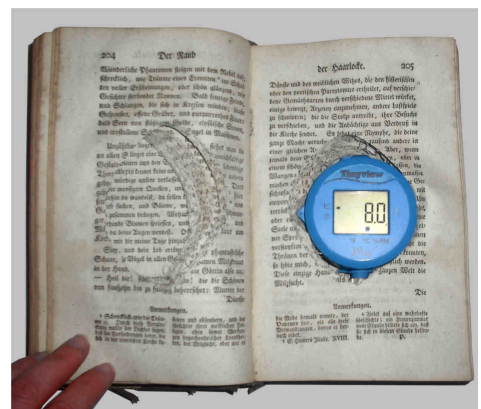


Forebyggelse af kondensdannelse ved udtagning af papir fra lavtemperaturmagasiner



Signe Hjerrild Smedemark

Uppsats för avläggande av filosofie kandidatexamen i
Kulturvård, Konservatorprogrammet
15 hp
Institutionen för kulturvård
Göteborgs universitet

2011:7



Forebyggelse af kondensdannelse ved udtagning af papir fra
lavtemperaturmagasiner

Signe Hjerrild Smedemark

Jonny Bjurman

Kandidatoppsats, 15 hp
Konservatorprogrammet
Lå 2010/11

UNIVERSITY OF GOTHENBURG
Department of Conservation
P.O. Box 130
SE-405 30 Göteborg, Sweden

www.conservation.gu.se
Tel +46 31 7864700
Fax +46 31 786 47 03

Program in Conservation of Cultural Property
Graduating thesis, BA/Sc, 2011

By: Signe Hjerrild Smedemark
Mentor: Jonny Bjurman

Preventing condensation in the application of cold storage.

ABSTRACT

A qualitative literature review on the preservation benefits of cold storage showed that when preserving paper the lifetime is doubled for each 5° C drop in temperature. By halving the relative humidity in the environment one can more than double the lifetime of the paper.

To investigate the changes in temperature and relative humidity during transport in and out from cold storage several experiments were conducted. The experiments were carried out at The Royal Library in Denmark's cold storage at Njalsgade 112.

During the transport in and out from The Royal Library's cold storage the changes in temperature and relative humidity were measured near the surface of the hollow test book and inside the book and inside a book placed in a stack of books.

Based on the literature study and results from the experiments the following precautions, for transporting paper in and out of cold storages, to prevent condensation were taken:

It is recommended that paper is stored in cold storages at temperatures down to 2° C, which exploits the low temperatures during winter, and about 45% RH. During transport out from the cold storage paper should be packed in an impenetrable packaging or acclimatized in a climate-controlled room. During transport back to the cold storage it is recommended that paper be acclimatized in a climate-controlled room and not under any circumstances packed in an impenetrable packaging. A single book should be acclimatized for three hours in order to avoid condensation on the surface as well as inside and the books should be stacked separately during acclimatization in the climate-controlled room. It is also recommended that the Library prolong delivery time so that the necessary time is available to avoid condensation damage during transport in and out from the cold storage and that the books are digitized for expanding public access to the material and to limit the damage caused by physical handling of the objects and the risk of damage during transport in and out of cold storage.

Title in original language: Forebyggelse af kondensdannelse ved udtagning af papir fra lavtemperaturmagasiner

Language of text: Danish

Number of pages: 57

Keywords: paper degradation, RH, temperature, cold storage, condensation.

ISSN 1101-3303

ISRN GU/KUV—11/7--SE

Forord

Jeg vil benytte lejligheden til at takke Bevaringsafdelingen ved Det Kongelige Bibliotek i Danmark for en lærerig praktikperiode og tusind tak for synspunkter og lån af dataloggere og adgang til Jeres magasiner i forbindelse med udførelsen af forsøg til denne opgave. Specielt tak til Tine Rauff der har været meget engageret og hjælpsom.

Jeg vil desuden takke Kaj Smedemark for gennemlæsning og synspunkter og tak til min vejleder Jonny Bjurman.

Indholdsfortegnelse

1. Indledning	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Problemformulering og målsætning	9
1.3 Materiale og metode	10
1.4 Afgrænsning	11
1.5 Tidligere undersøgelser på Det Kongelige Bibliotek	11
1.6 Kildekritik	11
2. Hvilke interne faktorer påvirker nedbrydningen af papir?	12
2.1 Hvad er papir opbygget af?	12
2.1.1 Cellulose	12
2.1.2 Hemicellulose	14
2.1.3 Lignin	14
2.1.4 Tilsætningsstoffer	14
2.1.5 Papirmassebearbejdning	15
2.2 Hvordan nedbrydes papir?	15
2.2.1 Kemisk nedbrydning	15
2.2.2 Biologisk nedbrydning	16
2.2.3 Fysisk nedbrydning	18
2.3 Hvilke fysisk-kemisk-biologiske omstændigheder formindsker nedbrydningen af papir?	19
2.3.1 Krystallinske og amorfe dele	19
2.3.2 Tilstedeværelsen af en alkalisk reserve	19
2.3.3 Forekomsten af cellulosenedbrydende enzymer	19
2.4 Delkonklusion	20
3. Hvordan påvirker temperatur og RF nedbrydningen af papir?	22
3.1 Hvordan påvirker temperaturen nedbrydningen af papir?	22
3.2 Hvorledes påvirker RF nedbrydningen af papir?	22
3.3 Delkonklusion	24
4. Anbefalinger ved opbevaring af biblioteksmateriale	25
4.1 Hvilke fordele er der ved lavtemperaturmagasiner?	25
4.2 Hvilke anbefalinger gives for opbevaring af biblioteksmateriale?	25
4.3 Det Kongelige Biblioteks magasin på Njalsgade 112	25
4.4 Delkonklusion	26
5. Forsøg med udtagning og tilbageflytning af bøger	27
5.1 Forudsætninger for kondensdannelse	27
5.2 Risiko for kondensdannelse ved udtagning af biblioteksmateriale	27
5.3 Forsøg med udtagning af bøger fra lavtemperaturmagasin	28
5.3.1 Forsøgsbeskrivelse	28
5.3.2 Fejlkilder	29
5.3.3 Resultat og diskussion	30
5.4 Risiko for kondensdannelse ved tilbageflytning af biblioteksmateriale	33
5.5 Forsøg med tilbageflytning af bøger til lavtemperaturmagasin	33
5.5.1 Forsøgsbeskrivelse	33
5.5.2 Fejlkilder	33
5.5.3 Resultat og diskussion	33
5.6 Undersøgelse af temperaturgradienten i magasinet på Njalsgade 112	37
5.7 Delkonklusion	37

6. Hvordan påvirker svingninger i RF nedbrydningen af papir ved gentagne udtagninger?	39
6.1 Hvilke fysiske skader kan forventes og hvilke kan reelt konstateres som følge af kondensdannelse og forandringer i RF ved gentagne udtagninger?	39
6.1.1 Forsøgsbeskrivelse	40
6.1.2 Resultat	40
6.1.3 Fejlkilder.....	40
6.1.4 Diskussion	40
6.2 Hvilke biologiske skader kan forventes som følge af kondensdannelse og forandringer i RF ved gentagne udtagninger?	40
6.3 Delkonklusion.....	41
7. Hvilke forholdsregler eller retningslinjer for anvendelsen af lavtemperaturmagasiner i forhold til gentagne udtagninger af biblioteksmateriale kan man opstille for at forebygge skader på papir?	42
7.1 Emballering eller sluserum	42
7.2 Akklimatiseringstiden	46
7.3 Forlængede ekspeditionstider.....	46
7.4 Restriktivt udlån	46
7.5 Digitalisering	46
7.6 Temperaturgradient og mikroklima.....	47
7.7 anbefalinger til forholdsregler mod kondensdannelse	47
8. Diskussion og perspektivering.....	49
9. Konklusion	50
10. Resume.....	53
Litteraturfortegnelse	55
Utrykte kilder	55
Trykte kilder	55
Bilag 1. Resultat fra forsøg med udtagning af bøger	58
Bilag 2. Resultat fra forsøg med tilbageflytning af bøger	60
Bilag 3. Resultat fra forsøg med gentagne udtagninger.....	62

1. Indledning

1.1 Baggrund

Som en del af uddannelsen som konservator ved Göteborgs Universitet er der indlagt en praktikperiode på femte semester. Jeg havde min praktikperiode ved Bevaringsafdelingen på Det Kongelige Bibliotek i Danmark.

Det Kongelige Bibliotek er Danmarks nationalbibliotek og universitetsbibliotek for Københavns Universitet. Deres samlinger udgør den danske litterære kulturarv af dansk og udenlandsk oprindelse. Samlingen består af over 143 hyldekilometer biblioteksmateriale og indeholder materialer som indbundne bøger, tidsskrifter, aviser, illumineret pergamentmanuskripter, papirmanuskripter, palmeblade, tekstilruller, glober, fotografier, negativer, kort, mikrofilm og magnetbånd (Vest, 2008 s. 808).

Som en uerstattelig del af den danske kulturarv bevares Det Kongelige Biblioteks samling for eftertiden. Biblioteks bevaringsafdeling har til opgave at sikre bevaringen af de fysiske genstande for eftertiden. Udover bevaringen af samlingen skal samlingen også være tilgængelig for udstillinger, uddannelse, forskning og oplysning i nutiden.

I forbindelse med bevaringen af samlingen er et kendskab til nedbrydningen af materialet og de faktorer i omgivelserne der påvirker nedbrydningen betydningsfuldt. Med et kendskab til disse faktorer kan omgivelserne tilpasses således at materialet bevares for eftertiden. Denne forebyggende bevaring består blandt andet i at sikre hensigtsmæssige opbevaringsforhold i magasinerne.

For at forlænge biblioteksmaterialets levetid har Det Kongelige Bibliotek i Danmark etableret flere nye lavtemperaturmagasiner (Informant 1). I en rapport udarbejdet til Kulturministeriet i Danmark anbefaler en arbejdsgruppe, bestående af repræsentanter fra Det Kongelige Bibliotek, Statens Arkiver, Den Kongelige Danske Konservatorskole, Universitets Biblioteket og Styrelsen for Bibliotek og Medier, at man anvender lavtemperaturmagasiner, som et alternativ til masseafsyring, for at forlænge biblioteksmaterialets levetid (Hansen, 2009 s. 89-96). Hensigten med disse nye magasiner er at forlænge papirets levetid ved at sænke temperaturen i omgivelserne. I forbindelse med anvendelsen af materialet medfører udtagning og tilbageflytning fra magasinet til læsesalen imidlertid at materialet udsættes for store forandringer i temperatur og relative luftfugtighed (RF).

1.2 Problemformulering og målsætning

I denne opgave vil jeg undersøge de bevaringsmæssige fordele ved magasinering af biblioteksmateriale ved lave temperaturer. Jeg vil desuden undersøge betingelserne i forbindelse med udtagning og tilbageflytning af materiale fra lavtemperaturmagasiner, for at se hvilken risiko for kondensdannelse forandringen i temperatur og RF medfører. Denne undersøgelse af betingelserne under transporten ind og ud af lavtemperaturmagasiner udføres med udgangspunkt i Det Kongelige Bibliotek i Danmarks nye magasin på Njalsgade 112 blok II.

Undersøgelsen søger at give svar på problemformuleringen: ”*Hvorledes kan dannelsen af kondens ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner til læsesal, og de skader på papir som kondensdannelsen medfører, forebygges?*”

Som led i den løsningsorienterede problembesvarelse søges svar på følgende delspørgsmål:

- Hvordan påvirker temperaturen og RF nedbrydningen af papir?
- Hvilke skader kan dannelsen af kondens ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner medføre?
- Hvor lang tid varer akklimatiseringen af biblioteksmateriale efter udtagning fra lavtemperaturmagasinet?
- Hvilke fysiske og kemiske skader kan forventes og hvilke kan reelt konstateres som følge af kondensdannelse ved gentagne udtagninger?
- Hvilke biologiske skader kan forventes som følge af kondensdannelse ved gentagne udtagninger?
- Hvilke fordele er der ved etablering af lavtemperaturmagasiner?
- Hvilke forholdsregler eller retningslinjer for anvendelsen af lavtemperaturmagasiner i forhold til gentagne udtagninger af biblioteksmateriale kan man opstille for at forebygge skader på papir?

Målet med opgaven er at opstille forholdsregler eller retningslinjer for udtagning og tilbageflytning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner. Forholdsreglerne skal være med til at forebygge kondensdannelse og skader på materialet i forbindelse med forandringen i temperatur og RF ved transporten ind og ud af magasinet. Forholdsreglerne kan desuden anvendes i forbindelse med overvejelser om planlægning og etablering af nye lavtemperaturmagasiner.

1.3 Materiale og metode

For at besvare problemformuleringen vil jeg i opgaven gå tværfagligt til værks. Jeg vil igennem et litteraturstudie indsamle relevant viden fra fysik, kemi, mikrobiologi, biokemi og museale forhold for, at sammenholde de faktorer der internt i papiret og eksternt i omgivelserne påvirker nedbrydningen.

Med udgangspunkt i lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 vil jeg undersøge klimaforandringerne i bøger under transporten ind og ud af magasinet. Klimaforandringerne måles med dataloggere af typen Tinyveiw Plus henholdsvis på ydersiden og i midten af kasserede forsøgsbøger og i forsøgsbøger placeret i en stak af bøger.

For at undersøge temperaturgradienten igennem lavtemperaturmagasinet måles temperaturen tre steder i magasinet med en tilsvarende datalogger.

Med udgangspunkt i lavtemperaturmagasinet vil jeg desuden undersøge risikoen for kondensdannelse under udtagning og tilbageflytning af materiale fra magasinet teoretisk ud fra dugpunktsskurver.

De fysiske skader der kan forekomme i forbindelse med gentagne forandringer i RF ved udtagning og tilbageflytning af materiale fra lavtemperaturmagasiner undersøges ved at flytte et papirbind fra køleskab til stuetemperatur. Skaderne undersøges visuelt og fotodokumenteres.

Den tværfaglige viden fra litteraturstudiet sammenholdes med resultaterne fra forsøgene med klimaforandringer i bøger til en vurdering af problemerne. Herudfra opstilles

forholdsregler eller retningslinjer for udtagning og tilbageflytning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner.

1.4 Afgrænsning

Som nævnt ovenfor består Det Kongelige Biblioteks samling af mange forskellige informationsbærende materialer. For at afgrænse opgaven har jeg valgt at fokusere på udtagning og tilbageflytning af materialer bestående af papir.

Under litteraturstudiet har jeg således valgt at fokusere på opbygningen af papir og de interne og eksterne faktorer der påvirker dets nedbrydning. Hvordan nedbrydningen af papirmateriale påvirkes af tilsætningsstoffer introduceret under papirmassefremstillingen eller under senere bearbejdningsmetoder vil kun blive omtalt kort.

