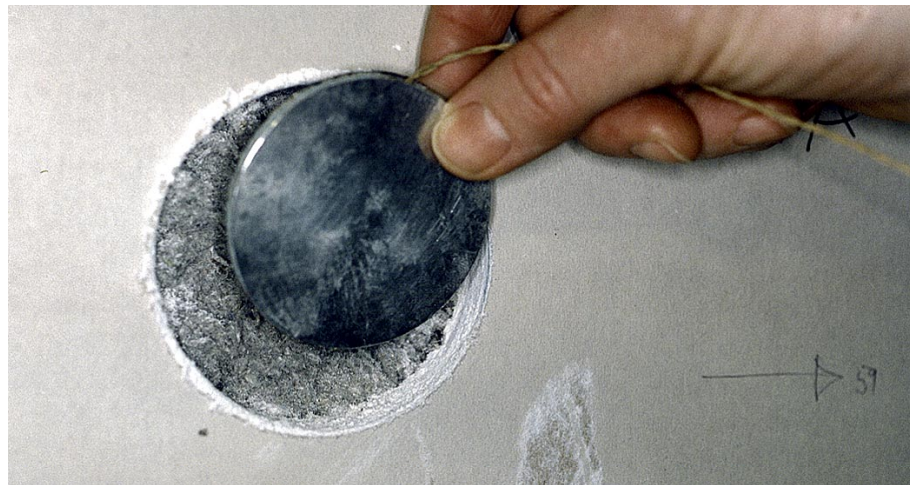
- Fugtindhold i facadeelementerne
- Temperatur i facadeelementerne.

### Varmestrømsmåler

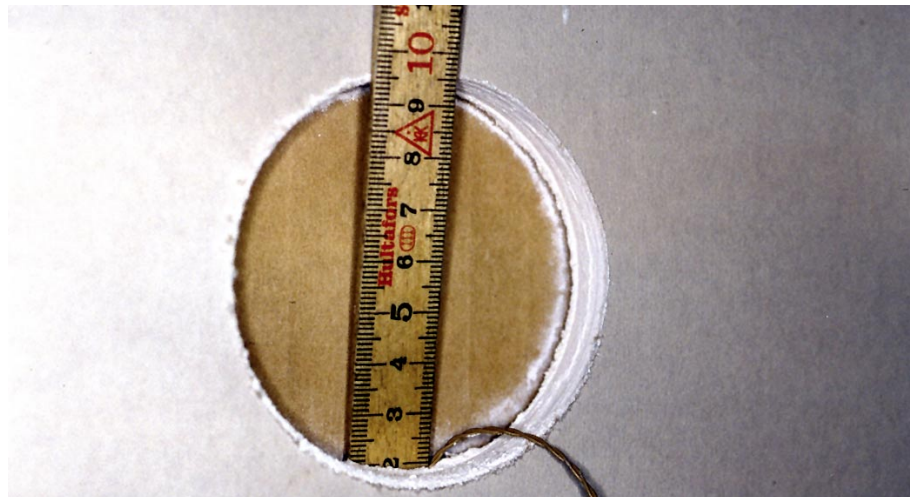
Varmestrømsmålerne er opbygget af aluminiumsplader med isolering imellem og med et peltierelement i midten. Varmestrømsmålerne er 5 mm tykke og har en diameter på 50 mm, se figur 14. Varmestrømsmålerne er placeret lige bag den indvendige gipsbeklædning, se figur 15.

Der er placeret en varmemåler 0,6 m fra toppen i element 3, 4A, 4B og 6. Der er desuden placeret en varmemåler 0,6 m fra bunden i element 4A og 4B.

Varmestrømsmålerne er kalibreret på Institut for Bygninger og Energi (DTU).



Figur 14. Varmestrømsmåler under montering bag indvendig gipsplade.



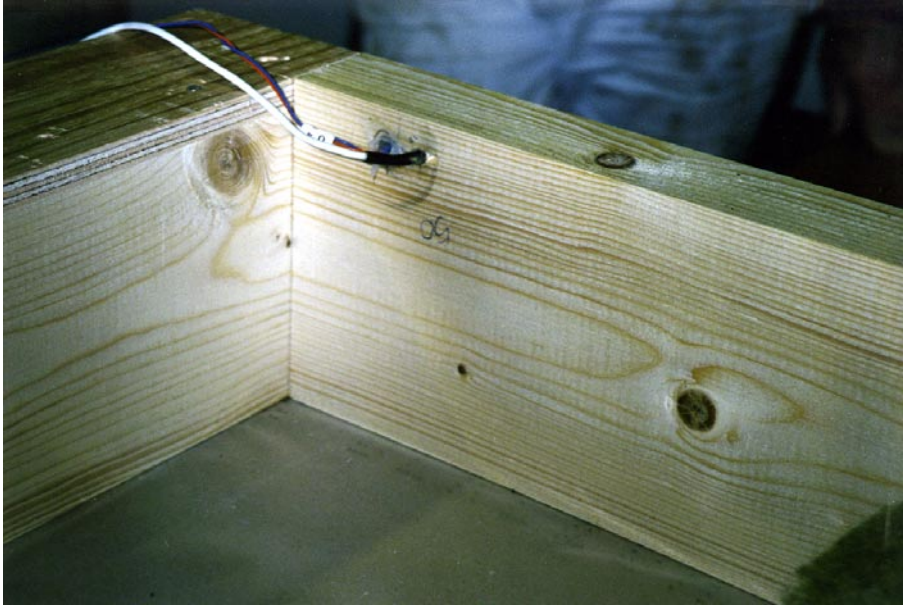
Figur 15. Varmestrømsmåler monteret mellem indvendig gipsplade og dampbremse. Varmestrømsmålerens øverste kant er 20 mm under kanten af det borede hul.

### Fugtmåler

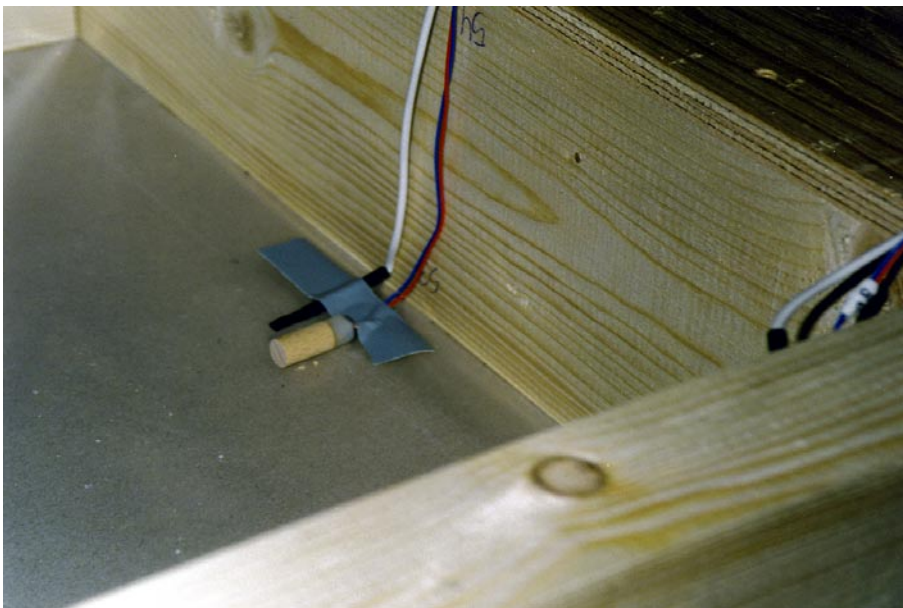
Fugtmålerne består af en fugtmåledyvel og en termistor til måling af temperaturen (til korrektion) se figur 16 og figur 17. Fugtmålerne er placeret i:

- Beklædningen
- Afstandslisten
- Konstruktionstræet
- Isoleringen bag vindspærren
- Isoleringen på den udvendige side af dampspærren/dampbremsen (hvor der ikke er dampspærre, på den udvendige side af den indvendige beklædning).

Fugtmålerne er placeret ca. 100 mm over elementernes underkant, dvs. ca. 50 mm over bundremmen i konstruktionen.



Figur 16. Fugtmåledyvel og termistor til fugt- og temperaturmåling monteret i konstruktionstræ og forseglet med klar silikonefugemasse.



Figur 17. Fugtmåledyvel og termistor til fugt- og temperaturmåling monteret på udvendig side af dampspærre.

Fugtindholdet bestemmes ved at måle den elektriske modstand mellem to måleelektroder i en bøgetræsdyvel. Modstanden omsættes til et fugtindhold, idet der korrigeres for temperaturafhængighed. Alle resultater (også målinger af fugt i isoleringsmateriale) er angivet som vægt-% fugt i træ dvs. svarende til fugtindholdet i trædyvlerne. Fugtindhold under 11% registreres ikke, da der, med den anvendte måleteknik, er stor usikkerhed forbundet med bestemmelse af fugtindholdet under dette niveau.

## Forsøgsperiode

Levering, instrumentering og indbygning af forsøgselementerne foregik i perioden november 1997 til februar 1998.

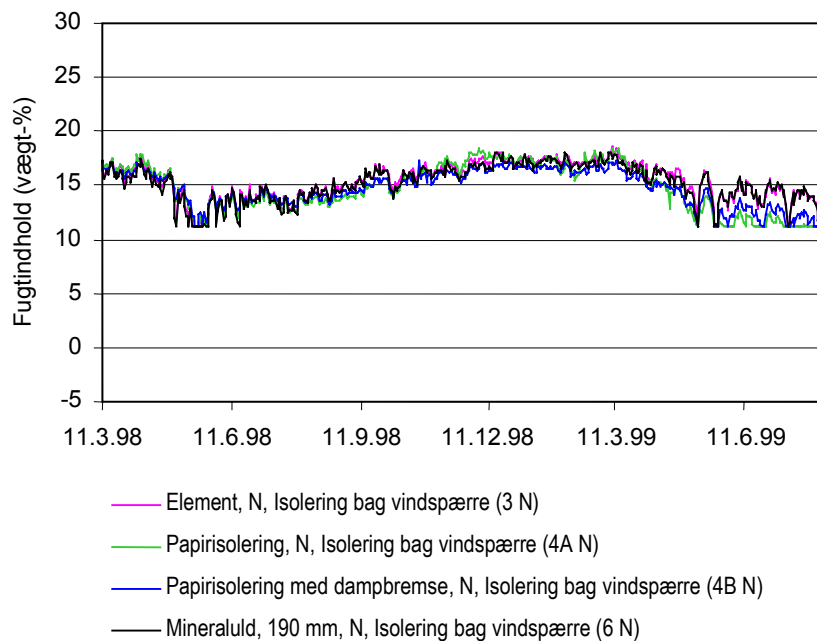
Forsøgene med varmestrømsmålingen gennemførtes i perioden 11. marts 1998 til 8. august 1999.

# Resultater

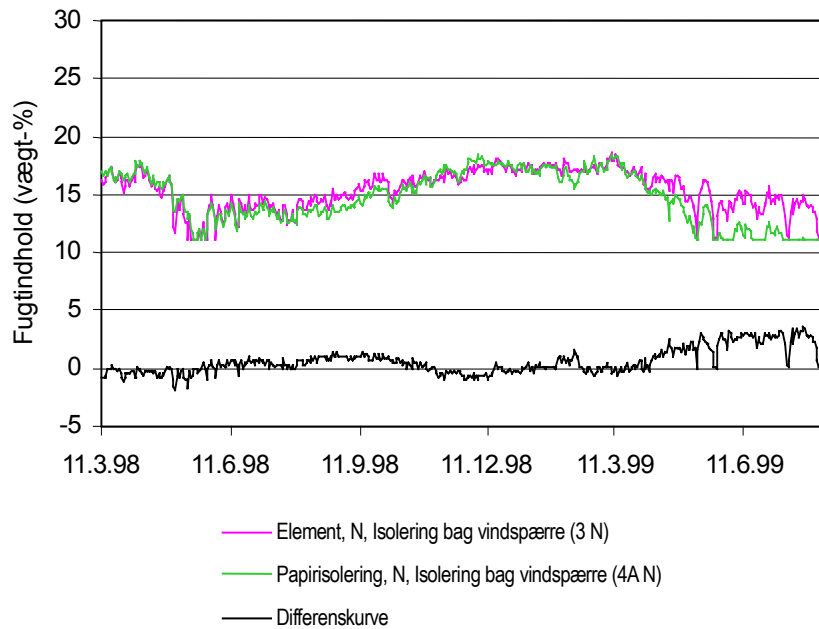
Variationerne i fugtindholdet samt temperaturforløb for samtlige målepunkter i hvert enkelt element er optegnet på graferne, der er vedlagt som bilag 4. Målepunkternes placering er beskrevet i bilag 3.