Opgaven tager udgangspunkt i Det Kongelige Bibliotek i Danmarks nye magasin på Njalsgade 112. Forholdsreglerne for udtagning og tilbageflytning af materiale fra lavtemperaturmagasiner opstilles derfor også med udgangspunkt i dette magasin¹. Forholdsreglerne er imidlertid de samme for transporten af biblioteksmateriale fra andre lavtemperaturmagasiner, men værdierne kan adskille sig.

1.5 Tidligere undersøgelser på Det Kongelige Bibliotek

Bevaringsafdelingen har tidligere, i forbindelse med projekteringen af de nye magasiner på Njalsgade 112, udarbejdet fire notater om risikoen for kondensdannelse ved transporten ind og ud af lavtemperaturmagasiner (Bevaringsafdelingen, 2005a, Bevaringsafdelingen, 2005b, Bevaringsafdelingen, 2005c, Bevaringsafdelingen, 2005d). I notaterne undersøges risikoen for kondensdannelse teoretisk ud fra dugpunktsskurver under transporten af materiale ind og ud fra et koldt magasin med 2° C og 30 % RF, et køligt magasin med 12° C og 45 % RF og et klimavariabelt magasin. Undersøgelsen viser at der ved udtagning af materiale er risiko for kondensdannelse i alle magasinerne.

1.6 Kildekritik

Hovedparten af artiklerne og fagbøgerne anvendt i denne opgave er af nyere dato. Det har således ikke været et problem at finde nyere relevant litteratur. De anvendte artikler er desuden hentet fra anerkendte konserveringsfaglige tidsskrifter.

Flere af de videnskabelige undersøgelser af de interne og eksterne faktorerers påvirkning på nedbrydningen af papir bygger på accelererede aldringsforsøg. For at kunne anvende resultaterne fra disse undersøgelser er det vigtigt at alle nedbrydningsreaktioner øges eller mindskes med den samme faktor og at der ikke introduceres nye reaktioner under den accelererede aldring (Erhardt, 1992). Der er en usikkerhed ved at anvende resultater fra accelererede aldringsforsøg til at beskrive den naturlige nedbrydning.

¹ Magasinet på Njalsgade 112 indeholder hovedsageligt bøger.

2. Hvilke interne faktorer påvirker nedbrydningen af papir?

Nedbrydningen af papir påvirkes af interne faktorer i papiret og eksterne faktorer i omgivelserne (Strlic og Kolar, 2004 s. 6-7). De interne faktorer der påvirker nedbrydningen af papir er sammensætningen af cellulose, hemicellulose og lignin, tilsætningsstoffer introduceret til papirmassen og papirmassebearbejdningsmetoden. De eksterne faktorer i omgivelserne der påvirker nedbrydningen er faktorer som lys, temperatur, RF, tilstedeværelse af oxygen og luftforureninger.

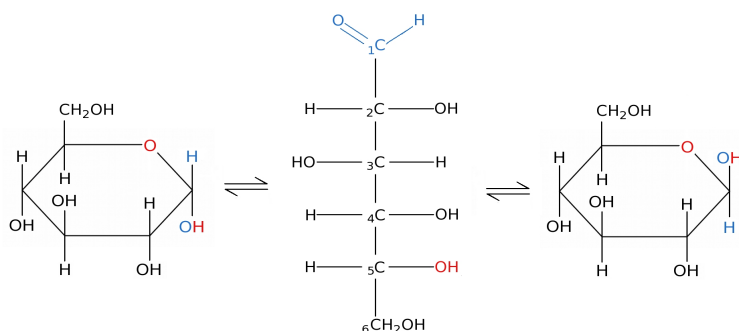
Nedbrydningen af papir er en undgåelig proces. Papir vil som alle organiske materialer med tiden dekomponere. Med et kendskab til disse interne og eksterne faktorer kan opbevaringsforholdene i magasinet imidlertid tilpasses således at nedbrydningen af biblioteksmaterialet formindskes. I dette afsnit beskrives papirets opbygning og de interne faktorer der bidrager til nedbrydningen af papir. De eksterne faktorer der bidrager til nedbrydningen af papir beskrives under afsnit 3.

2.1 Hvad er papir opbygget af?

Papir er opbygget af et netværk af fibre. Fibrene stammer fra cellevæggen der omgiver planteceller i planter og er primært opbygget af cellulose. Planteceller har forskellige funktioner og indholdet af cellulose afhænger af plantecellernes funktion. En type planteceller, kaldet parenchymceller, udfører fotosyntese, respiration og lagring af stivelse og indeholder en ringe mængde cellulose. Andre planteceller, kaldet collenchymceller og scleremchymceller, danner et afstivende og bærende skelet for planten og indeholder derfor mange cellulosefibre (Campbell, 2006 s. 628). Planter med et stort indhold af fibre anvendes til fremstillingen af papir. Det er indholdet af plantefibre og andelen af de forskellige polymerer som cellulose, hemicellulose og lignin der giver papiret dets egenskaber (Campbell, 2006 s. 635). Andelen af de forskellige typer af polymerer har også betydning for papirets nedbrydning.

2.1.1 Cellulose

Cellulose er et polysakkarid der er opbygget af β -D-glukosemonosakkarider (Tímár-Balázsy og Eastop, 1998 s. 19). Monosakkaridet D-glukose indeholder fem hydroxylgrupper og en aldehydgruppe (se Figur 1).



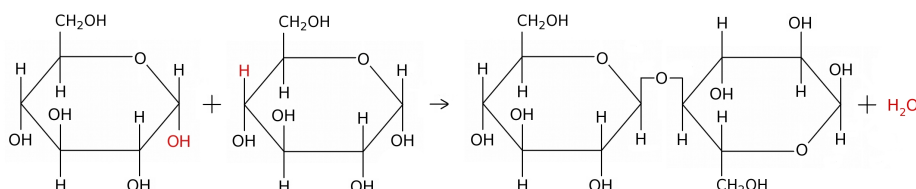
Figur 1 viser D-glukose og de to ringstrukturer en α - og en β -konfiguration af D-glukose. α -konfigurationen ses til højre og β -konfiguration ses til venstre. Aldehydgruppen på karbon C1

(markeret med blå) reagerer med hydroxylgruppen på karbon C5 (markeret med rød) og danner henholdsvis en α - og en β -konfiguration. Tegning af Signe Smedemark.

Aldehydgruppen på karbon C1 reagerer med hydroxylgruppen på karbon C5 og danner en ringstruktur. Ringstrukturen har to isomerer, en α - og en β -konfiguration (Tímár-Balázsy og Eastop, 1998 s. 20).

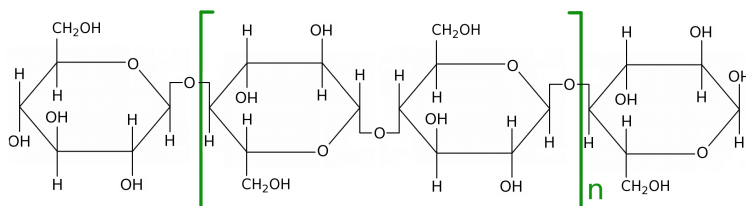
α -konfigurationen danner forgrenede polymerkæder og indgår i eksempelvis stivelse, der fungerer som et næringsdepot i planter. Stivelse nedbrydes af amylaser, enzymer der er vidt udbredt hos levende organismer (Torp, 2007 s. 144). Stivelse er derfor meget lidt bestandigt. Cellulose derimod indeholder udelukkende β -konfigurationen der danner lineære polymerkæder og fungerer som afstivere i cellevæggen (Berg et al., 2007 s. 312).

Under dannelsen af ringstrukturen overføres et hydrogen fra hydroxylgruppen på karbon C5 til oxygen i aldehydgruppen på karbon C1. Den nydannede hydroxylgruppe på karbon C1 i et β -D-glukosemonosakkarid reagerer herefter med en hydroxylgruppe på karbon C4 i et andet β -D-glukosemonosakkarid. Denne kondensationsreaktion giver en 1,4'-glukosidetherbinding imellem to β -D-glukosemonosakkarider (Tímár-Balázsy og Eastop, 1998 s. 20-21).



Figur 2 viser kondensationsreaktionen imellem to β -D-glukosemonosakkarider og reaktionsproduktet disakkaridet cellobiose. Tegning af Signe Smedemark.

To β -D-glukosemonosakkarider sammensat via en 1,4'-glukosidetherbinding danner disakkaridet cellobiose (se Figur 2). Cellulose består af flere tusinde β -D-glukosemonosakkarider bundet sammen via 1,4'-glukosidetherbindinger til lange polymerkæder (Tímár-Balázsy og Eastop, 1998 s. 20). Disse kovalente 1,4'-glukosidetherbindinger udgør den primære struktur i cellulose.



Figur 3 viser cellulosepolymeren $(C_6H_{12}O_5)_n$ med en reducerende og en ikke reducerende endegruppe. Tegning af Signe Smedemark.

Antallet af glukosemonomere sammensat via 1,4'-glukosidetherbindinger i cellulose kaldes dets polymerisationsgrad og angives som n i Figur 3 (Hoel, 1999 s. 22). Polymerisationsgraden afhænger af plantetypen og formindskes under papirmassebearbejdningen og nedbrydningen.

Forekomsten af udelukkende β -D-glukosemonosakkarider og 1,4'-glukosidetherbindinger imellem glukosemonomere gør cellulosepolymeren lineær (Berg et al., 2007 s. 312). De utallige hydroxylsidegrupper i cellulose gør den polært. De små hydroxylsidegrupper medfører desuden at cellulosepolymererne kan pakkes tæt sammen. Denne tætte pakning af cellulosepolymererne tillader et stort antal hydrogenbindinger imellem hydroxylgrupper i samme cellulosepolymer og hydroxylgrupper i andre cellulosepolymerer.

Hydrogenbindingerne imellem hydroxylsidegrupperne i samme cellulosekæde kaldes intramolekylære bindinger og udgøre den sekundære struktur. Hydrogenbindinger imellem forskellige cellulosekæder kaldes intermolekylære bindinger og udgøre den tertiære struktur. De intra- og intermolekylære bindinger er betydeligt svagere end de primære kovalente bindinger imellem β -D-glukosemonosakkariderne i cellulose (Tímár-Balázs og Eastop, 1998 s. 5,9,22). De intra- og intermolekylære bindinger og den tætte pakning af cellulosefibre er med til at stabilisere cellulosepolymererne og gøre dem mere resistente mod kemisk, biologisk og fysisk nedbrydning.

2.1.2 Hemicellulose

Hemicellulose forekommer i forskellige mængder afhængig af plantematerialet. Den omgiver cellulosefibre i cellevæggen og danner hydrogenbindinger til de ydre molekyler i cellulosefibre. Hemicellulose er en fællesbetegnelse for flere polysakkarider bestående af glukose-, mannose-, galaktose- og xylosemonosakkarider (Lund, 1997 s. 373). Hemicellulose har kortere polymerkæder end cellulose, er mere forgrenet og har større sidegrupper (Tímár-Balázs og Eastop, 1998 s. 31-32). Hemicellulose har derfor en mere åben pakning i forhold til cellulose og er mindre resistent mod kemisk, biologisk og fysisk nedbrydning.

2.1.3 Lignin

Lignin binder cellulosefibre sammen og virker afstivende i plantecellerne. Lignin er en forgrenet aromatisk polymer der indeholder fenoler og andre organiske syrer (Hoel, 1999 s. 19-20). Under nedbrydningen af lignin dannes sure nedbrydningsprodukter der, sammen med fenolerne i lignin, medfører en forøget nedbrydning af papiret. Lignin er imidlertid også hydrofob og besværliggør dermed vands adgang til cellulosefibre og den kemiske og biologiske nedbrydning af fibre (Tímár-Balázs og Eastop, 1998 s. 33). Lignin indeholder således egenskaber der formindsker nedbrydningen af cellulose og pH-formindskende egenskaber der bidrager til en hurtigere nedbrydning af cellulose.

2.1.4 Tilsætningsstoffer

For at give papiret visse egenskaber tilsættes tilsætningsstoffer under fremstillingen af papirmassen. Fyldmidler som kaolin og kalciumkarbonat tilsættes til papirmassen for at forbedre det færdige papirprodukts trykbarhed. Fyldmidlerne er desuden billigere end fibre og anvendelsen af fyldmidler formindsker dermed udgifterne til fremstillingen af papirmassen (Johansson, 2000 s. 7). Kalciumkarbonat har også den egenskab at den fungerer som buffer imod sur hydrolyse af fibre i papiret (Lindström, 2008 s. 80).

Papirmassen tilsættes en limning for at formindske papirets evne til at opsuge vand. Frem til 1800-tallet anvendte man en animalsk limning på ydersiden af det færdige papir, men senere begyndte man i stedet at tilsætte en alun limning til papirmassen. Denne limning medfører imidlertid en forøget nedbrydning af papirmaterialet og nu anvender man i stedet neutrallimning (Johansson, 2000 s. 7-8).

Titandioxid kan tilsættes papirmassen for at forøge papirets hvidhed. Titandioxid medfører imidlertid nedbrydning af papiret ved dannelsen af frie radikaler (Lindström, 2008 s. 80). Papirmassen kan også gennemgå en blegning for at øge det færdige produkts hvidhed. Under blegningen fjernes det sidste lignin desuden fra papirmassen. Til blegning anvendte man tidligere klorholdige emner, men nu anvendes mere miljøskånsomme blegemidler som brintoverilte og ilt og senest er man begyndt at anvende enzymer (Lund, 1999 s. 33). Anvendes klor til blegningen af papir oxideres cellulosen og karboxylgrupper dannes hvilket resulterer i en mindre stabil og mere nedbrudt cellulose. Blegning med klor kan

desuden medføre at klorholdige restprodukter i fugtige omgivelser omdannes til saltsyre og efterfølgende medfører hydrolyse af cellulosepolymeren (Fellers og Riksarkivet, 1988 s. 14).

Papiret kan også gennemgå en efterbehandling hvor tilsætningsstoffer som kaolin, calciumkarbonat og titandioxid tilsættes med bindemidler som latex eller stivelse for at forandre papirets egenskaber efterfølgende (Lund, 1999 s. 34).

Udover tilsætningsstofferne kan papiret også indeholde forureninger som jern, kobber og aluminium. Tilstedeværelsen af metalioner i papiret fremskynder nedbrydningen af papiret (Strlic og Kolar, 2004 s. 13).

Disse tilsætningsstoffer indgår som en del af papiret og har som antydnet ovenfor en betydning for nedbrydningen af papiret.

2.1.5 Papirmassebearbejdning

Det færdige papirprodukts egenskaber og holdbarhed afhænger også af metoden anvendt til bearbejdning af fibrene i papirmassen. Under den mekaniske bearbejdning adskilles fibrene mekanisk, mens de under den kemiske bearbejdning adskilles ved brug af kemikalier. Den mekaniske bearbejdning efterlader fibrene mere bearbejdede og nedbrudte end den kemiske bearbejdning. Ved kemiske bearbejdning fjernes lignin desuden i større omfang fra papirmassen (Hoel, 1999 s. 35). Den kemiskbearbejdede papirmasse er derfor ofte mere stabil end den mekanisk bearbejdede.

2.2 Hvordan nedbrydes papir?

2.2.1 Kemisk nedbrydning

Den kemiske nedbrydning inddeles i tre hovedtyper: hydrolyse, oxidation og dannelsen af tværbindinger.

Cellulosepolymerens 1,4'-glukosidetherbindinger hydrolyseres under optagelse af vand og polymerkæden deles. Den hydrolytiske nedbrydning foregår således kun i tilstedeværelsen af vand (Hoel, 1999 s. 84-85). Delingen af polymerkæden sker tilfældigt og resulterer i dannelsen af glukosemonomerer og mindre dele af polymerkæden i papiret (Strlic og Kolar, 2004 s. 96). For hver deling af cellulosepolymeren dannes en ny ustabil reducerende endegruppe (Bogaard og Whitmore, 2002 s. 12). Delingen af polymererne og dermed reduceringen af polymerisationsgraden medfører at papiret mister sin fysiske og mekaniske styrke.

De primære og sekundære hydroxylgrupper i glukosemonomeren oxideres i tilstedeværelsen af oxygen til karbonyl og videre til karboxylgrupper. Karbonyl i cellulosepolymerens reducerende endegruppe oxideres ligeledes til karboxyl. Dannelsen af karboxyl bidrager til den hydrolytiske nedbrydning ved at destabilisere cellulosepolymeren og øge surhedsgraden i papiret (Margutti et al., 2001 s. 67, 75).

Efterhånden som polymerkæderne nedbrydes dannes nye reaktive sidegrupper. Disse nye sidegrupper danner tværbindinger imellem polymerkæderne og resultere i at papiret mister sin fleksibilitet og bliver sprødt (Hoel, 1999 s. 86).

Den kemiske nedbrydning er således en selvforstærkende proces, hvor hydrolysen resulterer i dannelsen af nye reducerende endegrupper, der danner tværbindinger, eller i tilstedeværelsen af oxygen, oxideres til sure karboxylgrupper. Karboxylsyre der dannes

under nedbrydningen akkumuleres i papiret og medfører en forsurening af papiret (Shahani og Harrison, 2002). Tilstedeværelsen af syre i papiret katalyserer den hydrolytiske nedbrydning af polymerkæden (Margutti et al., 2001 s. 74-75).

Forekomsten af syre i papiret kan også skyldes kemikalier og tilsætningsstoffer introduceret under fremstillingen af papirmassen, sure nedbrydningsprodukter dannet i papiret under nedbrydningen af lignin og syre absorberet fra omgivelserne (Strlic og Kolar, 2004 s. 97).

2.2.2 Biologisk nedbrydning

Fra papirmaterialer kendes mindst 200 forskellige arter af mikroorganismer (Hoel, 1999 s. 92). Mikroorganismer kan under fordelagtige vækstbetingelser nedbryde papirmaterialet. Disse vækstbetingelser varierer imellem de forskellige mikroorganismer, men fælles er at væksten afhænger af tilgang til næringsstoffer og vand og en passende temperatur, surhedsgrad og iltindhold i omgivelserne (Richter og Jørgensen, 1995 s. 24-29). Ved at skabe ufordelagtige vækstbetingelser for mikroorganismene i magasinerne kan den biologiske nedbrydning af materialet formindskes.

I forbindelse med opbevaring af papirmateriale i magasiner er man specielt opmærksom på skimmelsvampe. Skimmelsvampe kan anvende papirmaterialet som energikilde og næringsdepot til vækst og formering. En skimmelspore vil under fordelagtige vækstbetingelser udvikle hyfer der forgrener sig til et mycelium i papirmaterialet. Skimmelsvampens vegetative mycelium udskiller enzymer og organiske syrer der nedbryder cellulosen hvorefter den optages (Edebo, 1999 s. 330). Under nedbrydningen af polysakkarider som cellulosepolymeren dannes der i nogle bakterier sure restprodukter som udskilles og forøger surhedsgraden i omgivelserne og nedbrydningen (Richter og Jørgensen, 1995 s. 29). Sporerne er skimmelsvampens reproduktive mycelium og er altid til stede i varierende mængder i luften. Opstår der fordelagtige vækstbetingelser vil den kontinuerlige tilstedeværelse af skimmelsporer i luften derfor medføre risiko for væksten af skimmelsvamp (Edebo, 1999 s. 332).

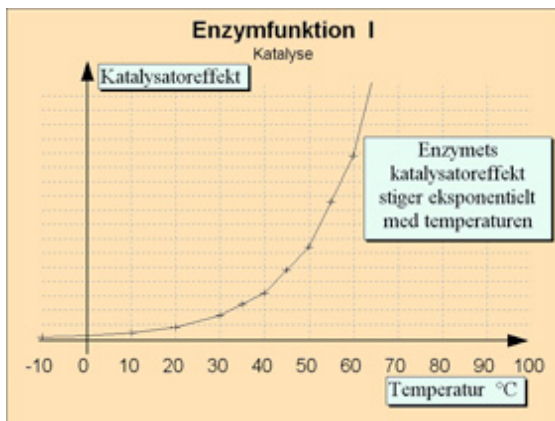
Cellulase er en fællesbetegnelse for cellulosenedbrydende enzymer. Mikroorganismer der producerer cellulase enzymer er således i stand til at nedbryde cellulose, mens mikroorganismer der producerer lignase enzymer kan nedbryde lignin. Næringsstoffer som cellulosepolymeren nedbrydes og optages af mikroorganismene. Substratspecifikke enzymer katalyserer nedbrydningen ved at sænke aktiveringsenergien (Richter og Jørgensen, 1995 s. 24-25).

Mikroorganismene producerer endoenzymer der katalyserer reaktioner inde i cellerne og exoenzymer der katalyserer reaktioner udenfor cellerne. Nedbrydningen af cellulosepolymeren til glukosemonomere katalyseres af exoenzymer udenfor cellen og glukosemonomererne optages efterfølgende af cellen igennem cellemembranen (Richter og Jørgensen, 1995 s. 25). De mikroorganismer der nedbryder og anvender organiske materialer som energikilde og næringsstof er heterotrofe (Richter og Jørgensen, 1995 s. 24).

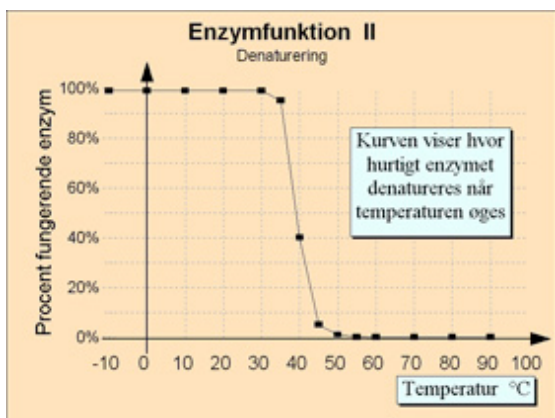
Udover cellulose kan også tilsætningsstoffer som stivelse og gelatine eller fingeraftryk og støv anvendes som næringsstof for mikroorganismene og kan give anledning til mikrobiologisk vækst (Edebo, 1999 s. 333).

Enzymaktiviteten afhænger af temperaturen (Richter og Jørgensen, 1995 s. 25). Ved lave temperaturer er enzymernes aktivitet beskedent, men hæves temperaturen stiger katalysatoreffekten indtil en maksimums temperatur hvorefter mikroorganismens enzymer

denaturerer og effekten ophører (Richter og Jørgensen, 1995 s. 25-26). Figur 4 viser den eksponentielle stigning i enzymernes katalyserende effekt som funktion af temperaturen. Denne katalyserende effekt ophører når temperaturen overstiger et vist punkt hvorefter enzymerne denaturerer (se Figur 5). Efter denatureringen mister enzymerne deres katalyserende effekt. Den optimale temperatur for væksten af skimmelsvampe er mellem 24 - 30° C (Hoel, 1999 s. 92). Her producerer skimmelsvampene optimale mængder af cellulaser og lignaser og her har enzymerne maksimal katalysatoreffekt.



Figur 4 viser enzymernes katalyserende egenskaber som funktion af temperaturen. Enzymernes katalyserende effekt stiger eksponentielt med temperaturen indtil en maksimal temperatur hvorefter enzymerne denaturerer. Diagrammet er hentet fra: <http://fag.aarhusakademi.dk>.



Figur 5 viser denatureringen af enzymer som funktion af temperaturen. Enzymernes katalyserende effekt ophører når temperaturen overstiger et vist punkt hvorefter enzymerne denaturer og mister deres katalyserende effekt. Diagrammet er hentet fra: <http://fag.aarhusakademi.dk>.

De fleste svampe har optimale vækstbetingelser i pH-intervallet 4 – 6 mens de optimale vækstbetingelser for bakterier er i pH-intervallet 6 – 8 (Richter og Jørgensen, 1995 s. 29). Deres vækstbetingelser ligger dermed indenfor de pH-værdi der ofte forekommer i papirmateriale.

Mikroorganismer stiller forskellige krav til tilgange af ilt (Richter og Jørgensen, 1995 s. 27). I forbindelse med vækstbetingelserne i magasiner er det udelukkende de aerobe mikroorganismer, der vokser og formerer sig i iltholdige omgivelser der har interesse.

De fleste mikroorganismer kræver mere end 90 % RF for at kunne vokse. Væksten af skimmelsvampe er beskeden ved RF under 65 %, men efterhånden som RF stiger forøges skimmelsvampens vækst og formering. Ved 80 – 90 % RF er væksten betragtelig og over 95 % RF er den overvældende (Hoel, 1999 s. 92). Bakterierne trives optimalt ved 100 % RF og under 65 % RF kan deres stofskifte ikke foregå (Hoel, 1999 s. 93).

Ved at anvende Preservation Calculator² kan man omtrentlig bestemme antallet af dage for udviklingen af skimmelsvamp under forskellige klimaforhold. Ved en temperatur på 20° C og RF under 65 % er der ifølge Preservation Calculator ingen risiko for udviklingen af skimmelsvampe, mens der ved 20° og 80 % RF er risiko for udviklingen af skimmelsvamp efter 14 dage (Image Permanence Institutet, 2007). Skimmelsvampens vækst er betragtelig over 80 % RF, men længerevarende perioder med RF under 80 % kan have en tilsvarende effekt.

Under biologisk nedbrydning kan der forekomme skimmelsvampe og bakterier der kan være skadelige for personer i kontakt med dem. Risikoen for infektion af en bakterie er imidlertid begrænset, mens skimmelsvampe, svampesporer og mykotoksiner, der transporteres i luften, kan afsættes på personalets hud og i deres luftveje og medfører overfølsomhed, hudirritation eller andre allergiske anfald (Hoel, 1999 s. 91).

2.2.3 Fysisk nedbrydning

Forandringer i temperaturen og RF medfører en forandring i papirmaterialets dimensioner. Dimensionsforandringer per grad temperaturforandring angives af materialets varmeudvidelseskoefficient. Den dimensionsforandring der sker i papir som følge af variation i temperaturen er imidlertid ubetydelig i forhold til de dimensionsforandringer variationer i RF kan medføre (Padfield, 2009 s. 6-7).

Papir er et hygroskopisk materiale og ved forandring i RF vil materialet henholdsvis optage og afgive fugt fra omgivelserne. Efterhånden som vandmolekylerne optages imellem cellulosepolymererne udvides papiret (se afsnit 3.2) og dette kan medføre fysisk nedbrydning af materialet. Har materialet en ubegrænset bevægelighed vil forandringerne i fugtindholdet medføre ofte reversible forandring af materialets dimensioner. Er materialet derimod begrænset i sin bevægelighed introduceres stress i materialet som følge af forandringer i fugtindholdet. Denne stress kan resultere i permanente deformationer og skader (Erhardt et al., 1995). De fysiske skader der kan opstå i papir som følge af forandringer i RF er beskrevet under afsnit 6.1.

Udover den stress der introduceres i begrænset materiale ved forandringer i RF kan lokalt stress introduceres i materialet når ydersiden optager eller afgiver fugt hurtigere end indersiden (Banik, 2010 s. 173, Padfield, 2006 s. 7-8). Dette kan resultere i en forskel i fugtindhold igennem materialet der kan give anledning til stress i forbindelse med forsinkelsen i udvidelse eller krympning efter pludselige forandringer i fugtindholdet.

Gentagne variationer i temperatur og RF medfører ifølge en nyere undersøgelse risiko for stressintroduceret hydrolysenedbrydning med deling af 1,4'glukosidetherbindingerne og dermed en lavere polymerisationsgrad og dannelsen af reducerende endegrupper (Bogaard og Whitmore, 2002 s. 14).

Fysiske skader og slitage kan også opstå i forbindelse med anvendelsen og håndtering af materialet.

² Preservation calculator er udviklet af Image Permanence Institute ved Rochester Institute of Technology for at kunne sammenligne forskellige klimaforhold og deres indflydelse på nedbrydningen, det såkaldte Preservation Index. Preservation Calculator er oprindeligt udviklet til at forudsige levetiden for acetat negativer, men den kan også anvendes til at forudsige levetiden for ustabile organiske materialer, som syreholdigt papir.

2.3 Hvilke fysisk-kemisk-biologiske omstændigheder formindsker nedbrydningen af papir?

I papirets sammensætning findes der elementer som formindsker nedbrydningen. Dette er elementer som antallet af krystallinske dele i forhold til amorf og indholdet af en alkalisk reserve. Forekomsten af mikroorganismer der producerer de substratspecifikke cellulase enzymer og således er i stand til at udnytte papirmaterialet som energikilde er også med til at begrænse nedbrydningen.

2.3.1 Krystallinske og amorf dele

Polymerer indeholder krystallinske og amorf dele. I de krystallinske dele ligger polymerkæderne velordnet og tæt pakket. I de amorf dele er der mere uorden og pakningen åben. Forholdet imellem andelen af krystallinske og amorf dele bestemmes af antallet af sidegrupper i molekylerne og deres størrelse. Indholdet af krystallinske dele i forhold til amorf dele er afgørende for fibrenes fysiske egenskaber og tilgængelighed for nedbrydning (Tímár-Balázs og Eastop, 1998 s. 10-11).