## Fugtforhold

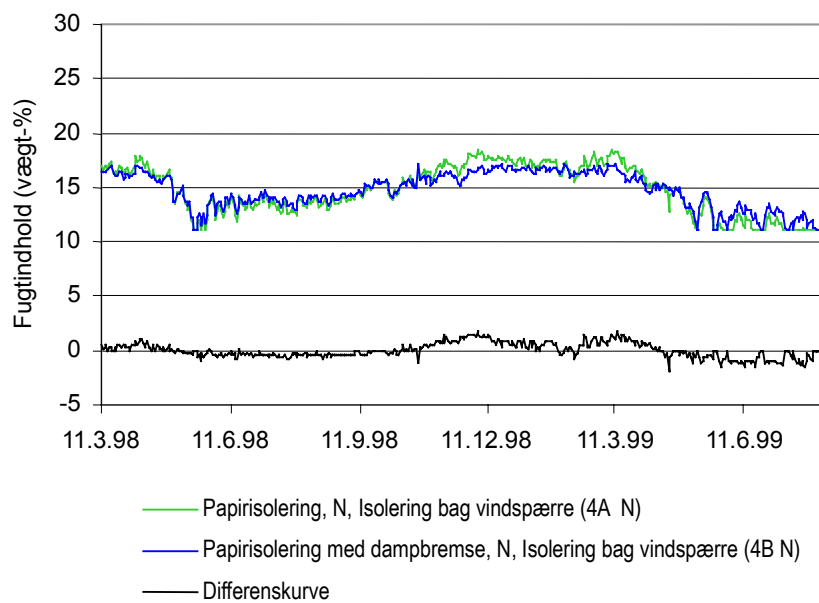
Det maksimale fugtindhold i isoleringen bag vindspærren, og dermed i facadeelementerne, er i alle elementer på 18 vægt-%, se figur 18. Fugten er målt med bøgetræsdyvler, og det er træfugtigheder der er angivet. Der er ikke signifikante forskelle mellem de enkelte elementers fugtindhold om vinteren. I figur 19, er forskellen mellem fugtindholdet i to elementer isoleret med henholdsvis Papiruld og Rockwool optegnet. Der er heller ikke signifikant forskel på fugtindholdet i elementer isoleret med Papiruld med og uden dampbremse, se figur 20.



Figur 18. Fugtindhold, angivet som træfugtighed, i isoleringen bag vindspærren i alle facadeelementerne.



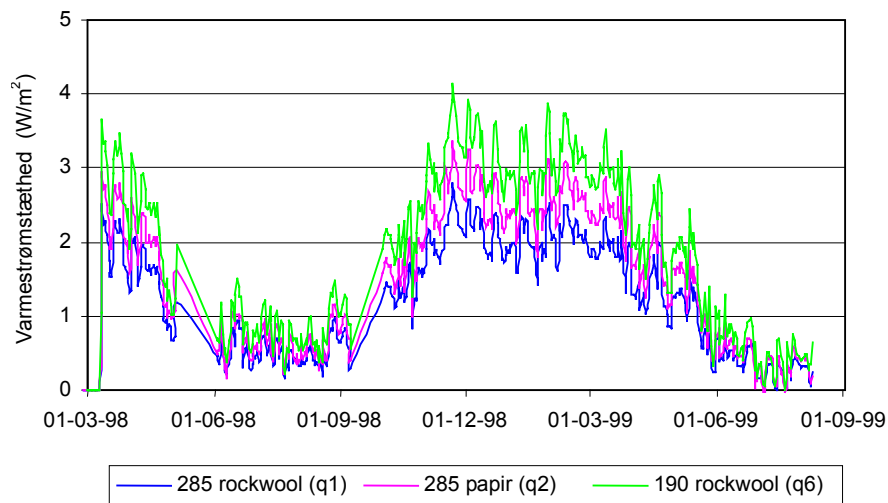
Figur 19. Fugtindhold i isoleringen bag vindspærren i facadeelementer isoleret med henholdsvis 285 mm Papiruld og Rockwool.



Figur 20. Fugtindhold i isoleringen bag vindspærren i elementer isoleret med 285 mm Papiruld, med og uden dampbremse.

## Varmestrøm

Varmestrømstætheden, beregnet som døgngennemsnit ud fra timemålinger gennem de tre elementtyper, er angivet på figur 21. Målepunkternes placering fremgår af tabel 2. Det ses, at der gennem elementet isoleret med Rockwool er en mindre varmemstrøm end gennem elementet, der er isoleret med Papiruld i samme tykkelse.

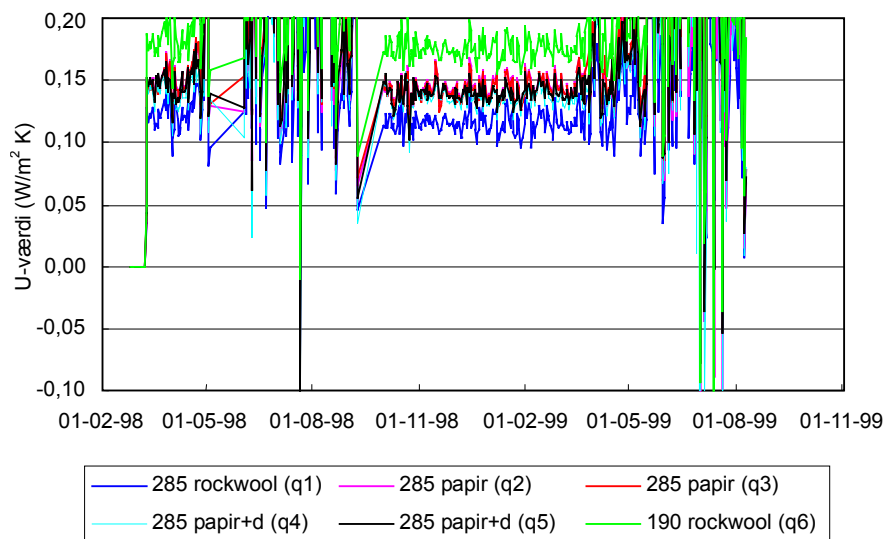


Figur 21. Varmestrømstætheden (døgngennemsnit) gennem to facadeelementer isoleret med Rockwool samt et facadeelement isoleret med Papiruld.

Tabel 2. Målepunkternes placering i de enkelte elementer.

Målepunkt	Element nr.	Placering	Isoleringsmateriale	Tykkelse mm	Dampspærre
q 1	3	oppe	Rockwool	285	dampspærre
q 2	4A	oppe	Papiruld	285	ingen
q 3	4A	nede	Papiruld	285	ingen
q 4	4B	oppe	Papiruld	285	dampbremse
q 5	4B	nede	Papiruld	285	dampbremse
q 6	6	oppe	Rockwool	190	dampspærre

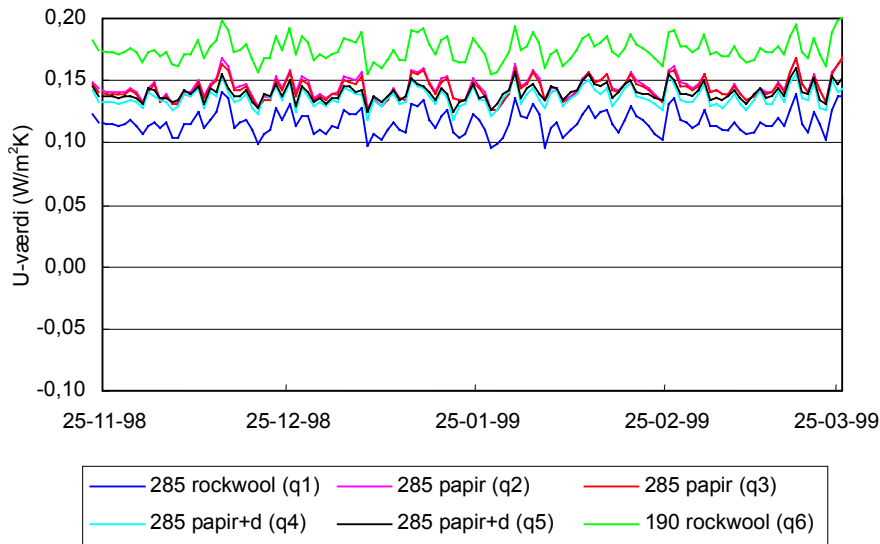
Ud fra varmestrømmene er facadeelementernes  $U$ -værdi beregnet ved at dividere varmestrømstætheden med temperaturdifferensen mellem inde og ude. Der er beregnet en værdi en gang i timen, og derefter er et døgngennemsnit beregnet. Da varmestrømsmålerne sidder på den indvendige side, vil det ikke være helt sammenhørende værdier af varmestrøm og temperatur der måles, idet et udvendigt temperaturfald først senere vil resultere i en øget varmestrøm gennem den indre vægoverflade. I (Korsgaard & Madsen, 1964) er usikkerheden herfra beregnet til at være under 1 % for trævægge, desuden er det angivet, at den samlede usikkerhed på varmestrømsmålinger er ca. 6 %. De målte  $U$ -værdier (varmestrømstætheden divideret med temperaturdifferensen) er for hele perioden angivet i figur 22.



Figur 22. Målte  $U$ -værdier for alle facadeelementerne.



Målte  $U$ -værdier (varmestrømtætheden divideret med temperaturforskellen) for vinterperioden er optegnet i figur 23. Vinterperioden er udtaget, fordi varmestrømmene er mest stabile på grund af de store temperaturforskelle. Det ses atter, at der gennem elementet isoleret med Rockwool er en mindre varmestrøm end gennem elementerne, der er isoleret med Papiruld i samme tykkelse, idet de målte  $U$ -værdier er lavere. I tabel 3 er middelværdien af de målte  $U$ -værdier i vinterperioden, samt minimum og maximum angivet.



Figur 23. Målte  $U$ -værdier for alle facadeelementerne målt i vinterperioden.

Tabel 3. Middelværdi af målte  $U$ -værdier samt minimum og maximum værdier, målt i vinterperioden.

Målepunkt	Minimum W/m <sup>2</sup> K	Middel W/m <sup>2</sup> K	Maximum W/m <sup>2</sup> K
q 1	0,096	0,116	0,141
q 2	0,126	0,144	0,168
q 3	0,125	0,143	0,168
q 4	0,118	0,137	0,156
q 5	0,124	0,140	0,166
q 6	0,155	0,175	0,198
q 2 - q 4		0,141	

I tabel 4 er  $U$ -værdier beregnet efter DS 418 (Dansk Ingeniørforening, 1986 og Dansk Standard, 2000) sammenlignet med de gennemsnitlige målte  $U$ -værdier i vinterperioden (25.10.98 - 25.03.99).

Tabel 4. Beregning af  $U$ -værdier for facadeelementer isoleret med Papiruld og Rockwool, samt sammenligning af beregnede og målte  $U$ -værdier.