Den tætte pakning i de krystallinske dele gør dem mindre fleksible og mindre gennemtrængelige overfor vand. De krystallinske dele er derfor mere modstandsdygtige overfor nedbrydning. De amorf deles uordnede pakning af polymerkæderne gør dem mere fleksible og mere tilgængelige for vand. De amorf dele er derfor mindre modstandsdygtige overfor nedbrydning (Tímár-Balázs og Eastop, 1998 s. 10-11). Andelen af krystallinske dele i forhold til amorf dele har således en afgørende betydning for nedbrydningen af polymererne. Den mikrobiologiske nedbrydning foregår således hovedsageligt i de amorf dele af polymererne mens de krystallinske dele forbliver relativt intakte (Szczepanowska, 1986 s. 37).

Hemicellulose er en forgrenet polymer med store sidegrupper der ikke tillader en tæt pakning af polymerkæderne. Hemicellulose indeholder derfor flere amorf dele og er mere tilgængelig for nedbrydning end cellulose der er en lineær polymer med små hydroxylsidegrupper (Tímár-Balázs og Eastop, 1998 s. 32).

2.3.2 Tilstedeværelsen af en alkalisk reserve

Som tidligere nævnt katalyseres nedbrydningen af cellulose af syre tilstede i papiret. Er papiret neutralt eller alkalisk formindskes den sure hydrolysenedbrydning og papirets levetid forlænges. Under papirfremstillingen tilsættes tilsætningsstoffer som calciumkarbonat der fungerer som buffer imod sur hydrolyse af fibre i papiret (Lindström, 2008 s. 80). En alkalisk reserve kan også tilsættes til papiret efterfølgende under en masseafsyrringsproces. Under masseafsyrringen efterlades ligeledes en alkalisk reserve i papiret der fungerer som en buffer mod fremtidig syredannelse (Strlic og Kolar, 2004 s. 6).

En undersøgelse viser desuden at papirets pH-værdi og tilstedeværelsen af en alkalisk reserve i papiret ingen indflydelse har på væksten af svampe. Enkelte typer af masseafsyrring har ifølge denne undersøgelse en mindre indflydelse på væksten af de undersøgte svampe (Rakotonirainy et al., 2003 s. 157).

2.3.3 Forekomsten af cellulosenedbrydende enzymer

Planternes overlevelse i naturen bygger på at forholdsvis få organismer indeholder cellulase enzymer og dermed er i stand til at nedbryde cellulose. I papirmateriale har man isoleret mere end 200 forskellige arter. De mikroorganismer der oftest forekommer er fra slægterne *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* og *Fusarium* (Hoel, 1999 s. 92). Den

biologiske nedbrydningen af cellulosepolymererne er begrænset til de cellulaseproducerende mikroorganismer der desværre er allesteds nærværende. Lignin i planternes cellevæg hæmmer cellulase i at nedbryde cellulosepolymererne (Torp, 2007 s. 146).

2.4 Delkonklusion

Indholdet af plantefibre og andelen af de forskellige polymerer cellulose, hemicellulose og lignin giver papiret dets egenskaber og har betydning for papirets nedbrydning, ligesom celluloses polymeriseringsgrad og antallet af reducerende endegrupper. Det færdige papirprodukts egenskaber og holdbarhed afhænger imidlertid også af tilsætningsstoffer tilsat under fremstilling af papirmassen og af metoden anvendt til bearbejdning af fibrene i papirmassen.

De lineære cellulosepolymerer og deres utallige små hydroxylsidegrupper tillader dannelsen af intra- og intermolekulære hydrogenbindinger. Cellulose indeholder derfor flere stabiliserende krystallinske dele i forhold til hemicellulose, der er opbygget af kortere og mere forgrenede polymerkæder med store sidegrupper. Papirmassens indhold af krystallinske dele i forhold til amorfede dele er afgørende for fibrenes fysiske egenskaber og tilgængelighed for nedbrydning. De krystallinske dele er mindre modtagelige for vand og den mikrobiologiske nedbrydning foregår derfor fortrinsvis i de amorfede dele.

Lignin er hydrofob, og besværliggør vands adgang til cellulosefibrene og den kemiske og biologiske nedbrydning af cellulosefibrene. Under nedbrydningen af lignin dannes imidlertid sure nedbrydningsprodukter der sammen med fenolerne medfører en forøget nedbrydning af papiret.

For at give papiret visse egenskaber tilsættes tilsætningsstoffer under fremstillingen af papirmassen eller under den efterfølgende bearbejdning af papiret. Tilstedeværelsen af tilsætningsstoffer kan henholdsvis fremskynde eller formindske nedbrydningen af papiret.

Den mekaniske bearbejdning af papirmassen efterlader fibrene mere bearbejdede og nedbrudte end den kemiske bearbejdning. Ved kemisk bearbejdning fjernes lignin desuden i større omfang fra papirmassen. Den kemiskbearbejdede papirmasse er derfor ofte mere stabil end den mekanisk bearbejdede.

Den hydrolytiske nedbrydning af cellulose kræver tilgang til vand der optages under hydrolysen af 1,4' glukosidetherbindingen imellem glukosemonomererne. Ved delingen af cellulosepolymeren dannes en ny reducerende endegruppe og polymerisationsgraden reduceres. Dette medfører at papiret mister sin fysiske og mekaniske styrke.

I tilstedeværelsen af oxygen oxideres de primære og sekundære hydroxylgrupper og de reducerende endegrupper i cellulosepolymeren til karboxyl.

Efterhånden som polymererne nedbrydes dannes nye reaktive sidegrupper. Disse nye sidegrupper danner tværbindinger imellem polymerkæderne og resultere i et sprødt og uflexibelt papir.

Den kemiske nedbrydning er således en selvforstærkende proces, hvor hydrolysen af cellulosepolymeren resulterer i dannelsen af nye reducerende endegrupper, der danner tværbindinger, eller i tilstedeværelsen af oxygen, oxideres til sure karboxylgrupper.

Karboxylsyre der dannes under nedbrydningen akkumuleres i papiret og medfører en forsuring af papiret.

Mikroorganismer er tilstede overalt i luften og kan under fordelagtige vækstbetingelser nedbryde papirmateriale. Disse vækstbetingelser varierer imellem de forskellige mikroorganismer, men fælles er at væksten afhænger af tilgang til næringsstoffer og vand og passende temperatur, surhedsgrad og iltindhold i omgivelserne.

Cellulosepolymeren nedbrydes og optages af de heterotrofe mikroorganismer. Cellulase er en fællesbetegnelse for cellulosenedbrydende enzymer. Mikroorganismer, der producerer cellulase, er i stand til at nedbryde cellulose. Udover cellulose kan også tilsætningsstoffer som stivelse og gelatine eller fingeraftryk og støv udnyttes som næringsstof for mikroorganismene og give anledning til mikrobiologisk vækst.

Mikroorganismernes enzymaktivitet afhænger af temperaturen. Enzymernes katalyserende effekt stiger eksponentielt med temperaturen indtil et vist punkt hvorefter enzymerne denaturerer.

De fleste svampe har optimale vækstbetingelser i pH-intervallet 4 – 6, mens bakterier har optimale vækstbetingelser i pH-intervallet 6 – 8. Mikroorganismers vækstbetingelser ligger dermed indenfor de pH-værdi der ofte forekommer i papirmateriale.

De fleste mikroorganismer kræver mere end 90 % RF for at kunne vokse. Væksten af skimmelsvampe er beskeden ved RF under 65 %, men efterhånden som RF stiger forøges skimmelsvampens vækst og formering.

Papir er et hygroskopisk materiale og ved forandring i RF vil materialet henholdsvis optage og afgive fugt fra omgivelserne. Efterhånden som vandmolekylerne optages imellem cellulosepolymererne udvides papiret og dette kan resultere i fysisk nedbrydning af materialet og permanente deformationer og skader.

3. Hvordan påvirker temperatur og RF nedbrydningen af papir?

Eksterne faktorer som oxygen, luftforureninger, lys, temperatur og RF har en afgørende betydning for nedbrydningen af papir. Med et kendskab til disse eksterne faktorer kan opbevaringsforholdene i magasinet tilpasses således at nedbrydningen af materialet formindskes.

Som beskrevet under afsnit 2.2.1 bidrager tilstedeværelsen af oxygen til nedbrydningen af papir. I de fleste magasiner er tilstedeværelsen af oxygen imidlertid uundgåelig. Luftforureninger bidrager ligeledes til nedbrydningen af biblioteksmateriale i magasinet, men deres tilstedeværelse kan formindskes ved blandt andet at anvende filtre i luftcirkuleringskanalerne. Lysets nedbrydning af materialet kan formindskes ved blandt andet at undgå direkte sollys (Holmberg, 1999 s. 255, 260-263). Temperaturen og RF påvirkning på nedbrydningen af papir er beskrevet i de følgende afsnit 3.1 og 3.2.

3.1 Hvordan påvirker temperaturen nedbrydningen af papir?

Den kemiske nedbrydning af papir bestemmes af reaktionshastigheden. Reaktionshastigheden afhænger af forskellige faktorer heriblandt reaktionens aktiveringsenergi og temperaturen. Aktiveringsenergien er den energi der kræves for at en reaktion kan finde sted (Erhardt, 1989). Undersøgelser af nedbrydningen af cellulose viser i mere end $\frac{3}{4}$ af alle tilfælde en aktiveringsenergi på omkring 100 kJmol^{-1} (Michalski, 2002 s. 68). Ved at anvende denne aktiveringsenergi kan man beregne sammenhængen imellem nedbrydningshastigheden for cellulose og temperaturen. Disse beregninger viser, at den kemiske nedbrydning af cellulose fordobles for hver 5° C stigning i temperatur (Erhardt, 1989, Michalski, 2002 s. 70). Tilsvarende fordobles celluloses levetid ved et fald i temperatur på 5° C . I forbindelse med opbevaring af papirmateriale vil en sænkning af temperaturen i magasinet dermed medføre en forlængelse af papirets levetid.

Den biologiske nedbrydning af papir afhænger, som beskrevet under afsnit 2.2.2, af temperaturen. Aktiviteten af de enzymer, der katalyserer de biokemiske reaktioner i mikroorganismene, stiger eksponentielt med temperaturen (se Figur 4). Ved at anvende Preservation Calculator kan man omtrentlig bestemme forskellige klimaforholds indflydelse på udviklingen af skimmelsvampe. Ved 20° C og 83 % RF er der risiko for udviklingen af skimmelsvampe efter 8 dage, mens der ved 8° C og 83 % RF er en risiko for udvikling af skimmelsvampe efter 14 dage og ved 2° C og 83 % RF efter 23 dage (Image Permanence Institutet, 2007). Ved opbevaring af papir vil en sænkning af temperaturen i magasinet dermed formindskes den biologiske nedbrydning.

3.2 Hvorledes påvirker RF nedbrydningen af papir?

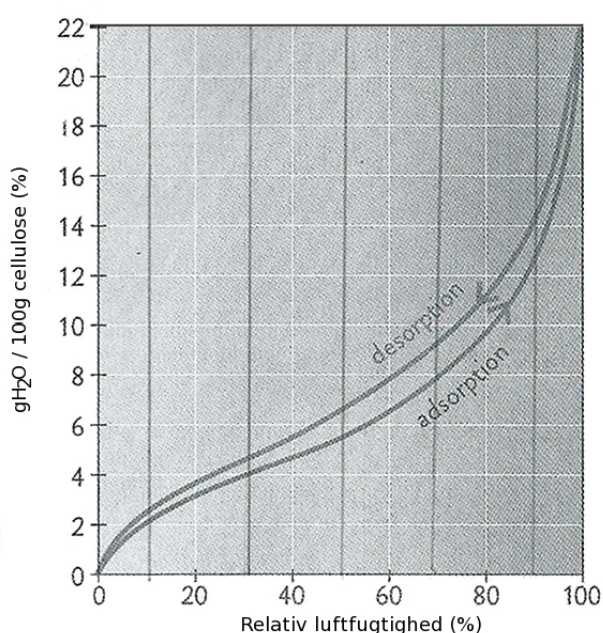
Papir er et hygroskopisk materiale og vil henholdsvis optage og afgive fugt ved forandringer i RF. Ved optagelsen af vand brydes de intermolekylærebindinger imellem cellulosepolymererne og der dannes nye hydrogenbindinger imellem de polære vandmolekyler og hydroxylsidegrupperne i cellulose (Banik, 2010 s. 164-165). Cellulosepolymererne absorberer først vandmolekylerne i et enkelt monomolekylært lag. Det monomolekylære vand er bundet via stærke hydrogenbindinger til cellulosepolymeren

og er derfor ikke tilgængelig for kemisk og biologisk nedbrydning. Herefter absorberes vandmolekyler i flere lag imellem cellulosepolymererne og danner hydrogenbindinger igennem andre vandmolekyler til cellulosepolymeren (Banik, 2004 s. 21).

Efterhånden som afstanden imellem cellulosepolymererne og vandmolekylerne øges er vandmolekylerne mere tilbøjelige til at danne hydrogenbindinger til andre vandmolekyler og derved danne bevægelige samlinger af vand (Banik, 2004 s. 21). Dette vand kaldes kapillærvand (Banik, 2010 s. 169).

Den nedenstående absorptionskurve viser sammenhængen imellem celluloses optagelse og afgivelse af vand ved forskellige RF. Afstanden imellem de to kurver skyldes fænomenet hysteres³.

Absorptionskurve



Figur 6 viser cellulosepolymerens optagelse og afgivelse af vand ved forskellige RF. Diagrammet er lavet af Signe Smedemark med udgangspunkt i et diagram hentet fra Banik, 2004 s. 21.

Vandmolekyler der optages under 20 % RF danner et monomolekylært lag med stærke hydrogenbindinger til cellulosepolymererne og er ikke tilgængelige for nedbrydningen af cellulose. Ved RF imellem 20 og 80 % akkumuleres vandmolekylerne i flere lag og bindes efterhånden mere løst til cellulosepolymeren. Ved RF over 80 % dannes kapillærvand imellem cellulosepolymererne (Banik, 2004 s. 21-22). Tilstedeværelsen af kapillærvand medfører en risiko for opløsning af klæbestoffer, nedbrydningsprodukter og andre forbindelser og deres migration igennem papiret (Banik, 2010 s. 169). Som beskrevet under afsnit 2.3.1 absorberes vandmolekylerne hovedsageligt i de amorfede dele af cellulosepolymeren og får materialet til at udvide sig (Tímár-Balázsy og Eastop, 1998 s. 25). Tilstedeværelsen af tilgængelige vandmolekyler medfører desuden en risiko for hydrolytisk og biologisk nedbrydning af cellulosepolymererne.

Ved at tilpasse klimaforholdene i magasinet således, at RF ikke overstiger 80 %, kan man undgå dannelsen af kapillærvand i papiret. Fastholdes RF under 65 % mindskes risikoen desuden for biologisk angreb (se afsnit 2.2.2). En undersøgelse viser at en halvering RF i omgivelserne mere end fordobler papirets levetid (Michalski, 2002 s. 70). En sænkning af RF i magasinet vil dermed medføre en forlængelse af papirets levetid.

³ De to kurver for cellulosepolymerens optagelse og afgivelse af vand er forskudt og cellulosepolymeren reagerer således forskelligt under optagelsen og afgivelsen af vand.

En vis mængde vand i papiret og dermed en vis RF i omgivelserne er imidlertid fordelagtig da det øger materialets fleksibilitet og mindsker risikoen for fysiske skader under håndteringen af materialet (Padfield, 2006 s. 2). For at formindske risikoen for dimensionsforandringer og fysiske skader i papiret, som følge af papirets gentagne optagelse og afgivelse af fugt fra omgivelserne, er det desuden vigtigt at RF holdes konstant i magasinet.

3.3 Delkonklusion

Eksterne faktorer som temperaturen og RF har en afgørende betydning for nedbrydningen af papir. Ved et fald i temperaturen på 5° C formindskes den kemiske nedbrydning og papirets levetid fordobles. Den biologiske nedbrydning afhænger ligeledes af temperaturen. Enzymernes aktivitet stiger eksponentielt med temperaturen og en sænkning af temperaturen i magasinet vil medføre en forlængelse af papirets levetid.

Ved at halvere RF i omgivelserne kan man mere end fordoble papirets levetid og fastholdes RF under 65 % kan man desuden formindske risikoen biologisk nedbrydning. En vis mængde vand i papiret er imidlertid fordelagtig da det øger materialets fleksibilitet og mindsker risikoen for fysiske skader under håndteringen af materialet. Variationer i RF må undgås for at forebygge dimensionsforandringer og permanente fysiske skader i papiret.

Ved at sænke temperaturen og fastholde moderate konstante RF under 65 % kan man forlænge papirets levetid i magasinerne.

4. Anbefalinger ved opbevaring af biblioteksmateriale

4.1 Hvilke fordele er der ved lavtemperaturmagasiner?

Som beskrevet i det foregående afsnit er der en sammenhæng imellem temperatur, RF og nedbrydningen af papir. Ved at sænke temperaturen og RF i magasinet kan nedbrydningen formindskes og papirets levetid forlænges. Et fald i temperaturen på 5° C medfører en fordobling af papirets levetid. En halvering af RF vil mere end fordoble papirets levetid. Sænkes temperaturen og RF således fra 20° C og 50 % RF til 12° C og 45 % RF forlænges papirets levetid fire gange. Bevaringsmæssigt er det dermed en fordel at anvende lavtemperaturmagasiner så længe moderate konstante RF fastholdes.

At kontrollere temperatur og RF i magasinerne er imidlertid energikrævende. Ved at tillade temperaturen at variere med klimaforholdene udenfor kan man udnytte vinterens lave temperaturer og herved spare energi. Ved fastsætning af klimaforholdene i magasinet accepteres således en variation i temperatur i løbet af året (Ryhl-Svendsen, 2006 s. 1). RF holdes konstant i magasinet for at undgå skader som følge af ekstreme RF og variationer i luftfugtigheden (se afsnit 6 Hvordan påvirker svingninger i RF nedbrydningen af papir ved gentagne udtagninger?).

4.2 Hvilke anbefalinger gives for opbevaring af biblioteksmateriale?

Biblioteksmaterialet i magasinerne består ofte af sammensatte materialer som blandt andet indbundne bøger, illumineret pergamentmanuskripter, papirmanuskripter, palmeblade, tekstilruller, glober, fotografier, negativer, kort, mikrofilm og magnetbånd. Fastsætningen af temperatur og RF i magasiner med sammensat materiale skal dermed tage hensyn til flere forskellige materialer. Den internationale ISO standard 11799 (2003) for magasinering af arkiv og biblioteksmateriale anbefaler en minimumstemperatur for papirmateriale på 2° C og en maksimal temperatur på 18° C. RF for magasinering af papirmateriale anbefales til minimum 30 % RF og maksimalt 45 % RF (ISO, 2003 s. 11). Ved magasinering af læder og pergament anbefaler ISO standard 11799 (2003) det samme temperaturinterval, og en minimum på 50 % RF og maksimalt 60 % RF (ISO, 2003 s. 11). Ved magasinering af biblioteksmateriale som læderindbundne bøger, der indeholder forskellige materialer med forskellige anbefalinger til RF, bliver det derfor et kompromis imellem de forskellige materialer.

I ISO standard 11799 (2003) angives den acceptable variation i temperatur og RF for papirmateriale, læder og pergament til $\pm 1^\circ \text{C}$ og $\pm 3\%$ RF under et døgn. For at undgå stress i materialet er målet at holde temperaturen og RF så konstant som praktisk muligt (ISO, 2003 s. 7).

4.3 Det Kongelige Biblioteks magasin på Njalsgade 112

For at forlænge biblioteksmaterialets levetid har Det Kongelige Bibliotek i Danmark etableret flere nye lavtemperaturmagasiner (Informant 1). Byggeprojektet med etableringen af det nye lavtemperaturmagasin på Njalsgade 112 blev afsluttet i 2008. Magasinet blev bygget med et semipassivt klimakontrolsystem. Systemet opererer med en passiv klimakontrol, der følger klimaforholdene udenfor og således udnytter de lave temperaturer under vinterperioden. Klimasystemet har desuden et mekanisk system der

overtager når den passive klimakontrol er utilstrækkelig. Magasinet er sat til en temperatur og RF på $12^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ og $45\% \text{ RF} \pm 5\% \text{ RF}$ (Vest, 2008 s. 814).

Magasinets set point indstillinger justeres løbende. Tabel 1 viser magasinets set point indstillinger for de kommende år (Informant 1). Temperaturen i magasinet varierer fra 8 til 15°C og RF varierer fra 40 til 50 % under et år. I afsnit 7 Figur 19 gennemgås datalogmålinger af klimaforholdene i magasinet udført fra juni til januar i år 2010. Datalogmålingerne viser en variation i temperatur og RF på 8 til 14°C og fra 40 til over 55 % RF under år 2010. Magasinet har desuden et karbonfilter der mindsker luftforureninger i magasinet (Vest, 2008 s. 814).

Måned	Temperatur	RF
Januar	8°C	40 % RF
Februar	8°C	40 % RF
Marts	8°C	42 % RF
April	9°C	44 % RF
Maj	10°C	46 % RF
Juni	12°C	48 % RF
Juli	15°C	50 % RF
August	15°C	50 % RF
September	15°C	48 % RF
Oktober	12°C	46 % RF
November	9°C	44 % RF
December	8°C	42 % RF

Tabel 1 viser set point indstillingerne for magasinet på Njalsgade 112.

4.4. Delkonklusion

Bevaringsmæssigt er det en fordel at anvende lavtemperaturmagasiner så længe moderate konstante RF fastholdes. For at spare energi kan man imidlertid tillade temperaturen at variere med klimaforholdene udenfor og derved udnytte vinterens lave temperaturer.

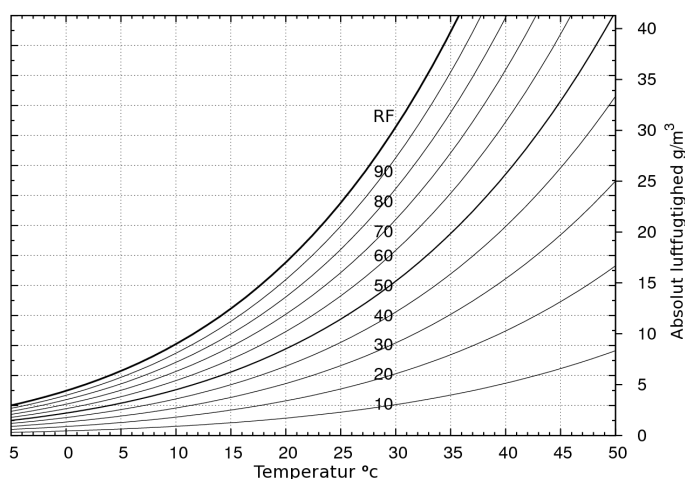
Den internationale ISO-standard 11799 (2003) for magasinering af arkiv og biblioteksmateriale anbefaler et temperaturinterval på 2 til 18°C og imellem 30 og 45 % RF for magasinering af papir. Fastsætningen af temperatur og RF i magasiner med sammensat materiale er imidlertid ofte et kompromis imellem de forskellige materialer i magasinet.

5. Forsøg med udtagning og tilbageflytning af bøger

5.1 Forudsætninger for kondensdannelse

Til at angive luftens indhold af fugt anvendes begreberne absolut og relativ luftfugtighed (Thomson og International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1986 s. 67-68). Den absolutte luftfugtighed er den vandmængde målt i gram per kubikmeter som luften indeholder. RF er forholdet, angivet i procent, imellem den absolutte luftfugtighed ved den aktuelle temperatur og den absolutte luftfugtighed når luften er mættet med vanddamp ved samme temperatur.

Den mængde af vanddamp luften maksimalt kan indeholde afhænger af temperaturen. Sænkes temperaturen kan luften indeholde mindre vand. Denne sammenhæng imellem temperatur, absolut luftfugtighed og RF fremgår af en dugpunktskurve (se Figur 7).



Figur 7 viser sammenhængen imellem temperatur, absolut og relativ luftfugtighed i en dugpunktskurve. Diagram hentet fra <http://www.conservationphysics.org>.

Når temperaturen sænkes bevæger man sig mod venstre, langs x-aksen der angiver temperaturen, i dugpunktskurven. Jo længere mod venstre man bevæger sig jo mindre vandmængde kan luften indeholde, set på y-aksen med absolut luftfugtighed, ved de forskellige relative luftfugtighedskurver. Ved 100 % RF er luften mættet med vanddamp og sænkes temperaturen yderligere udskilles vanddampen som kondens. Dette kaldes dugpunktet.

5.2 Risiko for kondensdannelse ved udtagning af biblioteksmateriale

Ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner vil materialet afkøle den omgivende luft. Afkølingen af den omgivende luft medfører at luften kan indeholde en mindre vandmængde og afkøles luften så fugtindholdet overstiger dugpunktet udskilles vandet som kondens.

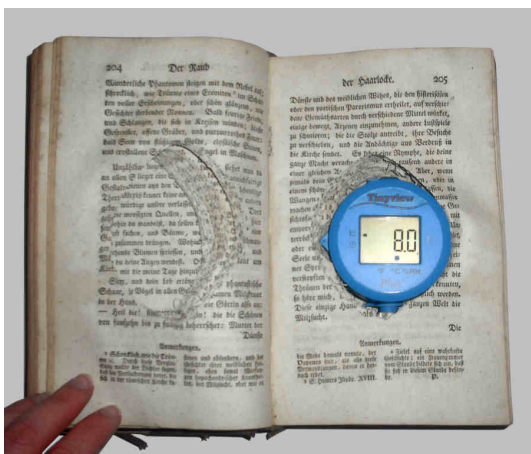
Udover risikoen for kondensdannelse på overfladen af materialet vil den hurtigere akklimatisering af overfladen i forhold til midten, som beskrevet i afsnit 2.2.3, medføre en længerevarende risiko for kondensdannelse inde i materialet når det åbnes.

5.3 Forsøg med udtagning af bøger fra lavtemperaturmagasin

For at bestemme risikoen for kondensdannelse inde i en bog, når den åbnes, undersøges tidsrummet for temperaturakklimatisering af en bog efter udtagning fra lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 til sorteringsrummet.

5.3.1 Forsøgsbeskrivelse

For at bestemme tidsrummet for akklimatisering af en bog udføres følgende to delforsøg. I det første forsøg anvendes en kasseret bog. Bogen_{datalogger1} er udhulet således at der er plads til en datalogger og vejer 587g efter udhulningen (se Figur 8). I det andet forsøg anvendes ligeledes en kasseret bog. Bogen_{datalogger2} er udhulet således at der er plads til en datalogger og vejer 705g efter udhulningen.



Figur 8 viser en udhulet bog anvendt under de to delforsøg. Foto Signe Smedemark.

Bog	Størrelse (L x B x D)	Vægt
Bog _{datalogger1}	19,4 x 12,5 x 5,3 cm	587g
Bog _{datalogger2}	19,3 x 12,2 x 5,5 cm	705g
Bog _{stak1}	24 x 17,4 x 3 cm	902g
Bog _{stak2}	23,8 x 16,5 x 4,5 cm	1559g
Bog _{stak3}	23,4 x 16,5 x 4,4 cm	1020g
Bog _{stak4}	23,3 x 15,6 x 2,7 cm	597g
Bog _{stak5}	21,7 x 18,3 x 5 cm	1086g

Tabel 2 viser størrelsen og vægten på bøgerne anvendt under de to delforsøg.

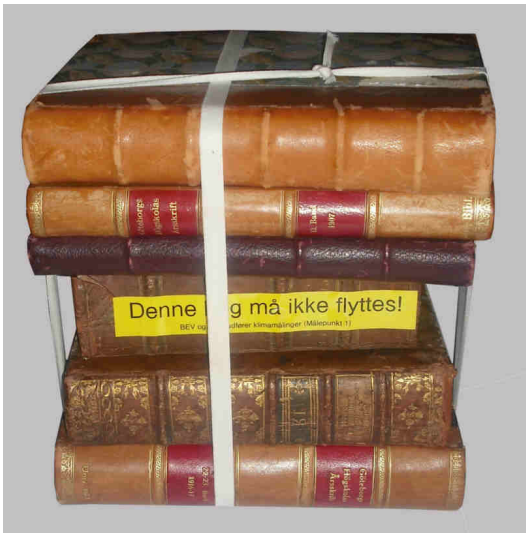
En datalogger placeres inde i bog_{datalogger1} og bog_{datalogger2}. Dataloggerne er indstillet til at måle og registrere klimaforholdene en gang i minuttet. Tidsrummet for akklimatiseringen måles ligeledes af dataloggeren.

I det første delforsøg placeres en tilsvarende datalogger på ydersiden af bog_{datalogger1}. Under udtagningen af bog_{datalogger1} fra lavtemperaturmagasinet til sorteringsrummet registrerer de to dataloggere forandringerne i temperatur og RF på ydersiden og inde i bogen (se Figur 9).



Figur 9 viser forsøgsopstillingen under det første delforsøg. $Bog_{data\ logger1}$ er udhulet som vist i Figur 8. $Bog_{data\ logger1}$ holdes lukket under forsøget med en snor. Foto af Signe Smedemark.