Elementnummer			3 N	4A N+4B N	6 N
Isoleringsmateriale			Rockwool	Papiruld	Rockwool
Isoleringsstykkelse			285 mm	285 mm	190 mm
Materiale	Tykkelse mm	$\lambda$ W/m K	$R$ m <sup>2</sup> K/W	$R$ m <sup>2</sup> K/W	$R$ m <sup>2</sup> K/W
$R_u$			0,04	0,04	0,04
Bræddebeklædning + hulrum			0,3	0,3	0,3
U-gips	9	0,17	0,05	0,05	0,05
Rockwool	240	0,039	6,15		
Rockwool	145	0,039			3,72
Papiruld	285	0,050		5,7	
Gips	13	0,17	0,08		0,08
Rockwool	45	0,039	1,15		1,15
Gips	13	0,17	0,08	0,08	0,08
$R_i$ <sup>1</sup>			0,10	0,10	0,10
$R_{\text{isolering}}$			7,30	5,7	4,87
$R_{\text{øvrige}}$			0,65	0,57	0,65
$\Sigma R$			7,95	6,27	5,52
$U = 1 / \Sigma R$	W/m <sup>2</sup> K		0,126	0,159	0,181
Målte $U$ -værdier	W/m <sup>2</sup> K		0,116	0,141	0,175
Afvigelse fra beregnet $U$ -værdi			8 %	11 %	3 %

1) Normalt 0,13, men er sat til 0,10, da der er mere omrøring i luften i Fugtforsøgshuset end i boliger.

For de to facadeelementer, isoleret med Rockwool, er det ikke muligt umiddelbart at sammenligne de målte  $U$ -værdier, da facadeelementerne har forskellige tykkelser. For at vurdere om deres isoleringsevne er tilmærmeligvis ens, er isoleringsmaterialets "målte"  $\lambda$ -værdi beregnet, se tabel 5. Det er ikke en teknisk rigtig beregning, da det er nødvendigt at benytte den tidligere beregnede  $R_{\text{øvrige}}$  for at beregne den samlede varmemodstand over isoleringen.

I (Korsgaard & Madsen, 1964) er angivet, at usikkerheden på varme-strømsmålingerne er ca. 6 %. Dette giver en usikkerhed på de "målte"  $\lambda$ -værdier på  $\pm 0,002$  W/m K og de to "målte"  $\lambda$ -værdier er derfor ikke signifikant forskellige.

Tabel 5. Beregning og sammenligning af "målte"  $\lambda$ -værdier, for facadeelementer isoleret med Papiruld og Rockwool, ud fra målte  $U$ -værdier.

Elementnummer			3 N	4A N+4B N	6 N
Isoleringsmateriale			Rockwool	Papiruld	Rockwool
Isoleringsstykkelse			285 mm	285 mm	190 mm
Målte $U$ -værdier	W/m <sup>2</sup> K		0,116	0,141	0,175
"Målte" $\Sigma R = \frac{1}{U}$	m <sup>2</sup> K/W		8,62	7,09	5,71
Beregnet $R_{\text{øvrige}}$	m <sup>2</sup> K/W		0,65	0,57	0,65
"Målte" $R_{\text{isolering}}$	m <sup>2</sup> K/W		7,97	6,52	5,06
Isoleringsstykkelse	m		0,285	0,285	0,19
"Målte" $\lambda$	W/m K		0,036	0,044	0,038
Usikkerhed på $\lambda$ (6%)	W/m K		0,002	0,003	0,002

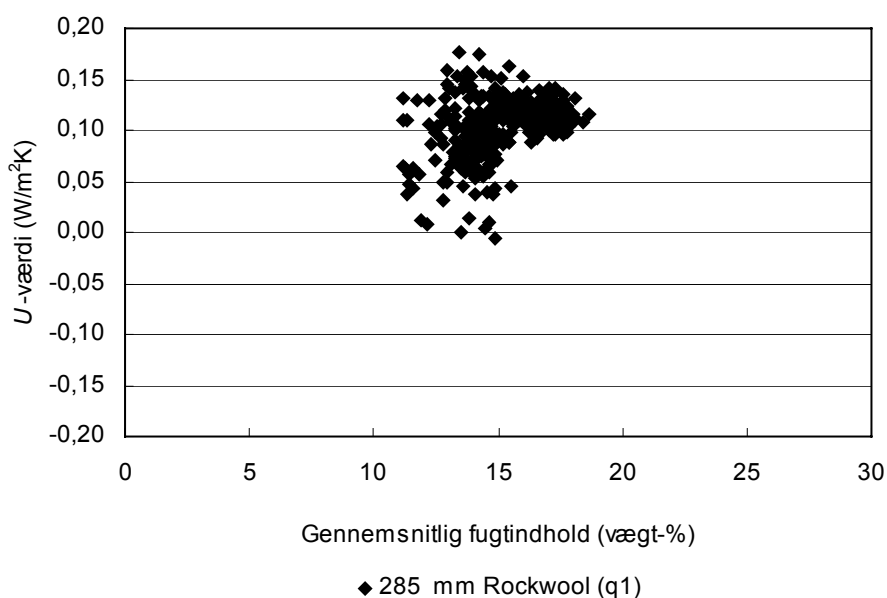
De i tabel 5 angivne "målte"  $\lambda$ -værdier for Papiruld og Rockwool kan ikke anvendes som absolutte værdier, da der er en usikkerhed på dem på henholdsvis  $\pm 0,003$  W/m K og  $\pm 0,002$  W/m K. Den her udførte beregning viser

kun, at de "målte"  $\lambda$ -værdier for Papiruld er større end de "målte"  $\lambda$ -værdier for Rockwool.

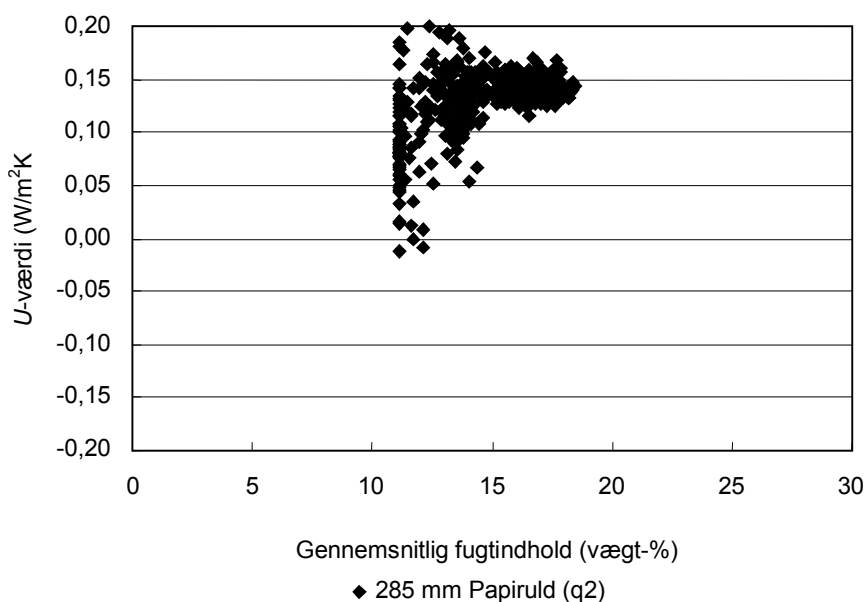
I (Kristiansen, 1999) er der også rapporteret om større varmeledningsevne ( $\lambda$ -værdi) for Papiruld end for Rockwool, men forskellen mellem de fundne varmeledningsevner for henholdsvis Papiruld og Rockwool er mindre end de her fundne.

## Varmestrømmens fugtafhængighed

I de følgende figurer er varmemstrømmen som funktion af fugtindholdet optegnet. Figur 24 og figur 25 viser varmemstrømmen målt over hele forsøgsperioden. Ved de lave fugtindhold er der stor spredning på varmemstrømmen, da disse målinger stammer fra sommerperioder.



Figur 24. Målt  $U$ -værdi for facadeelement isoleret med 285 mm Rockwool som funktion af fugtindhold. Målt over hele forsøgsperioden.

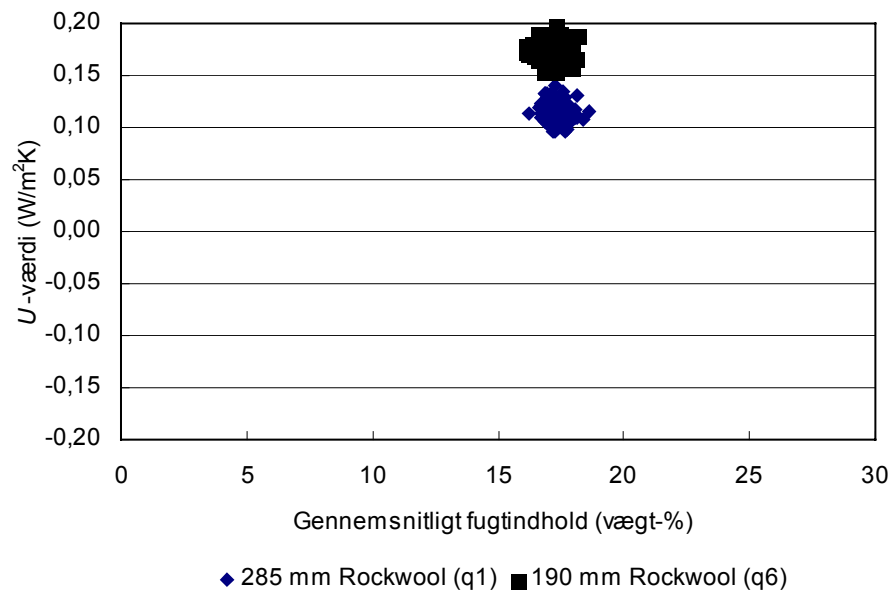


Figur 25. Målt  $U$ -værdi for facadeelement isoleret med 285 mm Papiruld som funktion af fugtindhold. Målt over hele forsøgsperioden. Varmestrømmen er målt foroven i elementet.

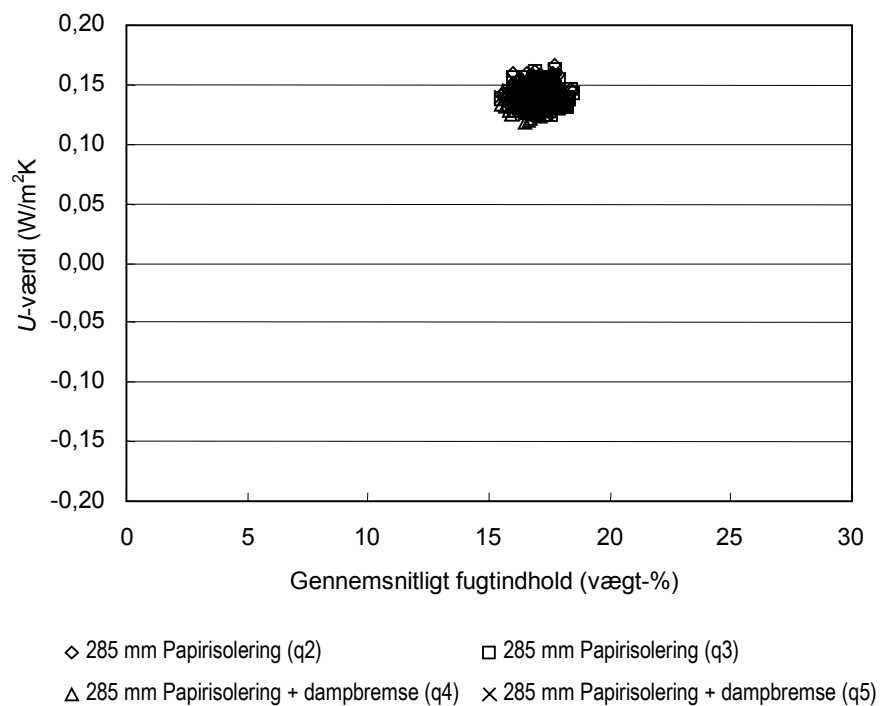


Varmestrømmen, som funktion af fugtindholdet, målt over vinterperioden er angivet i figur 26 og figur 27.

Det ses, at inden for det opnåede fugtniveau er der ingen stigning i varmemstrømmen ved stigende fugtindhold.