I det andet delforsøg placeres $bog_{data\ logger2}$ i midten af en stak bøger. Forsøgsopstillingen er vist i Figur 10. Stakken af bøger udgøres af bog_{stak1} til bog_{stak5} , som beskrevet i Tabel 2, og er omkring 25 cm høj. $Bog_{data\ logger2}$ udtages fra lavtemperaturmagasinet til sorteringsrummet liggende i stakken og dataloggeren registrerer således forandringen i temperatur og RF i midten af en stak bøger.



Figur 10 viser forsøgsopstillingen under det andet delforsøg. $Bog_{data\ logger2}$ er udhulet og har en datalogger i midten som vist i Figur 8. $Bog_{data\ logger2}$ holdes lukket og hele stakken holdes sammen med en snor. Foto af Signe Smedemark.

Bøgerne til begge delforsøg blev placeret i magasinet på Njalsgade 112 onsdag d. 13.04.2011 og akklimatiseret i magasinet indtil fredag d. 15.04.2011. Bøgerne blev udtaget fra magasinet fredag d. 15.04.2011 omkring klokken 13:15.

5.3.2 Fejlkilder

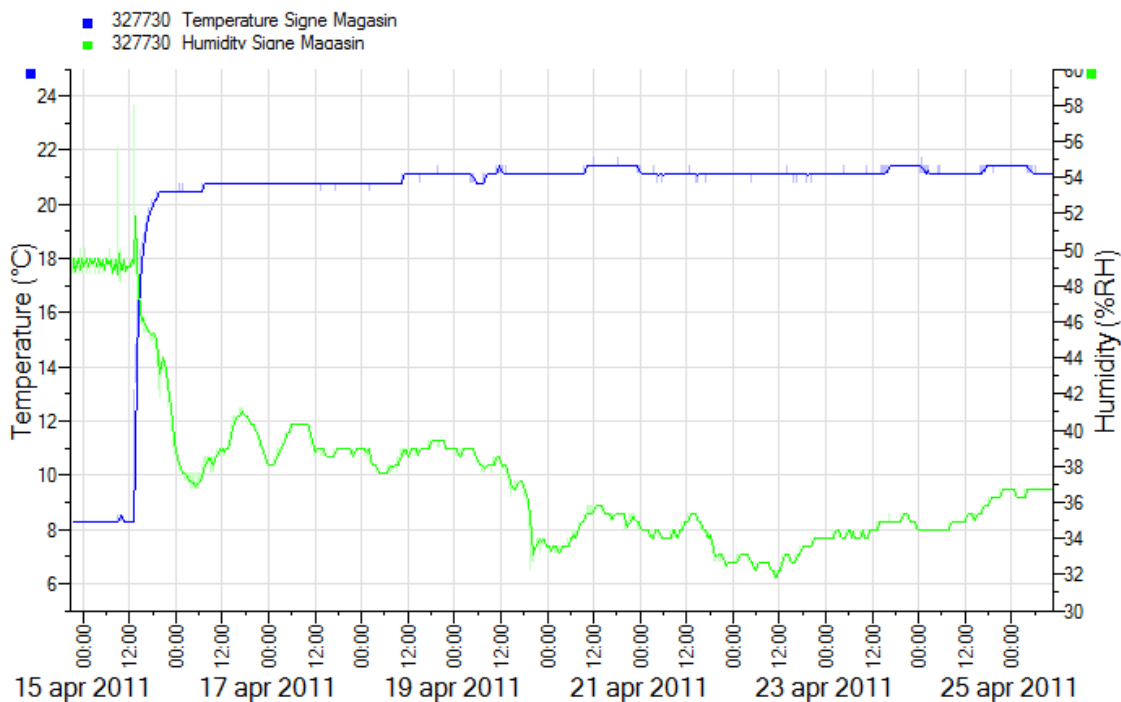
En fejlkilde er måleusikkerheden ved anvendelsen af dataloggere af typen Tinyview Plus med en temperaturnøjagtighed på $\pm 0,2^\circ\text{C}$ imellem 0 og 50°C og en nøjagtighed på $\pm 0,3\%$ RF ved 25°C . Efter temperaturakklimatiseringen af forsøgsbøgerne i magasinet måler dataloggeren i midten af $bog_{data\ logger1}$ under 8°C , mens dataloggeren i $bog_{data\ logger2}$ måler 8°C . Tilsvarende måler midten af $bog_{data\ logger1}$ efter temperaturakklimatiseringen i sorteringsrummet under 21°C , mens midten af $bog_{data\ logger2}$ måler over 21°C . Forskellen er omkring 4°C og kan skyldes måleusikkerhed eller manglende kalibrering.

En fejlkilde er frem for alt at dataloggeren måler en temperatur og RF gradient omkring $bog_{data\ logger1}$ og ikke klimaforholdene præcis ved ydersiden. Tilsvarende måler dataloggerne temperatur og RF inde i et udhulet luftrum i $bog_{data\ logger1}$ og $bog_{data\ logger2}$. For mere korrekt at måle klimaforandringerne i materialet under udtagning og tilbageflytning skal man anvende en datalogger der måler klimaforandringerne i materialet eller direkte på overfladen som for eksempel en IR måler.

Herudover er dataloggerne temperaturakklimatiseret til samme temperatur som forsøgsbøgerne og under udtagning og tilbageflytning vil de tilsvarende bidrage til afkøling og opvarmning af den omgivende.

5.3.3 Resultat og diskussion

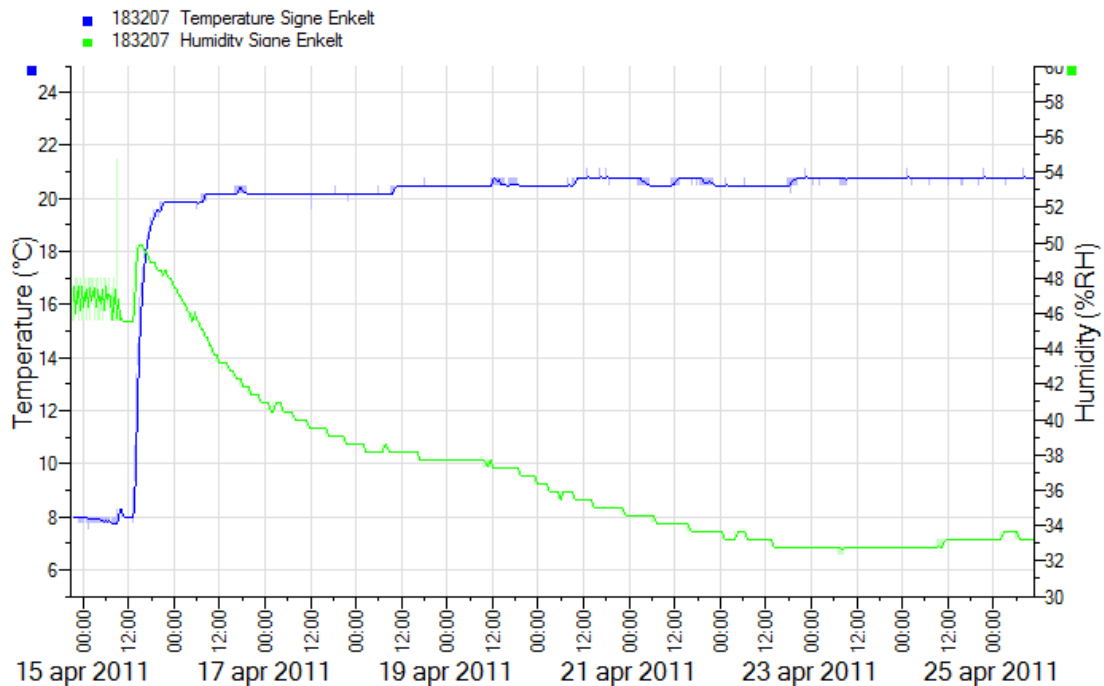
Resultaterne fra de to delforsøg er vist i figur 11a, 12a og 13a. Et udsnit af diagrammerne i tidsrummet under udtagelsen er vist i Bilag 1.



Figur 11 a viser forandringen i temperatur og RF på ydersiden af bog_{datalogger1} under udtagning fra magasinet til sorteringsrummet. Datalogmålinger udført af Signe Smedemark.

Ved udtagning af bog_{datalogger1} måler dataloggeren klimaforholdene i luften ved ydersiden af bogen til 8° C og 49 % RF. I det bog_{datalogger1} udtages fra magasinet stiger RF kortvarigt til 56 % (se Figur 11 a og Bilag 1). Under udtagning afkøler bog_{datalogger1} den omgivende luft og dette medfører en stigning i RF. Dataloggeren registrerer her klimaforholdene i luften omkring bog_{datalogger1} og påvirkes således af fugtindholdet i den omgivende luft. Denne fejlkilde medfører en risiko for højere RF ved ydersiden af bog_{datalogger1} end dataloggeren måler. Efter den kortvarige stigning i RF temperaturakklimatiseres forsøgsbøgerne og stigningen i temperatur medfører et efterfølgende fald i RF.

Temperaturen på ydersiden af bog_{datalogger1} akklimatiseres eksponentielt og efter seks timer er materialets yderside tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til lige over 20° C.

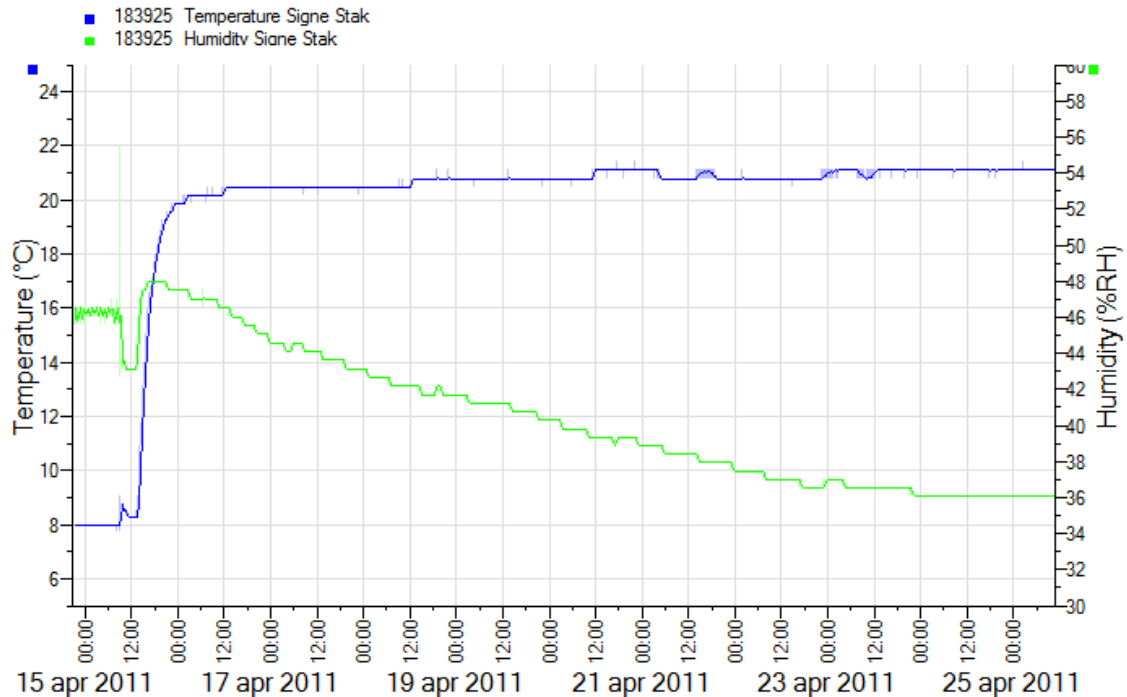


Figur 12 a viser forandringen i temperatur og RF inde i bog_{datalogger1} under udtagning fra magasinet til sorteringsrummet. Datalogmålinger udført af Signe Smedemark.

Inden udtagning af bog_{datalogger1} måler dataloggeren klimaforholdene i midten af bogen til 8° C og 46 % RF. I det bog_{datalogger1} udtages fra magasinet stiger RF kortvarigt i midten af bogen, ifølge diagrammet i Figur 12 a, til 50 % (se også Bilag 1). En fejlkilde er her at dataloggeren registrerer klimaforholdene i et hulrum i bog_{datalogger1} og ikke i materialet. Den mindre stigning fra 46 til 50 % RF i midten af bog_{datalogger1} i forhold til 49 til 56 % RF på ydersiden af bog_{datalogger1} under udtagningen kan forklares med materialets langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden og dets buffereffekt.

De svingninger i RF der forekommer i sorteringsrummet efter udtagning af forsøgsbøgerne afdæmpes i midten af bog_{datalogger1} i forhold til ydersiden af bog_{datalogger1}. Dette kan ligeledes forklares med den langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden af materialet og dets buffereffekt.

Temperaturen i midten af bog_{datalogger1} akklimatiseres eksponentielt og efter seks timer er den temperaturakklimatiseret til lidt under 20° C.



Figur 13 a viser forandringen i temperatur og RF i midten af bog_{data logger2} placeret i en stak bøger under udtagning fra magasinet til sorteringsrummet. Datalogmålinger udført af Signe Smedemark.

Ved udtagning af bog_{data logger2} måler dataloggeren klimaforholdene i midten af bogen placeret i en stak bøger til 8° C og 43 % RF. En fejlkilde er også her at dataloggeren registrerer klimaforholdene i et hulrum i bog_{data logger2} og ikke i materialet. I det bog_{data logger2} udtages fra magasinet stiger RF i midten af bogen til 48 %. Stigningen i midten af bog_{data logger2} fra 43 til 48 % RF er den samme stigningen på 4 % RF som i midten af bog_{data logger1}. I dette forsøg har stakken af bøger således ingen indflydelse på stigningen i RF under udtagning. Den mindre stigning i midten af bog_{data logger2} i forhold til ydersiden af bog_{data logger1} under udtagning kan forklares med materialets langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden af dets buffereffekt.

De svingninger i RF der forekommer i sorteringsrummet efter udtagning af materialet afdæmpes yderligere i midten af bog_{data logger2} i forhold til ydersiden af bog_{data logger1} og midten af bog_{data logger1}. Dette kan ligeledes forklares med den langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden af materialet og materialets buffereffekt.

Temperaturen i midten af bog_{data logger2} akklimatiseres eksponentielt og efter seks timer er materialet temperaturakklimatiseret til lige under 19° C.

De to delforsøg viser at materialets afkøling af den omgivende luft under udtagning medfører en stigning i RF. Den fejlkilde at dataloggeren registrerer klimaforholdene i luften omkring bog_{data logger1} og påvirkes derfor af fugtindholdet i den omgivende luft medfører en risiko for højere RF ved ydersiden af bog_{data logger1} end dataloggeren måler. Under sommermånedene vil forøgelsen af temperatur og fugtindholdet i sorteringsrummet medføre en større stigning i RF under udtagelsen og risiko for kondensdannelse.

De to delforsøg viser desuden at temperaturakklimatiseringen af ydersiden af materialet sker hurtigere end midten af materialet. Efter en time er ydersiden af bog_{data logger1} akklimatiseret til 16° C og efter tre timer til over 19° C, mens midten af bog_{data logger1} er temperaturakklimatiseret til 12° C efter en time og lige under 18° C efter tre timer. Placeres materialet i en stak af bøger under udtagning forlænges tidsrummet for temperaturakklimatisering af materialet til under 10° C efter en time og 15° C efter tre timer. Tre timer efter udtagning af forsøgsbøgerne fra magasinet på Njalsgade 112 er det tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til klimaforholdene i sorteringsrummet og der er hverken risiko for kondensdannelse på overfladen eller i midten af materialet når det åbnes. Det er imidlertid betydningsfuldt at materialet placeres enkeltvis efter udtagelsen fra lavtemperaturmagasiner for at formindske akklimatiseringstiden.

5.4 Risiko for kondensdannelse ved tilbageflytning af biblioteksmateriale

Ved tilbageflytning af biblioteksmateriale til lavtemperaturmagasiner vil materialet opvarme den omgivende luft. Opvarmningen af den omgivende luft medfører at luften kan indeholde en større vandmængde. Ved tilbageflytning af biblioteksmateriale til lavtemperaturmagasiner vil der således kun være mindre risiko for kondensdannelse under de fugtigste sommermåneder.

Ved akklimatisering af papir udlignes temperaturen hurtigere end fugtigheden. Efterhånden som temperaturen falder er luften i stand til at indeholde en mindre vandmængde. Ved tilbageflytning af papir til lavtemperaturmagasiner vil den hurtigere akklimatisering af temperaturen medføre en stigning i RF og en risiko for opfugtning af materialet.

5.5 Forsøg med tilbageflytning af bøger til lavtemperaturmagasin

For at undersøge risikoen for opfugtning af biblioteksmateriale under tilbageflytning til lavtemperaturmagasiner udføres nedenstående to delforsøg med tilbageflytning af forsøgsbøger fra sorteringsrummet til magasinet på Njalsgade 112.

5.5.1 Forsøgsbeskrivelse

De to delforsøg har samme forsøgsopstilling som forsøget beskrevet under afsnit 5.3.1. Forsøget adskiller sig udelukkende ved at bøgerne i dette forsøg flyttes fra sorteringsrummet og tilbage til magasinet. Bøgerne blev flyttet tilbage onsdag d. 06.04.2011 klokken 11:50 og akklimatiseret i magasinet indtil tirsdag d. 12.04.2011⁴.

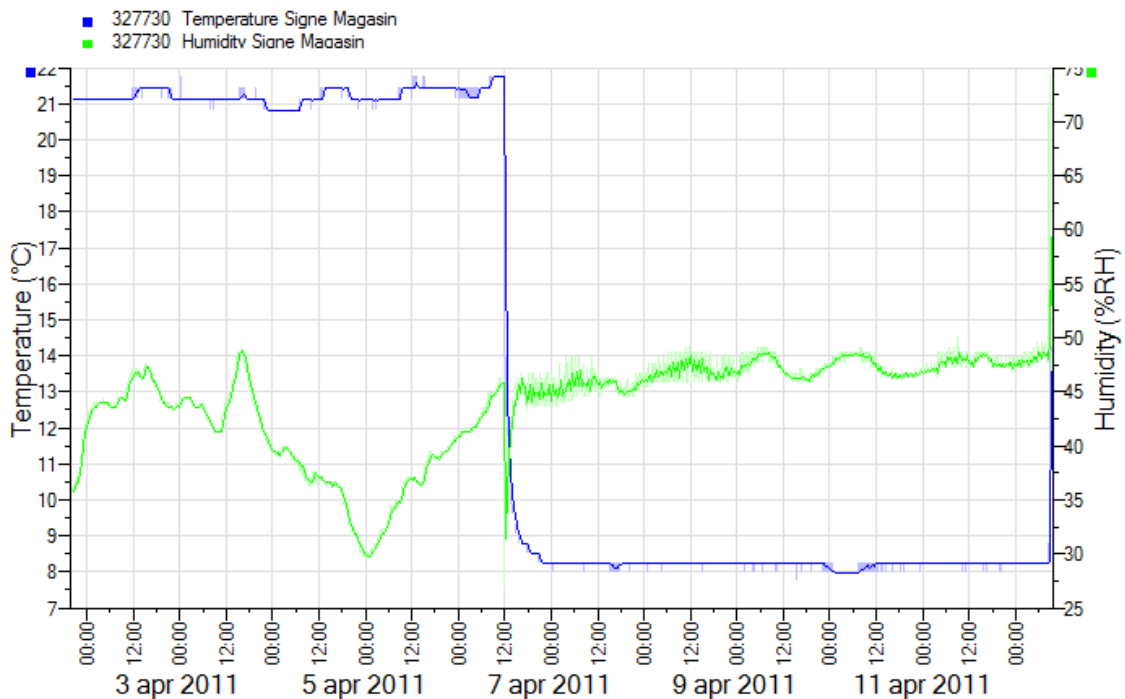
5.5.2 Fejlkilder

De to delforsøg har samme fejlkilder som beskrevet under afsnit 5.3.3.

5.5.3 Resultat og diskussion

Resultaterne fra de to delforsøg er vist i figur 14a, 15a og 16a. Et udsnit af diagrammerne i tidsrummet under tilbageflytning er vist i Bilag 2.

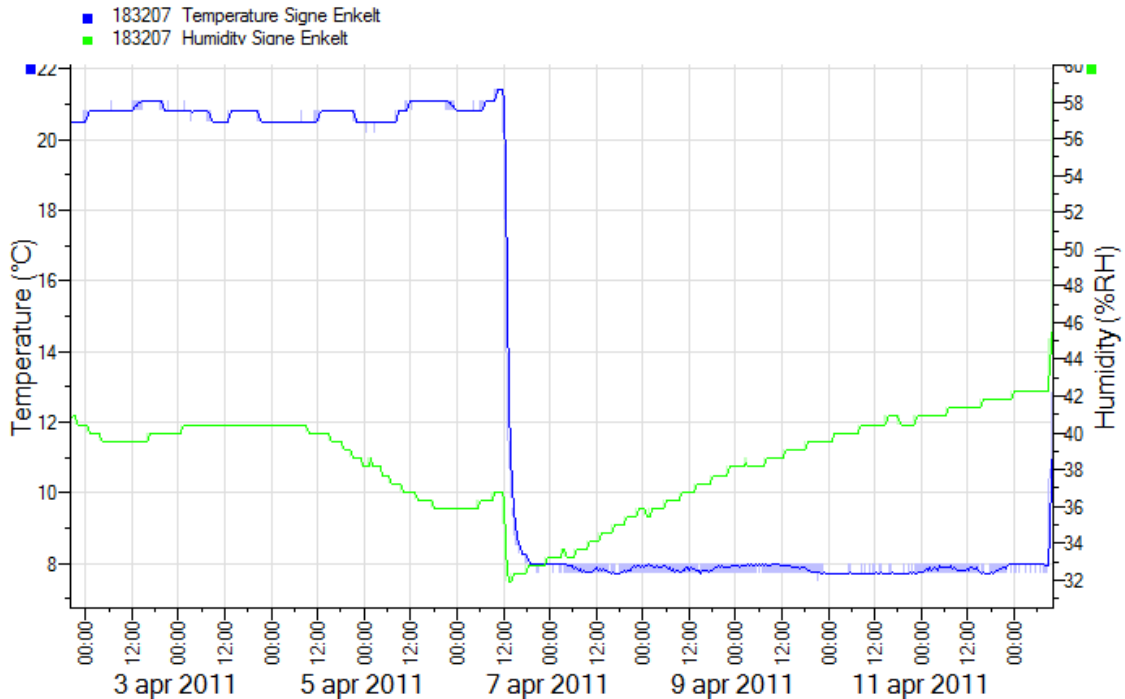
⁴ Forsøget med udtagning af bøger fra lavtemperaturmagasin, beskrevet under afsnit 5.3, blev udført to gange pga. forkerte datalogindstillinger under det første forsøg og de to forsøg er derfor ikke i kronologisk rækkefølge.



Figur 14 a viser forandringen i temperatur og RF på ydersiden af bog_{data logger1} under tilbageflytning fra sorteringsrummet til magasinet. Datalogmålinger udført af Signe Smedemark.

Ved tilbageflytning af bog_{data logger1} måler dataloggeren klimaforholdene på ydersiden af bogen til 21° C og 46 % RF (se Bilag 2). I det bog_{data logger1} flyttes tilbage til magasinet falder RF i den omgivende luft til 27 %. Under tilbageflytning af bog_{data logger1} opvarmes den omgivende luft og dette medfører et fald i RF. Dataloggeren registrerer klimaforholdene i luften omkring bog_{data logger1} og påvirkes således af fugtindholdet i den omgivende luft. Denne fejlkilde medfører en risiko en anden RF ved ydersiden af bog_{data logger1} end dataloggeren måler. Efter det kortvarige fald fra 46 til 27 % RF akklimatiseres materialet. De svingninger i RF der ses i Figur 14 a efter tilbageflytning skyldes klimasystemets fugtstyring.

Temperaturen på ydersiden af bog_{data logger1} akklimatiseres eksponentielt og efter ni timer er materialets yderside tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til lige over 8° C.

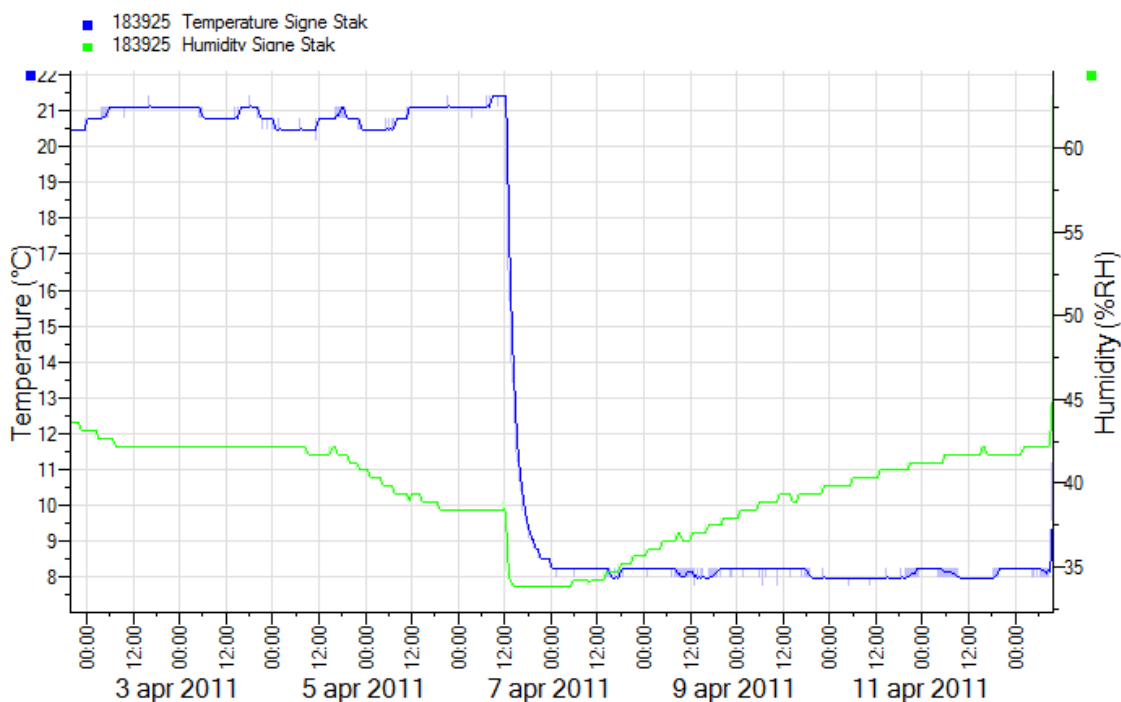


Figur 15 a viser forandringen i temperatur og RF inde i bog_{datalogger1} under tilbageflytning fra sorteringsrummet til magasinet. Datalogmålinger udført af Signe Smedemark.

Inden tilbageflytning af bog_{datalogger1} måler dataloggeren klimaforholdene i midten af bogen til 21° C og 36 % RF (se Figur 15 a og Bilag 2). I det bog_{datalogger1} flyttes tilbage til magasinet falder RF i den omgivende luft til 32 %. En fejlkilde er her at dataloggeren registrerer klimaforholdene i et hulrum i bog_{datalogger1} og ikke i materialet. Dette fald fra 36 til 32 % RF i midten af bog_{datalogger1} i forhold til 46 til 27 % på ydersiden af bog_{datalogger1} under tilbageflytningen kan forklares med materialets langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden og dets buffereffekt.

De svingninger i RF der forekommer i magasinet efter tilbageflytning af materiale afdæmpes i midten af bog_{datalogger1} i forhold til ydersiden af bog_{datalogger1}. Dette kan forklares med den langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden af materialet og materialets buffereffekt.

Temperaturen i midten af bog_{datalogger1} akklimatiseres eksponentielt og efter syv timer er midten af materialet tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til 8° C. Denne hurtigere temperaturakklimatisering af midten af bog_{datalogger1} i forhold til ydersiden af bog_{datalogger1} kan skyldes måleusikkerhed eller manglende kalibrering af dataloggerne.



Figur 16 a viser forandringen i temperatur og RF i midten af bog_{datalogger2} placeret i en stak bøger under tilbageflytning fra sorteringsrummet til magasinet. Datalogmålinger udført af Signe Smedemark.

Ved tilbageflytning af bog_{datalogger2} måler dataloggeren klimaforholdene i midten af bogen placeret i en stak af bøger til 21° C og 38 % RF (se Figur 16 a og udsnittet i Bilag 2). I det bog_{datalogger2} flyttes tilbage til magasinet falder RF i midten af bogen til 34 %. Faldet i RF fra 38 til 34 % i bog_{datalogger2} er det samme fald på 4 % RF som i midten af bog_{datalogger1}. En fejlkilde er også her at dataloggeren registrerer klimaforholdene i et hulrum i bog_{datalogger2} og ikke i materialet. I dette forsøg har stakken af bøger således ingen indflydelse på stigningen i RF under tilbageflytning. Det mindre fald i midten af bog_{datalogger2} i forhold til ydersiden af bog_{datalogger1} under tilbageflytning kan forklares med materialets langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden og dets buffereffekt.

De svingninger i RF der forekommer i magasinet efter tilbageflytning af materiale afdæmpes yderligere i midten af bog_{datalogger2} af materialet i stakken i forhold til ydersiden af bog_{datalogger1} og midten af bog_{datalogger1}. Dette kan ligeledes forklares med den langsommere akklimatisering af midten i forhold til ydersiden af materialet og materialets buffereffekt.