Figur 26. Målte  $U$ -værdier for facadeelementer isoleret med 285 mm og 190 mm Rockwool som funktion af fugtindhold målt over vinterperioden. De gennemsnitlige målte  $U$ -værdier er henholdsvis 0,116 og 0,175  $W/m^2 K$ , (se tabel 3).



Figur 27. Målte  $U$ -værdier for facadeelementer isoleret med 285 mm Papiruld, med og uden dampbremse, som funktion af fugtindhold, målt over vinterperioden. Den gennemsnitlige målte  $U$ -værdi er 0,141  $W/m^2$ , (se tabel 3).

# MATCH-beregninger

MATCH er et edb-program, der indeholder en matematisk model, der kan simulere éndimensionale fugt- og varmestrømme i bygningskonstruktioner (Rode Pedersen, 1990). For at vurdere hvor velegnet programmet er til at beregne fugt- og temperaturforholdene i en konstruktion med alternativ isolering, er fugt- og temperaturforholdene i to af facadelementerne simuleret vha. programmet. Der er anvendt version 1.5, rev. 990511, af MATCH-programmet.

Ved simuleringerne er der for isoleringsmaterialernes vedkommende benyttet materialeparametre fra (Rode & Rasmussen, 1999), for alle andre materialer er der benyttet materialeparametre fra materialebiblioteket i MATCH.

## Klimadata anvendt ved simulering

Fugtindhold målt i klinkbeklædningen ud for de nordvendte forsøgsfelter 3 og 4B er omregnet til relativ luftfugtighed med metoden beskrevet i afsnittet herunder. Denne beregnede relative fugtighed og den målte temperatur i klinkbeklædningen er benyttet i simuleringerne som udvendig randbetingelse til beskrivelse af forholdene på den udvendige side af vindspærren. De beregnede relative luftfugtigheder i klinkbeklædningen og de målte temperaturer er interpolerede lineært til timeværdier.

Som indvendig randbetingelse er der ved simuleringerne benyttet lufttemperatur og relativ luftfugtighed målt inde i Fugtforsøgshuset.

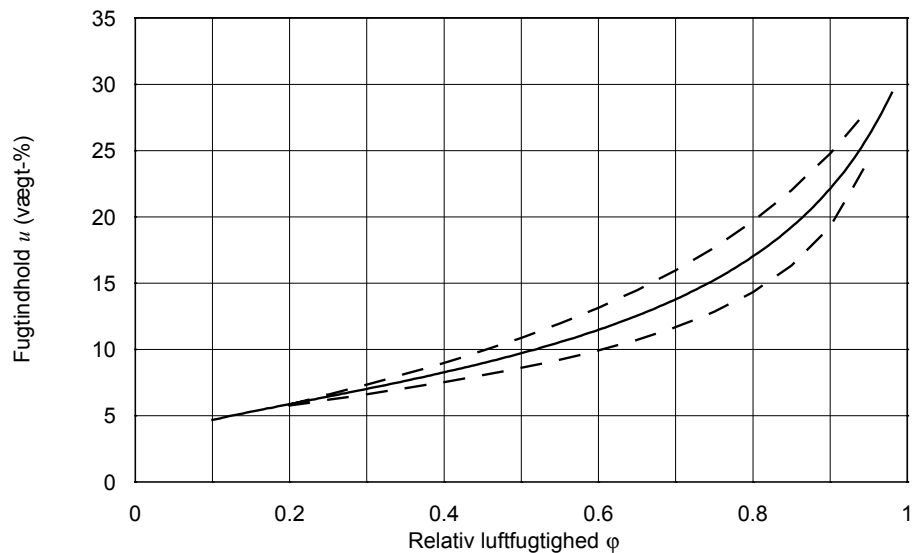
Ud fra de målte klimadata er der for hver af forsøgsfelterne 3 og 4B fremstillet en referenceårs-fil til MATCH. Filerne indeholder timeværdier af lufttemperatur og relativ luftfugtighed indendørs og udendørs for perioden 1. marts 1998 – 28. februar 1999.

## Omregning mellem målte vandindhold i bøgetræsdyvler og relativ luftfugtighed

For at kunne fremstille en referenceårsfil til brug for simuleringerne og for at kunne sammenligne resultaterne fra MATCH-simuleringerne med målingerne foretaget i By og Bygs Fugtforsøgshus, er der omregnet fra fugtindholdet målt med fugtmåledyvler til relativ luftfugtighed. Omregningen er foretaget ved brug af en sorptionsisoterm for bøgetræ, der er beregnet som middelværdien af ad- og desorptionsisotermen, se figur 28. Ved omregningen er der benyttet følgende udtryk til beskrivelse af sorptionsisotermen.

$$u = a \left( 1 - \frac{\ln \varphi}{c} \right)^{-1/b} \quad (1)$$

hvor  $u$  er fugtindholdet (kg/kg),  $\varphi$  er den relative luftfugtighed (dimensionsløs),  $a = 0,3212$  kg/kg,  $b = 1,47$  og  $c = 0,1448$ . Udtrykket (1) er oprindeligt beskrevet i (Freiesleben Hansen, 1985).



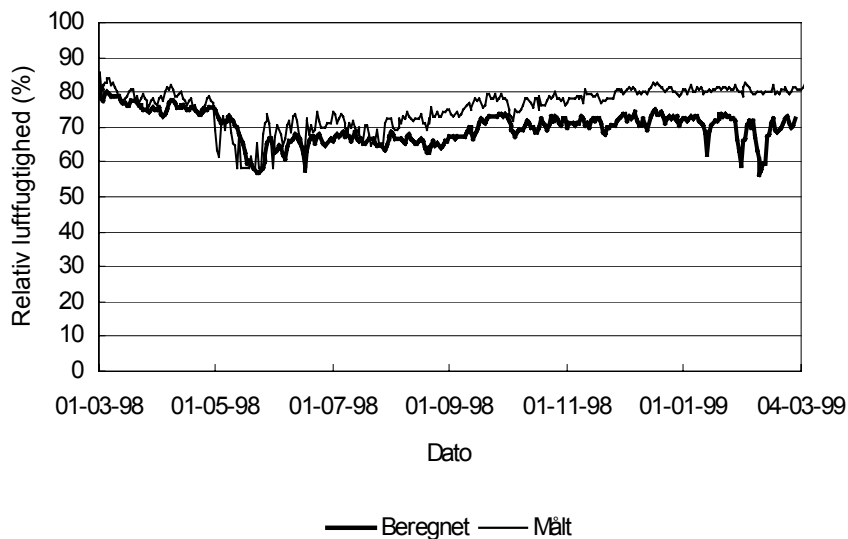
Figur 28. Sorptionsisoterm for bøgetræ. Nederste og øverste kurve viser henholdsvis ad- og desorptionsisotermen (punkterede linier), data fra (Kielsgaard Hansen, 1986). Den midterste kurve er middelkurven givet ved ligning (1).

Af ligning (1) kan den relative luftfugtighed svarende til et givent målt fugtindhold bestemmes som:

$$\varphi = \exp \left[ c \left( 1 - \left( \frac{a}{u} \right)^b \right) \right] \quad (2)$$

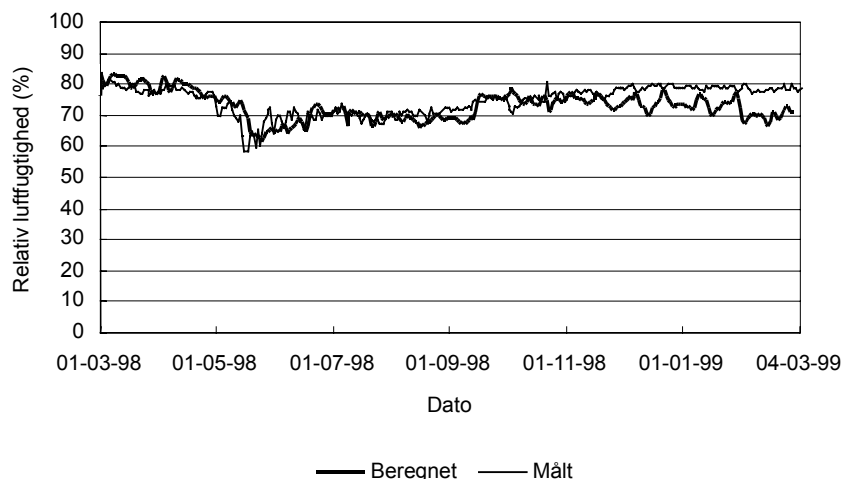
### Beregningsresultater

Figur 29 viser beregnet og målt relativ luftfugtighed bag vindspærren i nordvendt forsøgsfelt 3. Forsøgsfeltet er isoleret med mineraluld. Den målte relative luftfugtighed er omregnet fra vægt-% fugt i bøgetræ med udtrykket (2).



Figur 29. Beregnet og målt relativ luftfugtighed bag vindspærren i nordvendt forsøgsfelt 3. Forsøgsfeltet er isoleret med mineraluld.

Figur 30 viser beregnet og målt relativ luftfugtighed bag vindspærren i nordvendt forsøgsfelt 4B. Forsøgsfeltet er isoleret med Papirisolering.



Figur 30. Beregnet og målt relativ luftfugtighed bag vindspærren i nordvendt forsøgsfelt 4B. Elementet er isoleret med papirisolering.

### Diskussion

Beregnet og målt relativ luftfugtighed bag vindspærren i forsøgsfelt 3 stemmer godt overens i perioden 1. marts 1998 – 1. august 1998, se figur 29. Derefter er de beregnede værdier op til 8 % relativ luftfugtighed mindre end de målte.

Beregnet og målt relativ luftfugtighed bag vindspærren i forsøgsfelt 4B stemmer godt overens i perioden 1. marts 1998 – 15. november 1998, se figur 30. Derefter er de beregnede værdier ca. 5 % relativ luftfugtighed mindre end de målte.

For begge simuleringerne af fugtforholdene bag vindspærren gælder, at de stemmer godt med måleresultaterne i perioden med udtørring (marts - august 1998) men knap så godt i perioden med opfugtning (efter august 1998).

# Sammenligninger med andre målinger

## Cellulose 38% bedre end glasuld ?

I (Spieziele, 1990) er resultaterne fra isolering med henholdsvis "wet spray" cellulose og glasuld af to 6 m<sup>2</sup> store huse af rapporteret med konklusionen: "the performance of cellulose versus fiberglass is as much as 38 % better".

### Uisolerede huse

De to huse benævnt A (senere isoleret med cellulose) og B (senere isoleret med glasuld) er begge udført med lette konstruktioner.

### Lufttæthed ved 50 Pa

Efter opførelsen blev husenes tæthed undersøgt med en "Blower door test" (Canadian General Standards Board, 1986). Luftstrømmene ved en trykforskel på 50 Pa blev målt til henholdsvis 90,8 og 80,9 l/s, se tabel 6. De dertil svarende luftskifter kan beregnes til 24 og 21 gange i timen, idet det skønnes at huset er 2 × 3 m og har en højde på 2,3 m og dermed et rumfang på 13,8 m<sup>3</sup>.

Tabel 6. Målte luftstrømme og beregnet luftskifte ved en trykforskel på 50 Pa inden isolering af husene.

Hus		A	B
Luftstrøm	l/s	90,8	80,9
Luftstrøm	m <sup>3</sup> /h	327	293
Luftskifte (50 Pa)	h <sup>-1</sup>	24	21

Der er ikke stor forskel på de to lette og uisolerede huses tæthed, men begge huse er meget utætte i forhold til tilsvarende målinger på isolerede og "rigtige" huse, der er foretaget i Europa (Olufsen, 1984), se tabel 7.

### Varmetab og luftskifte

De uisolerede huse blev i perioden fra 12.12.1989 til 2.1.1990 opvarmet til 65 °F (18,3 °C) og energiforbruget blev målt til henholdsvis 469 og 473 kWh. Varmetabet for de to huse, i de 21 dage, er dermed henholdsvis 931 W og 938 W.

Der er ikke angivet udetemperatur, men for en senere periode (24.1.1990 til 12.2.1990) er angivet den daglige max. og min. temperatur. "Gennemsnittet" for denne periode er 6 °C, hvilket giver en temperaturdifferens på 12 °C.

Husenes dimensioner er ikke angivet, kun at arealet er 6 m<sup>2</sup>. Et skøn er, at husene er 2 × 3 m og 2,3 m høje, dette giver et vægareal på 23 m<sup>2</sup>. Der er en dør på ca. 2 m<sup>2</sup> og et vindue på ca. 1 m<sup>2</sup>, hvilket giver et netto vægareal på 20 m<sup>2</sup>.

Husenes transmissionstab (varmetab gennem facader, gulv og loft) kan anslås til 821 W, se tabel 8.

Tabel 7. Målinger af klimaskærmens tæthed med trykmetoden (Olufsen, 1984). Talangivelserne er lækagen målt som luftskifte i  $h^{-1}$  ved et over- eller undertryk på 50 Pa. Resultaterne er middelværdier af de angivne antal målinger. Backmark og Blomqvist's materiale omfatter 168 enfamiliehuse, som alle er træskeletkonstruktioner, samt 27 rækkehuse og 156 etagelejligheder, som alle er betonkonstruktioner. Øvrige forfattere har undersøgt blandede konstruktioner.

Land/kilde	Byggeår	Småhus	Rækkehus	Etagebolig
Danmark	før 1974	7,5 $h^{-1}$		
Collet, 1976		(11 boliger)		
Sverige	før 1976	5,1 $h^{-1}$		2,4 $h^{-1}$
Kronvall, 1979		(35 boliger)		(15 boliger)
	1976-78	3,4 $h^{-1}$		1,0 $h^{-1}$
		(297 boliger)		(23 boliger)
Sverige	1979-82	2,7 $h^{-1}$	1,1 $h^{-1}$	1,0 $h^{-1}$
Backmark & Blomq., 1983		(168 boliger)	(27 boliger)	(156 boliger)
Norge	1975-80	4,7 $h^{-1}$		1,3 $h^{-1}$
Brunsell & Uvsløkk, 1980		(61 boliger)		(34 boliger)
England	1963-83	13,9 $h^{-1}$		
Warren, 1983		(19 boliger)		

Tabel 8. Beregning af hus A og B's transmissionstab før isolering.

	$U$ -værdi	Areal	$UA$	Temperatur-differens	Transmissionstab
	$W/m^2K$	$m^2$	$W/K$	$K$	$W$
Tag	2,3	6	13,8	12	166
Væg	2,3	20	46	12	552
Gulv	0,1	6	0,6	12	7
Dør	2	2	4	12	48
Vindue	4	1	4	12	48
$UA/$ Transmissionstab i alt			68		821

Det resterende varmetab er ventilationstab, som er beregnet i tabel 9.

Ud fra ventilationstabets kan luftskiftet beregnes med formlen (Dansk Ingeniørforening, 1986):

$$\Phi = 0,34 n V \Delta T$$

hvor  $\Phi$  er ventilationstab,  $n$  er luftskiftet,  $V$  er rumfanget og  $\Delta T$  er temperaturdifferensen mellem inden- og udendørsluft, se tabel 9.

Tabel 9. Beregnet ventilationstab og luftskifte før isolering.

Hus		A	B
Varmetab	W	931	938
Varmetab facade mm	W	821	821
Ventilationstab	W	115	117
Luftskifte	$h^{-1}$	2,0	2,1

Da ventilationstabets kun udgør 12 % af det samlede varmetab, vil fejlskøn af  $U$ -værdier, arealer og udetemperatur influere en del på det beregnede luftskifte. Men det ses dog at husene, sammenlignet med danske forhold, er ret utætte, inden de er isoleret.

## Isolerede huse

Hus A blev isoleret med "wet spray" cellulose i væggene og løst udblæst cellulose på loftet. Hus B blev isoleret med glasuldsmåtter med "kraftpapir" i såvel vægge som loft.

### Lufttæthed ved 50 Pa

De to huses tæthed blev igen undersøgt med "Blower door test" (Canadian General Standards Board, 1986). Den luftmængde, der nu skulle til for at opretholde en trykforskel på 50 Pa mellem ude og inde, blev målt til henholdsvis 29 og 48 l/s, se tabel 19. De dertil svarende luftskifter kan beregnes til 8 og 13 gange i timen.

Tabel 10. Målte luftstrømme og beregnet luftskifte ved en trykforskel på 50 Pa efter isolering af husene.

Hus		A	B
Isolering		Cellulose	Glasuld
Luftstrøm	l/s	29	48
Luftstrøm	m <sup>3</sup> /h	104	173
Luftskifte (50 Pa)	h <sup>-1</sup>	8	13

### Varmetab og luftskifte

Husene blev fra 24.1.1990 til 12.2.1990 atter opvarmet, der er ikke angivet til hvilken temperatur, men det antages, at det igen er til 65 °F (18,3 °C). Husene havde et energiforbrug på henholdsvis 83 og 105 kWh. Varmetabet for de to huse, i de 19 dage, er dermed henholdsvis ca. 182 og 230 W. Ud fra angivelsen af den daglige max. og min. udetemperatur er "gennemsnittet" for denne periode beregnet til 6 °C, hvilket giver en temperaturdifferens på 12 °C.

Husenes transmissionstab (varmetab gennem facader, gulv og loft) bliver ca. 194 W, se tabel 11.

Tabel 11. Beregning af hus A og B's transmissionstab efter isolering.

	U-værdi	Areal	UA	Temperaturdifferens	Transmissionstab
	W/m <sup>2</sup> K	m <sup>2</sup>	W/K	K	W
Tag	0,2	6	1,2	12	14
Væg	0,32	20	6,4	12	77
Gulv	0,1	6	0,6	12	7
Dør	2	2	4	12	48
Vindue	4	1	4	12	48
UA/Transmissionstab i alt			16,2		194

Da det beregnede transmissionstab for bygning A, er større end det samlede varmetab, må der være fejlskøn i nogle af forudsætningerne. Ventilationstabet kan derfor ikke beregnes eksakt, men ud fra opstillede varmebløvsregninger kan tilnærmede værdier bestemmes:

$$\Phi = \Phi_v + \Phi_t = 0,34 V n \Delta T + U A \Delta T \Rightarrow$$

$$\Phi/\Delta T = 0,34 V n + U A$$

Hvis det antages, at forholdet mellem luftskifterne for hus A og B under naturlige forhold, svarer til forholdet mellem luftskifterne målt ved 50 Pa, kan følgende udtryk opstilles vedrørende luftskifterne i hus A og hus B før og efter isolering:

$$\begin{aligned}
n_{A,1} &= n \\
n_{B,1} &= 21/24 \cdot n \\
n_{A,2} &= 8/24 \cdot n \\
n_{B,2} &= 13/24 \cdot n
\end{aligned}$$

(hvor indices  $_A$  og  $_B$  står for henholdsvis hus A og hus B, og indices  $_1$  og  $_2$  for henholdsvis før og efter isolering) og det endvidere antages, at hus A og hus B har samme specifikke varmetab før isolering:

$$(UA)_{A,1} = (UA)_{B,1}$$

kan følgende ligninger opstilles:

$$\begin{aligned}
938/12 &= 0,34 \cdot 13,8 \cdot 1 \cdot n + (UA)_{A,1} \\
931/12 &= 0,34 \cdot 13,8 \cdot 21/24 n + (UA)_{A,1} \\
182/12 &= 0,34 \cdot 13,8 \cdot 8/24 n + (UA)_{A,2} \\
230/12 &= 0,34 \cdot 13,8 \cdot 13/24 n + (UA)_{B,2}
\end{aligned}$$

der kan omskrives til følgende ligningssystem:

$$\begin{bmatrix} 4,692 & 1 & 0 & 0 \\ 4,106 & 1 & 0 & 0 \\ 1,564 & 0 & 1 & 0 \\ 2,541 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ (UA)_{A,1} \\ (UA)_{A,2} \\ (UA)_{B,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 938/12 \\ 931/12 \\ 182/12 \\ 230/12 \end{bmatrix}$$

Den bedste mulige løsning til dette ligningssystem kan findes med "problemløser" i Excel ved at minimere summen af afvigelsernes numeriske værdi, hvilket giver:

$$\begin{bmatrix} n \\ (UA)_{A,1} \\ (UA)_{A,2} \\ (UA)_{B,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,10 \\ 73,0 \\ 13,5 \\ 16,4 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Luftskifte hus A, uisoleret (h}^{-1}\text{)} \\ \text{Specifikt varmetab i uisoleret hus (W/K)} \\ \text{Specifikt varmetab i hus isoleret med cellulose (W/K)} \\ \text{Specifikt varmetab i hus isoleret med glasuld (W/K)} \end{array}$$

Dermed kan de øvrige luftskifter beregnes:

$$\begin{aligned}
n_{B,1} &= 0,96 && \text{Luftskifte i hus B, uisoleret (h}^{-1}\text{)} \\
n_{A,2} &= 0,37 && \text{Luftskifte i hus A, isoleret med cellulose (W/K)} \\
n_{B,2} &= 0,60 && \text{Luftskifte i hus B, isoleret med glasuld (W/K)}
\end{aligned}$$

Efter isoleringen har hus A, der er isoleret med cellulose, et luftskifte der er meget mindre end hus B, der er isoleret med glasuld, samt et mindre energiforbrug, se tabel 12.

Tabel 12. Ændringer i luftskifter og energiforbrug som følge af isolering

Hus	A		B
	Cellulose	Glasuld	
Luftskifte (50 Pa) før isolering	24	21	h <sup>-1</sup>
Luftskifte (50 Pa) efter isolering	8	13	h <sup>-1</sup>
Luftskifte efter isolering i forhold til før	33	62	%
Energiforbrug før isolering	469	473	kWh
Energiforbrug efter isolering	83	105	kWh
Energiforbrug efter isolering i forhold til før	18	22	%



Det kan ikke konkluderes, om det mindre energiforbrug skyldes, at cellulose har en bedre isoleringsevne end glasuld, eller om det kun skyldes, at huset er mere tæt. De udførte beregninger indikerer, at cellulose har en lavere  $U$ -værdi end glasuld, men da der ikke er eksakte løsninger til ligningerne, og der ligger mange skøn i forudsætningerne, kan det ikke med sikkerhed konkluderes, at der er forskel i  $U$ -værdierne. Derimod kan det konkluderes, at hvis man har en byggetradition med meget utætte konstruktioner, vil det ifølge disse målinger være en fordel at isolere med "wet spray" cellulose, da det "tætner" bedre end glasuld.

Der er derfor ingen modsætning til de af By og Bygs fundne resultater, at Papirisolering ikke isolerer helt så godt som Rockwool.

## Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold

I (Kristiansen, 1999) er varmeledningsevnen ( $\lambda$ -værdien) for flere alternative isoleringsprodukter samt et traditionelt produkt bestemt under forskellige fugtmæssige betingelser i et specielt konstrueret varmepladeapparat. Varmepladeapparatet er opbygget med en luftspalte på hver side af prøveemnet, hvor fugtmæssigt konditioneret luft kan passere. Hermed er det muligt at opbygge forskellige fugtigheder på hver side af prøveemnet. Varmeledningsevnen er bestemt for blandt andet følgende typer alternative isoleringsprodukter: Ekofiber Vind, Isodan med og uden salte, Miljø Isolering med og uden salte samt Rockwool A-batts til sammenligning.

Varmeledningsevnen er optegnet som funktion af fugtindholdet i isoleringsmaterialet angivet som middelværdien af "den relative luftfugtighed" umiddelbart bag afdækningen mod luftspalterne. "Den relative luftfugtighed" er beregnet ud fra den relative luftfugtighed i spalten. Rapporten konkluderer:

*"Varmeledningsevnen udviser for alle materialer kun en lille afhængighed af fugtniveauet, indtil dette når et vist højt niveau (gennemsnits-RF over ca. 75 %). Derefter stiger varmeledningsevnen betydeligt - med op til 50 %. Men denne stigning må formodes at være forårsaget af en opbobling af fugt som kondens i de dele af isoleringen, der ligger umiddelbart bag afdækningen mod luftspalten på den kolde side".*

$U$ -værdien i denne rapport er optegnet som funktion af fugtindholdet bag vindspærren målt med trædyvler og angivet vægt % (masse %), det maksimale fugtindhold er 18 %. Fugtindholdet i isoleringens varme side er < 11 %. De hertil svarende relative luftfugtigheder er henholdsvis ca. 80 % og ca. 60 % (fås via træs sorptionskurve), dette giver en middelfugtindhold på ca. 70 % RF.

Det vil sige, at begge undersøgelser viser, at varmeledningsevnen ( $U$ -værdien) ikke er afhængig af fugtindholdet i isoleringen, så længe der er tale om konstruktioner med et acceptabelt fugtindhold.

# Summary

## By og Byg Documentation 009: Cellulose loose-fill insulation material

Thermal transmittance determined by means of heat flow meters

Determination of design values of thermal conductivity,  $\lambda_p$ , for insulation materials is based on the laboratory measured  $\lambda_p$ -values ( $\lambda_{10}$ ) of dry materials and experience gained over many years. Only limited documentation regarding cellulose loose-fill insulation is available, as this type of insulation has only been used in Denmark for comparatively few years.

By og Byg has received a grant to investigate the insulating properties of cellulose insulation materials in a number of facade elements, including the dependency of insulating properties on the moisture content.

The insulating properties also depends on other parameters, e.g. workmanship in connection with the actual insulation and any subsequent settling of the insulation material. These aspects has not been investigated in this project.

### Experiments

The heat flow through facade elements insulated with Papiruld (a cellulose loose-fill insulation material) and Rockwool A-Batts respectively was determined by means of built-in heat flow meters. Measurements were performed in connection with a project on moisture accumulation in highly insulated wooden facades.

The measurements determined, not the thermal transmittance of the insulation material alone, but the total thermal transmittance measured at the central part of the facade where insulation was assumed to be correctly executed.

Two facade elements insulated with 285 mm Papiruld were used for measurements; one of the facade elements had a vapour retarder, the other did not. Moreover, two facade elements insulated with Rockwool were used as a reference; one with 285 mm insulation, the other with 190 mm. Both elements were provided with a vapour barrier. The facade elements were constructed as light wooden facade elements with a ventilated cladding of lap-sided pine boards.

The moisture content was registered once every 12 hours with moisture measuring dowels placed in the facade cladding, in the distance battens, in the exterior of the construction wood, in the insulation behind the wind barrier and in the insulation at the vapour barrier/vapour retarder/interior cladding. Indoor and outdoor temperatures, indoor and outdoor relative air humidity and the heat flow through the facade elements were recorded every hour. The maximum moisture content recorded was 18 weight-% (moisture in wood) and was found in the insulation material immediately behind the wind barrier. The moisture content of the individual elements does not differ significantly.

### Calculations

The U-value (the thermal transmittance) of the facades was calculated from the measurements of the heat flow through the four facade elements. These 'measured' U-values were compared with U-values calculated according to

the Danish standard DS 418 (Dansk Ingeniørforening, 1986). Moreover, the  $U$ -values as a function of the moisture content were analysed.

Moisture conditions in two of the facade elements, insulated with Papiruld and Rockwool respectively, were simulated using the coupled heat and moisture transfer computer programme MATCH and compared with the measured moisture content.

### Conclusion

The values measured for the heat flow through facade elements insulated with Papiruld and Rockwool respectively show that:

- The two facade elements insulated with Papiruld have a higher  $U$ -value than the corresponding facade elements insulated with Rockwool, i.e. larger heat flow. This means that in order to obtain the same insulating properties, the facade elements insulated with Papiruld must have a thicker layer of insulating material than elements insulated with Rockwool.
- The measured  $U$ -values were approx. 10 % lower than the calculated  $U$ -values. This was expected as the  $\lambda_p$ -values used for the calculation took into account possible defects in workmanship or settlements.
- The heat insulating properties did not change significantly with changes in the moisture content of the facade elements in the investigated moisture content range.

The MATCH calculations show that the calculated and measured moisture content in the insulation material behind the wind barrier corresponds reasonably well, whether the facade elements are insulated with Papiruld or with Rockwool. This shows, that the MATCH calculations can also be used for simulating moisture accumulation in constructions that are insulated with Papiruld.

# Litteratur

Andersen, N. E., Christensen, G., & Nielsen, F. (1993). *Bygningers fugtisolering* (SBI-anvisning 178). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Canadian General Standards Board. (1986). *Determination of the airtightness of building envelopes by the fan depressurization method* (CAN/CGSB-149.10-M86). Ottawa, Canada.

Dansk Ingeniørforening. (1986). *Dansk ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab* (5. udg.) (Dansk Standard DS 418 = Normstyrelsens publikationer NP-186-S). København: Teknisk Forlag.

Dansk Standard. (2000). *Tillæg 2 til DS 418, beregning af bygningers varmetab: Tillæg omhandlende løsfyldsprodukter* (DS 418/Til.2). København.

Freiesleben Hansen, P. (1985). *Koblet fugt/varmetransport i konstruktions-tværsnit af beton* (Arbejdsnotat). Lyngby: Beton- og Konstruktionsinstituttet.

Kielsgaard Hansen, K. (1986). *Sorption isotherms: A catalogue* (Technical Report 162/86). Lyngby: Technical University of Denmark, Building Materials Laboratory.

Korsgaard, V., & Lund Madsen, T. (1964). *Isoleringsevnen af nogle typiske ydervægge udsat for det naturlige klima* (Meddelelse nr. 8). Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Varmeisolering. København: Teknisk Forlag.

Kristiansen, F., & Rode, C. (1999). *Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold: Del af varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer* (Sagsrapport SR-0004). Lyngby: Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi.

Olufsen, P. (1984). *Boligventilationssystemer: Teori og erfaringer* (SBI-rapport 161). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

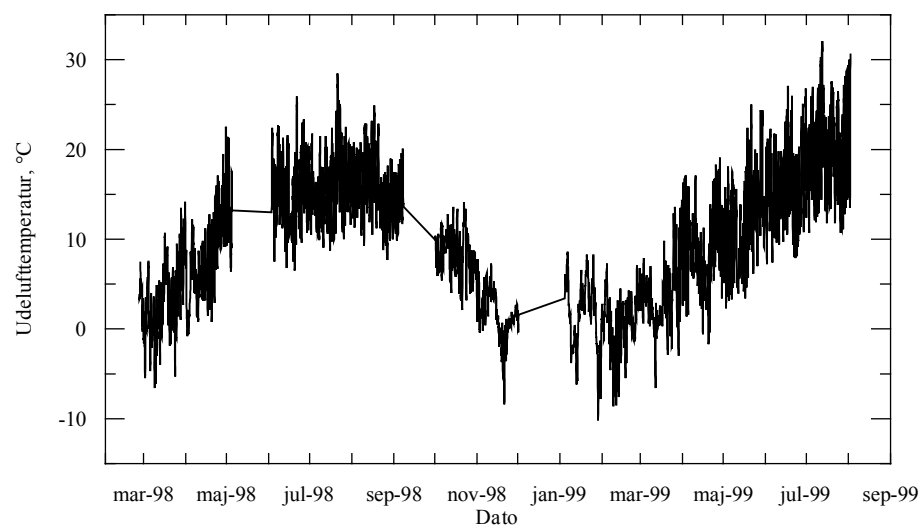
Rasmussen, T. V. (2001). *Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering*. Upubliceret. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Rode, C., & Rasmussen, N. T. (1999). *Beregnete fugtforhold i konstruktioner: Del af varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer* (Sagsrapport SR-0006). Lyngby: Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Bygninger og Energi.

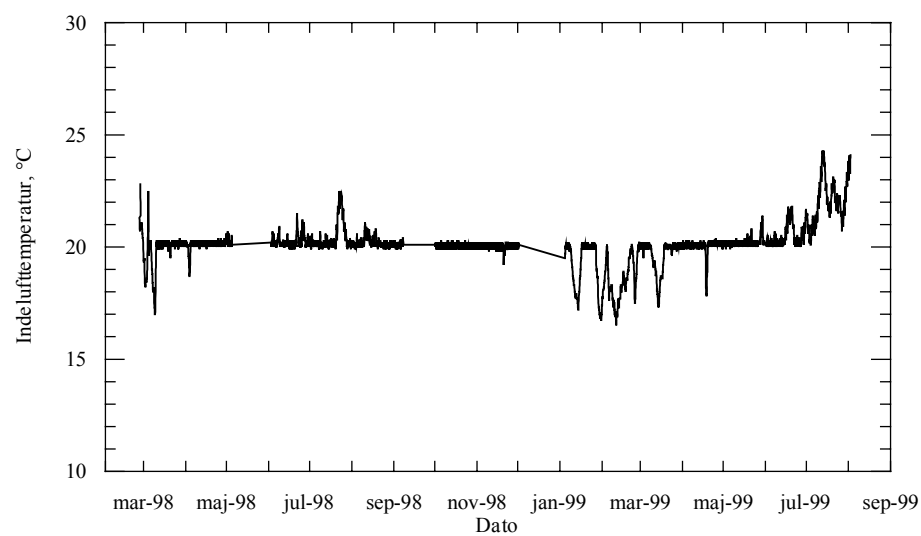
Rode Pedersen, C. (1990). *Combined heat and moisture transfer in building constructions* (2<sup>nd</sup> ed.) (Report no. 214). Lyngby: Technical University of Denmark, Thermal Insulation Laboratory.

Spiegle, S. R. (1990). *Wet spray cellulose installation and performance*. Denver, CO: National Thermal Performance Institute.

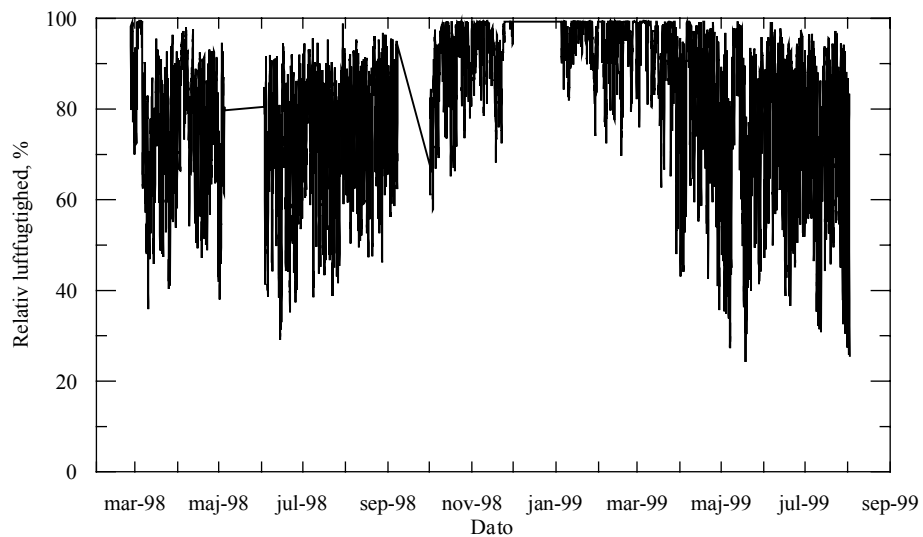
# Bilag 1 Forsøgspåvirkninger



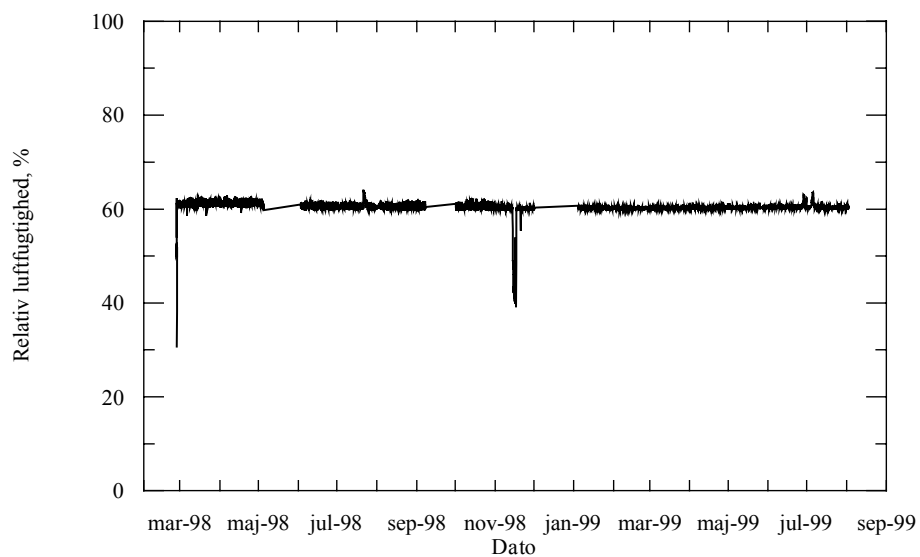
Figur 31. Udelufttemperatur i forsøgsperioden.



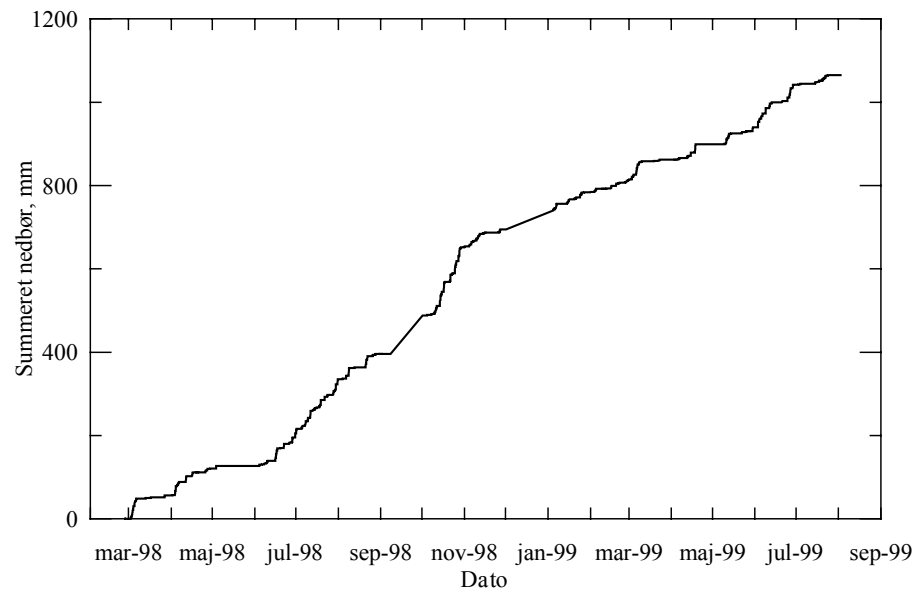
Figur 32. Indelufttemperatur i forsøgsperioden.



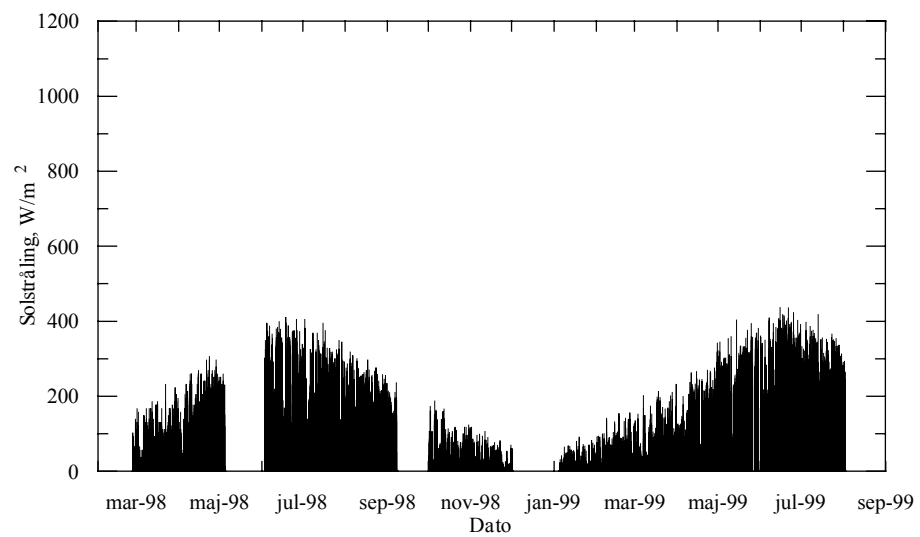
Figur 33. Udeluftens relative luftfugtighed i forsøgsperioden.



Figur 34. Indeluftens relative luftfugtighed i forsøgsperioden.



Figur 35. Nedbør i forsøgsperioden.



Figur 36. Solstråling fra nord i forsøgsperioden.

## Bilag 2 Fugtbelastning

For at vurdere om den fugtbelastning elementerne har været udsat for, i løbet af forsøgsperiodens vinter, er normal, kan man sammenligne fugtbelastningen med den fugtbelastning, der ville have været, hvis elementerne havde været udsat for referenceårets fugtbelastning. Referenceåret (Andersen et al., 1982) er et konstrueret år med gennemsnitlige påvirkninger af temperatur, fugt, sol m.m.

Elementernes fugtbelastning vurderes ved den fugtophobning der sker i elementerne i løbet af en vinter. Når damptrykket er højere inde end ude sker der en fugtdiffusion indefra og ud. Dette medfører fugtophobningen ved kondensation i de yderste lag af elementet, når udetemperaturen er mindre end den til indeklimaet svarende dugpunktstemperatur. Ved det valgte indeklima 20 °C og 60 % RF er dugpunktstemperaturen 12 °C. I månederne oktober til marts har referenceåret lavere udetemperatur end 12 °C.

Tilsvarende begrebet graddøgn, der benyttes til vurdering af varmeforbrug, er begrebet Pascaldøgn defineret i (Nicolajsen, 1978). Pascaldøgn er produktsummen af damptryksdifferensen mellem inde og ude i Pascal og antal døgn i den periode der sker kondens.

Nedenfor er angivet de Pascaldøgn, forsøgselementerne blev udsat for, og de tilsvarende Pascaldøgn, som de ville have været udsat for, hvis udeklimaet havde været referenceårets udeklima. Endelig er angivet de Pascaldøgn, forsøgselementerne ville have været udsat for, hvis der havde været 23 °C og 50 % RF inde, hvilket er det indeklima, der er benyttet ved definitionen af Pascaldøgn, svarende til almindeligt indeklima. I (Nicolajsen, 1978) er referenceårets Pascaldøgn opgjort til 166.000 Pascaldøgn, forskellen skylles, at beregningerne i den rapport er udført med data fra det første referenceår (Andersen et al., 1974).

Fugtbelastning har været 9 % lavere end referenceårets belastning, hvilket skyldes, at den ønskede indetemperatur på 20 °C ikke har været opretholdt hele vinteren.

	Aktuelle inde- og udeklima	Aktuelle indeklima Referenceårets udeklima	23 °C, 50 % RF inde Referenceårets udeklima
Måleperiode	Pascaldøgn	Pascaldøgn	Pascaldøgn
01.10.98-31.05.99	145.000	148.000	158.000

### Litteratur:

Andersen, B., et al. (1974). *Vejrdata for VVS-tekniske beregninger, Referenceår* (SBI-rapport 89). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Andersen, B., et al. (1982). *Vejrdata for VVS og energi - Dansk referenceår-TRY*. (SBI-rapport 135). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

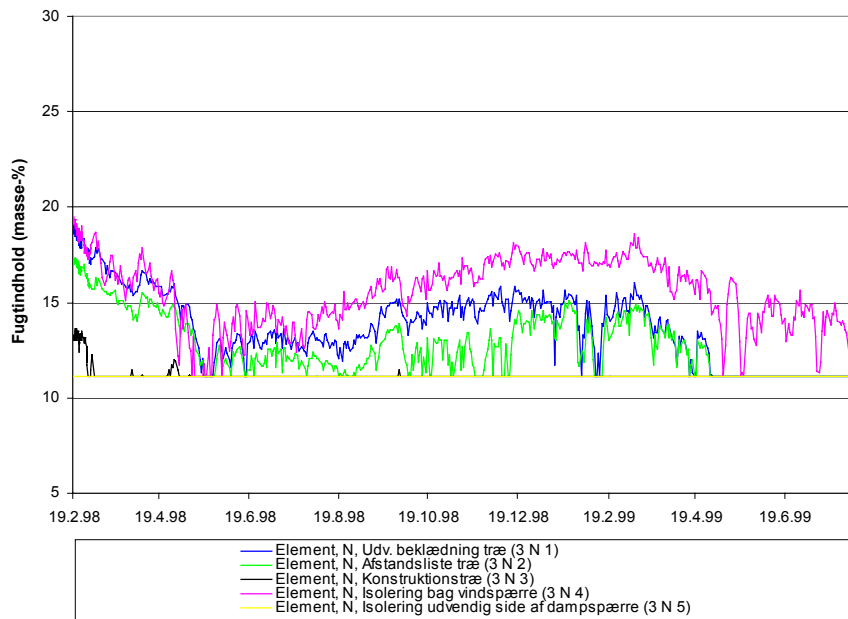
Nicolajsen, A. (1978). *Mineraluldbaserede sandwichelementer. Laborieforsøg til bedømmelse af de fugttekniske egenskaber* (SBI-rapport 114). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.



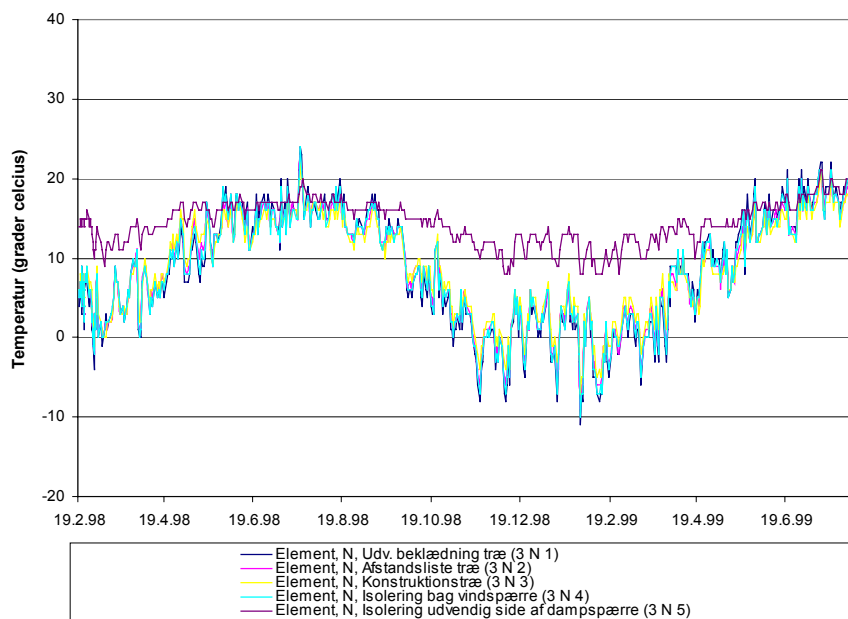
## Bilag 3 Målepunkternes placering

Betegnelse	Placering
1	Facadebeklædning, bund
2	Højre afstandsliste, bund
3	Højre stolpe, bund
4	I isolering på inderside af vindspærre, bund
5	I isolering på yderside af dampspærre, bund
6	I isolering på yderside af dampbremse/indvendig beklædning, bund

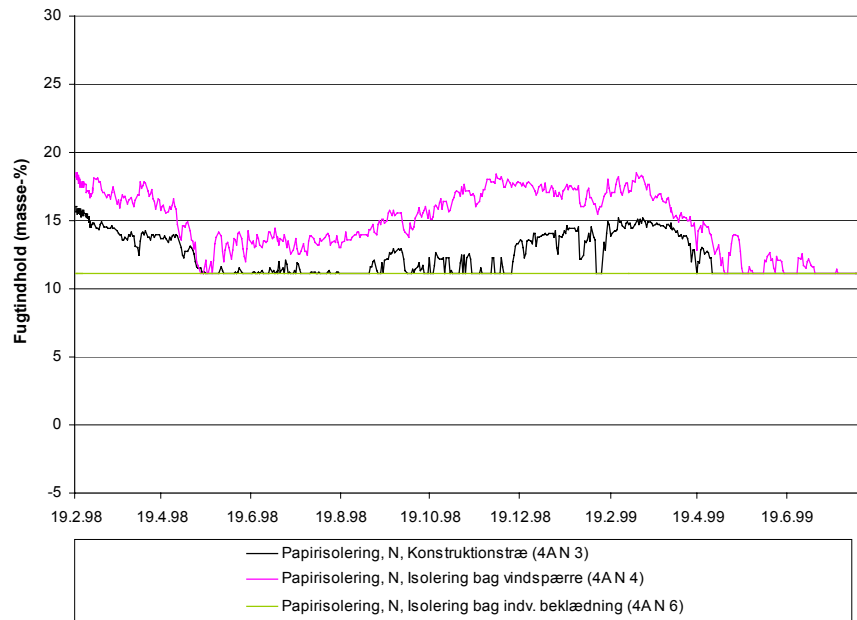
# Bilag 4 Fugt og temperatur i facadeelementer



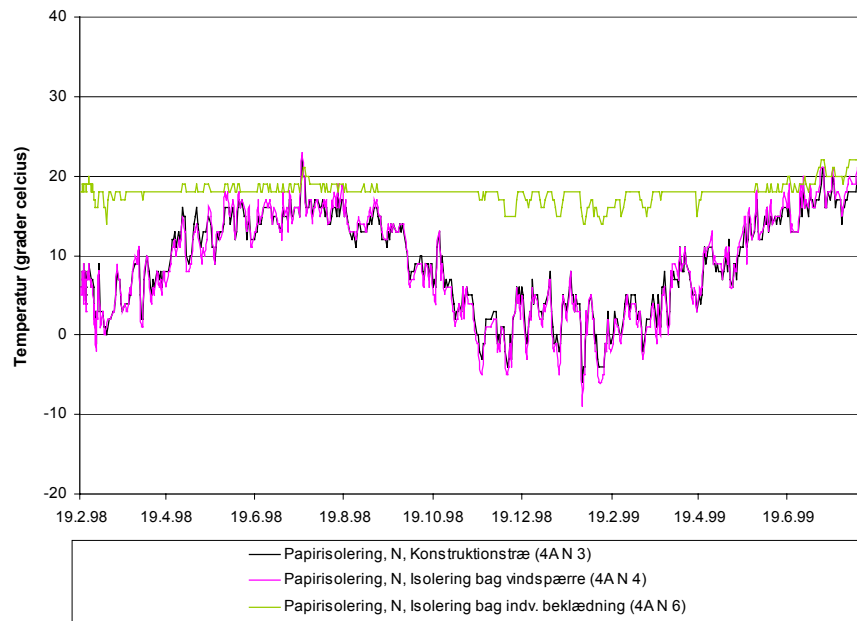
Figur 37. Fugtindhold i facadeelement "Element" mod nord.



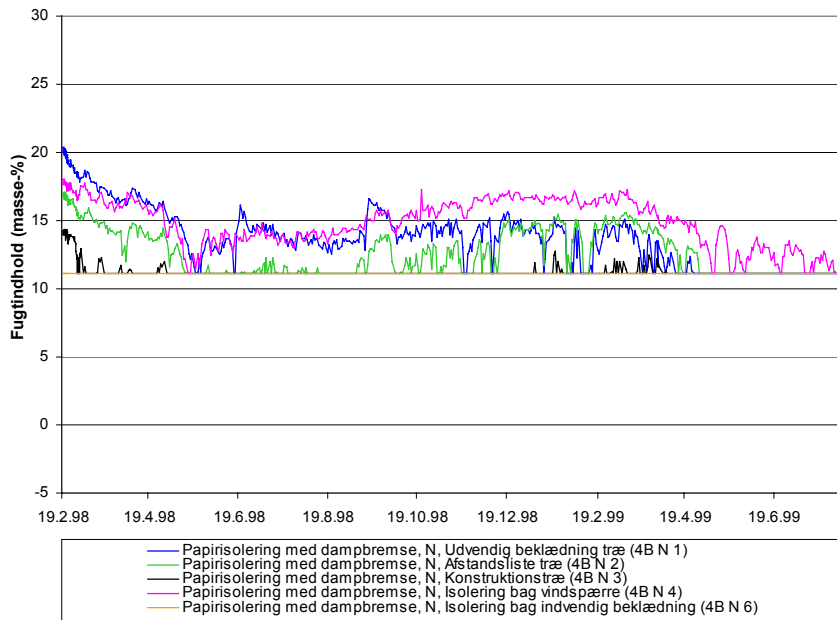
Figur 38. Temperaturforløb i facadeelement "Element" mod nord.



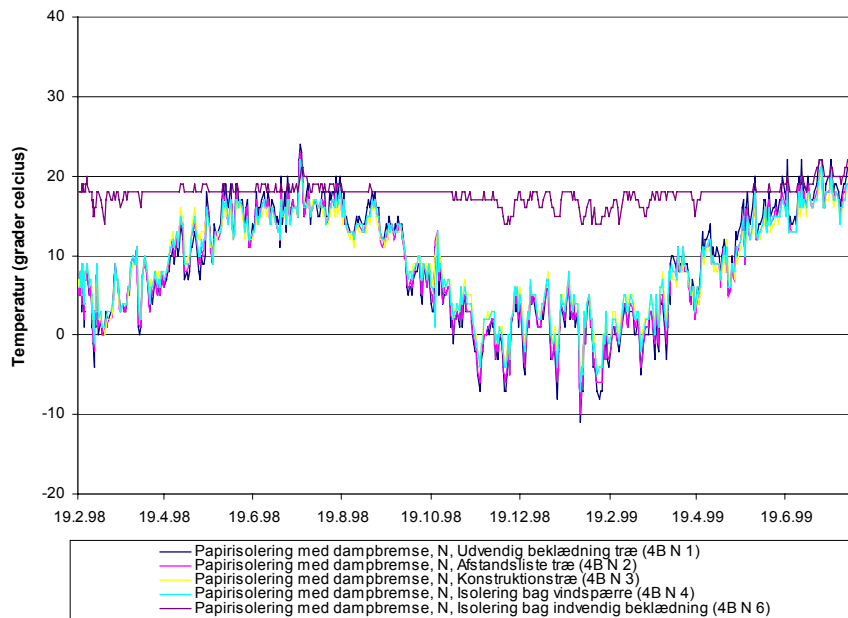
Figur 39. Fugtindhold i facadeelement "Papirisolering" mod nord.



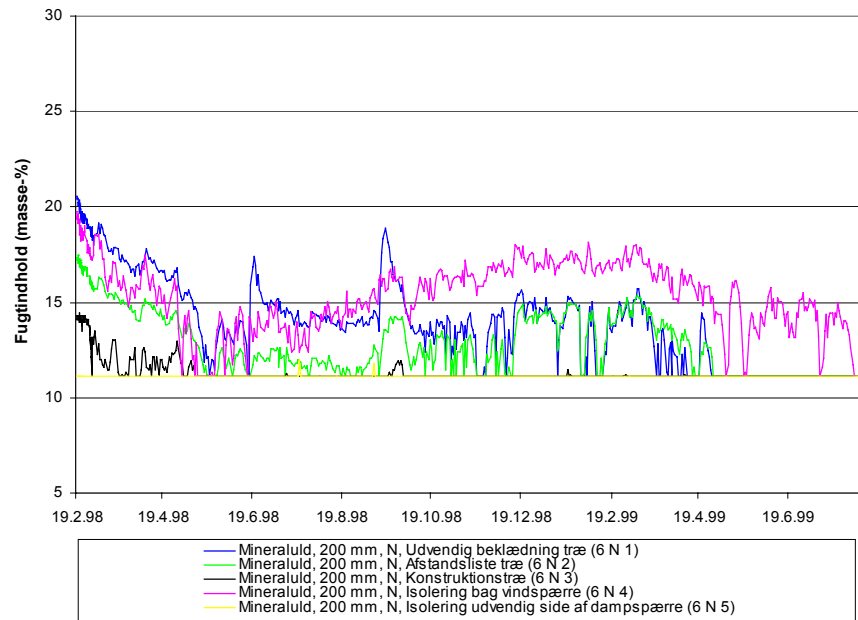
Figur 40. Temperaturforløb i facadeelement "Papirisolering" mod nord.



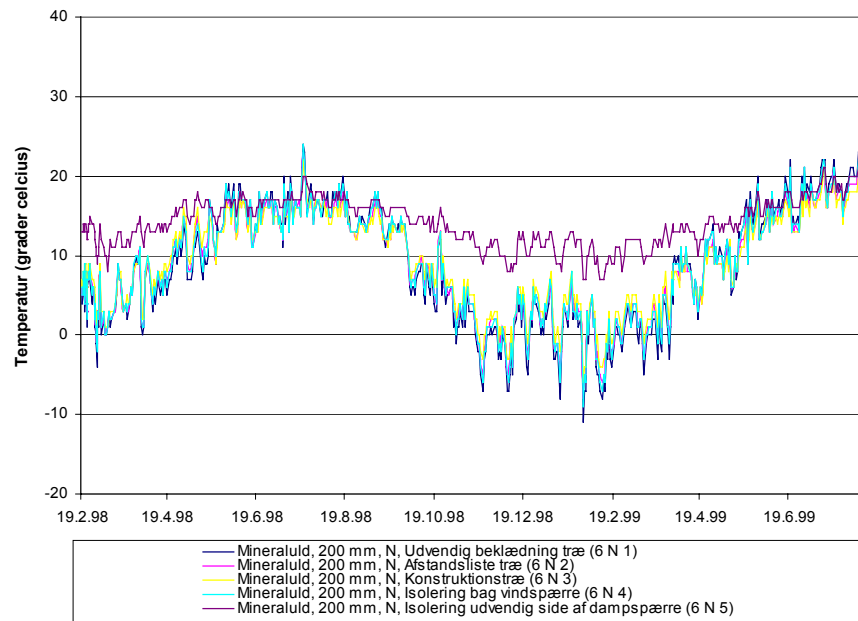
Figur 41. Fugtindhold i facadeelement "Papirisolering med dampbremse" mod nord.



Figur 42. Temperaturforløb i facadeelement "Papirisolering med dampbremse" mod nord.



Figur 43. Fugtindhold i facadeelement "Mineraluld" mod nord.



Figur 44. Temperaturforløb i facadeelement "Mineraluld" mod nord.

Har papirisolering en bedre isoleringsevne end mineraluld? Varmestrømmen gennem lette træfacadeelementer isoleret med henholdsvis Papiruld og Rockwool er bestemt med indbyggede varmestrømsmålere. Fugtindholdet i isoleringen bag vindspærre er registreret for at undersøge, om isoleringsevnen er afhængig af fugtindholdet. Målingerne viser, at varmestrømmen gennem et facadeelement isoleret med Papiruld er større end varmestrømmen gennem et tilsvarende facadeelement isoleret med Rockwool. Målingerne viser også, at varmestrømmen ikke ændres ved ændringer i fugtindholdet i isoleringen i det undersøgte fugtområde.

1. udgave, 2001  
ISBN 87-563-1085-4  
ISSN 1600-8022