Temperaturen i midten af bog_{datalogger2} placeret i en stak af bøger akklimatiseres eksponentielt og efter ni timer er midten af materialet tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til lige under 9° C og efter tolv timer til lige over 8° C.

De to delforsøg viser at materialets opvarmning af den omgivende luft under tilbageflytning medfører et fald i RF. Under sommermånedene vil forøgelsen af temperatur og fugtindhold i sorteringsrummet medføre en mindre risiko for kondensdannelse ved tilbageflytning af biblioteksmateriale til lavtemperaturmagasiner. Efter det kortvarige fald i RF under tilbageflytning stiger RF igen til klimaforholdene i magasinet. Under tilbageflytning af materiale til lavtemperaturmagasiner sker der således

en reduktion af RF og der er dermed igen målelig risiko for opfugtning af materialet under tilbageflytning.

De to delforsøg viser desuden at temperaturakklimatiseringen af ydersiden af materialet sker hurtigere end midten. Efter en time er ydersiden af bog_{datalogger1} akklimatiseret til lige under 12° C og efter tre timer til 9° C, mens midten af bog_{datalogger1} er akklimatiseret til over 15° C efter en time og over 9° C efter tre timer.

Placeres materialet i en stak af bøger under tilbageflytning til lavtemperaturmagasiner forlænges tilsvarende tidsrummet for temperaturakklimatisering af materialet. Midten af bog_{datalogger1} var efter en time temperaturakklimatiseret til over 15° C og efter tre timer til over 9° C, mens bog_{datalogger2} placeret i en stak af bøger var temperaturakklimatiseret til over 18° C efter en time og over 12° C efter tre timer.

5.6 Undersøgelse af temperaturgradienten i magasinet på Njalsgade 112

Luften er i stand til at indeholde en mindre vandmængde ved lave temperaturer. I forbindelse med anvendelsen af lavtemperaturmagasiner er kontrollen af RF i magasinet derfor vigtig. I magasiner med manglende luftcirkulation kan der opstå en temperaturgradient eller områder med mikroklima i magasinet. Forekomsten af en temperaturgradient eller mikroklima kan give anledning til udviklingen af skimmelsvampe.

For at undersøge temperaturgradienten i magasinet på Njalsgade 112 blev temperaturen og RF målt tre steder i magasinet med en datalogger. Den første måling blev udført midt i magasinet ved siden af den klimaføler der styrer klimaet i magasinet. Her målte temperaturen 7,3° C og 44,5 % RF. De to efterfølgende målinger blev taget i hver ende af magasinet. Her målte temperaturen 7,3° C og 44,8 % RF i den ene ende og 7,2° C og 47,2 % RF i den anden.

Målingerne viser en forskel på 0,1° C og 2,4 % RF inde i magasinet. Denne forskel i temperatur og RF kan skyldes måleusikkerhed og der er dermed ingen temperatur og fugtighedsgradient i magasinet.

5.7 Delkonklusion

Denne undersøgelse af klimaforandringerne i bøger viser en stigning i RF på ydersiden af materialet under udtagning. Under sommermånederne vil forøgelsen af temperatur og fugtindhold i sorteringsrummet medføre en større stigning i RF under udtagning og risiko for kondensdannelse.

Datalogmålingerne viser desuden at ydersiden af materialet akklimatiseres hurtigere end midten og at tidsrummet for temperaturakklimatiseringen yderligere forlænges når materialet er placeret i en stak af bøger.

Efter tre timer vil biblioteksmateriale der udtages fra lavtemperaturmagasinet være tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til klimaforholdene i sorteringsrummet og der vil hverken være risiko for kondensdannelse på overfladen eller i midten af materialet når det åbnes. Det er imidlertid betydningsfuldt at materiale placeres enkeltvis efter udtagning fra lavtemperaturmagasiner for at formindske akklimatiseringstiden.

Denne undersøgelse af klimaforandringerne i bøger under tilbageflytning viser et fald i RF. Under tilbageflytning af materiale til lavtemperaturmagasiner sker der således en reduktion

af RF og der er ingen målelig risiko for opfugtning af materialet. Under sommermånederne vil forøgelsen af temperatur og fugtindhold i sorteringsrummet medføre en mindre risiko for kondensdannelse ved tilbageflytning af biblioteksmateriale til lavtemperaturmagasiner.

Datalogmålingerne under tilbageflytning viser ligeledes at ydersiden af materialet akklimatiseres hurtigere end midten og at tidsrummet for temperaturakklimatisering yderligere forlænges når materiale er placeret i en stak af bøger.

En fejlkilde ved forsøgene er måleusikkerheden ved anvendelsen af dataloggere, manglende kalibrering af dataloggerne og frem for alt at dataloggerne måler en temperatur og RF gradient omkring materialet og ikke klimaforholdende præcis ved ydersiden.

I magasiner med manglende luftcirkulation kan der opstå temperaturgradienter eller områder med mikroklima. Målinger tre steder i lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 viser ingen påviselig temperatur- og fugtighedsgradient.

6. Hvordan påvirker svingninger i RF nedbrydningen af papir ved gentagne udtagninger?

6.1 Hvilke fysiske skader kan forventes og hvilke kan reelt konstateres som følge af kondensdannelse og forandringer i RF ved gentagne udtagninger?

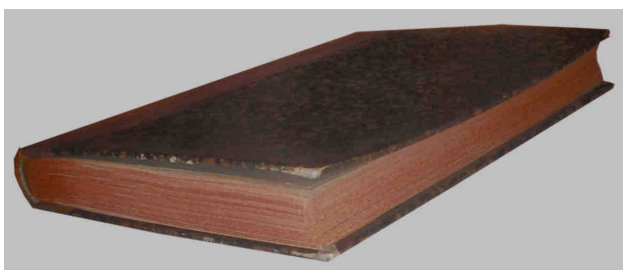
Forandringer i RF kan, som beskrevet under afsnit 2.2.3 Fysisk nedbrydning og afsnit 3.2 Hvorledes påvirker RF nedbrydningen af papir, medføre dimensionsforandringer som følge af papirets optagelse og afgivelse af fugt fra omgivelserne. I forbindelse med dimensionsforandringerne kan der opstå fysiske skader i materialet.

Papirets tilpasning til den omgivende RF vil ske hurtigere langs kanten af papiret end i midten. Papiret vil derfor udvides langs kanten og resultere i kantbølgninger ved flytning til omgivelser med en større RF. Ved flytning til omgivelser med lavere RF vil afgivelsen af fugt langs kanten medføre kantstramninger. Resultatet af forandringer i RF bliver således et uplant papir (Hoel, 1999 s. 127).

Papir har en tydelig fiber retning efter fremstillingen. Ved forandringer i RF ændres dimensionerne forskelligt med og imod fibre retningen. Papirkanter der er parallelle med fiber retningen forandres mindre i dimensionen end papirkanterne imod fiber retningen. Forskellen i dimensionsforandringen medfører en risiko for spændinger ved forandringer i RF. Ved fremstillingen af en bog er det derfor vigtigt at fiber retningen er parallelt med bogryggen. Er fiber retningen ikke parallel med bogryggen vil forandringer i RF medføre spændinger i bogen og en risiko for at bogen vrider sig (Hoel, 1999 s. 127).

Har papiret et farvelag vil forandringer i RF medføre spændinger imellem de to materialer. Farvelaget ændrer ikke dimension ved forandringer i luftfugtigheden og følger dermed ikke papirets dimensionsforandringer. Spændingerne imellem papiret og farvelaget kan resultere i krakelering og tab af farvelaget (Hoel, 1999 s. 126-127).

I sammensatte materialer opstår denne risiko for spændinger imellem materialer der reagerer forskelligt på forandringer i RF. Under forsøget beskrevet i afsnit 5.5 resulterede tilbageflytningen af forsøgsbøgerne til lavtemperaturmagasinet i dimensionsforandringer i perm. Dimensionsforandringerne er vist i Figur 17.



Figur 17 viser dimensionsforandringerne i en perm som følge af tilbageflytning af materiale til lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112. Foto af Signe Smedemark.

Kondensdannelse på papirmateriale medfører en risiko for dannelsen af misfarvende pletter og skjolder på overfladen. Dannelsen af kondens kan også påvirke blækket eller

trykfarven. Jerngallusblæk er en blæktype der er følsom overfor fugt og kan forårsage misfarvning og ætsning af papiret i fugtige omgivelser (Björdal, 1999 s. 146).

6.1.1 Forsøgsbeskrivelse

For at undersøge de fysiske skader, der kan forekomme i forbindelse med udtagning af papirmateriale, udføres et forsøg med udtagning af et papirbind fra køleskab til stuetemperatur. Papirbindet placeres i et køleskab indtil materialet er temperaturakklimatiseret. Herefter udtages materialet til stuetemperatur uden foregående akklimatisering. Udtagningen gentages tre gange og de fysiske skader undersøges visuelt og fotodokumenteres.

6.1.2 Resultat

Resultaterne fra undersøgelsen er vist med før og efter billeder i Bilag 3. Herunder vises et enkelt foto af de fysiske skader efter tre udtagninger.



Figur 18 a viser et papirbind efter tre udtagninger fra køleskab til stuetemperatur. Foto af Signe Smedemark.

6.1.3 Fejlklider

Undersøgelsen tager udgangspunkt i udtagning af en enkelt genstand. For at undersøge de fysiske skader der kan opstå i forbindelse med transporten ind og ud af lavtemperaturmagasiner er det vigtigt at undersøge hvordan forandringer i klimaforholdene påvirker forskellige materialetyper, sammensatte materialer og gentage forsøget med flere genstande.

6.1.4 Diskussion

Udtagningen af et papirbind fra køleskab til stuetemperatur resulterede, som vist i Bilag 3, i en forandring af papirbindets perm. Dimensionsforandringen i permen er tydelig i den ovenstående Figur 18a. Udtagelsen af materialet uden foregående akklimatisering resulterede således i tydelige dimensionsforandringer i materialet.

6.2 Hvilke biologiske skader kan forventes som følge af kondensdannelse og forandringer i RF ved gentagne udtagninger?

I forbindelse med biologisk angreb på papirmateriale er man specielt opmærksom på væksten af skimmelsvampe. Ved under 65 % RF er skimmelsvampenes vækst og formering meget beskeden, men efterhånden som RF stiger forøges væksten (Hoel, 1999 s. 92). Som beskrevet i afsnit 2.2.2 er der risiko for udvikling af skimmelsvampe ved længerevarende perioder med RF over 65 %, mens der ved over 80 % RF, er risiko for udviklingen af skimmelsvampe efter et par dage.

Den biologiske nedbrydning af papirmateriale kan resultere i dannelsen af misfarvende skimmelsvampe og foxing⁵ på materialets overflade (Edebo, 1999 s. 335). Under nedbrydningen udskiller mikroorganismene desuden affaldsprodukter i papiret der kan medføre misfarvende pletter. Ved biologisk nedbrydning udskiller skimmelsvampene

⁵ Foxing er misfarvende rødbrune pletter der opstår i forbindelse med væksten af svampe i papirmaterialet.

enzymer, som beskrevet under afsnit 2.2.2, der nedbryder materialet hvorefter det optages i organismen. Disse enzymer medfører at papiret mister sin fysiske og mekaniske styrke (Szczepanowska, 1986 s. 37).

6.3 Delkonklusion

Svingninger i RF og dannelsen af kondens i forbindelse med udtagning og tilbageflytning af papirmateriale fra lavtemperaturmagasiner kan resultere i fysiske skader i materialet som misfarvende pletter og skjolder, spændinger imellem materialer der reagerer forskelligt på forandringer i luftfugtigheden og dimensionsforandringer. Undersøgelsen af udtagning af et papirbind fra køleskab til stuetemperatur uden foregående akklimatisering viser tydelige dimensionsforandringer.

Den biologiske nedbrydning af papirmateriale kan resultere i dannelsen af misfarvende skimmelsvampe og foxing på materialets overflade og formindskelse af papirets fysiske og mekaniske styrke.

7. Hvilke forholdsregler eller retningslinjer for anvendelsen af lavtemperaturmagasiner i forhold til gentagne udtagninger af biblioteksmateriale kan man opstille for at forebygge skader på papir?

Ved udtagning og tilbageflytning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner udsættes materialet for store forandringer i temperatur og RF. Dette kan, som beskrevet tidligere, medføre risiko for kondensdannelse og skader på materialet. For at forebygge kondensdannelse kan man tage forskellige forholdsregler under transporten af biblioteksmateriale ind og ud af lavtemperaturmagasiner.

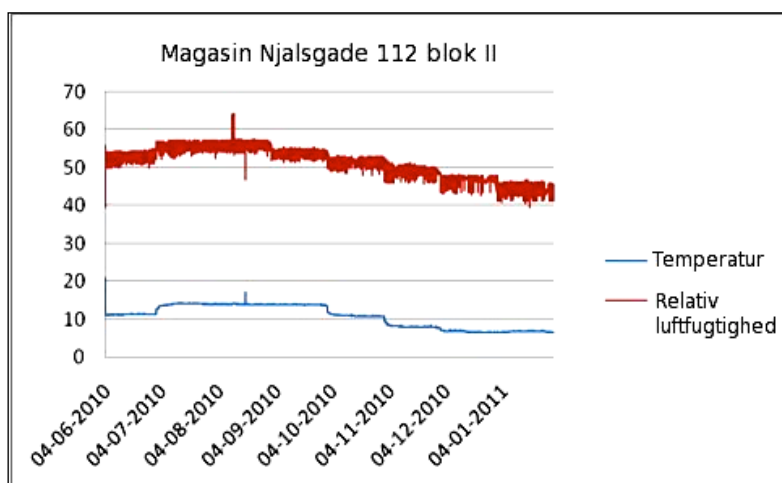
Forholdsreglerne tager udgangspunkt i Det Kongelige Bibliotek i Danmarks magasin på Njalsgade 112, men tilsvarende forholdsregler og overvejelser er gældende for anvendelsen af andre lavtemperaturmagasiner.

7.1 Emballering eller sluserum

For at undgå kondensdannelse på biblioteksmaterialets overflade ved udtagning fra lavtemperaturmagasiner kan materialet enten emballeres i en ugennemtrængelig emballage eller temperaturakklimatiseres i et sluserum (Bevaringsafdelingen, 2005d).

Ved emballering af materialet opbevares emballagen i lavtemperaturmagasinet og har dermed samme temperatur som biblioteksmaterialet. Materialet emballeres inde i magasinet hvor luftens vandindhold er lavt og ved udtagelsen sker kondensdannelsen således på overfladen af emballagen. Efter temperaturakklimatiseringen af materialet fjernes emballagen og en ligevægt imellem vandindholdet i biblioteksmaterialet og omgivelserne indstiller sig.

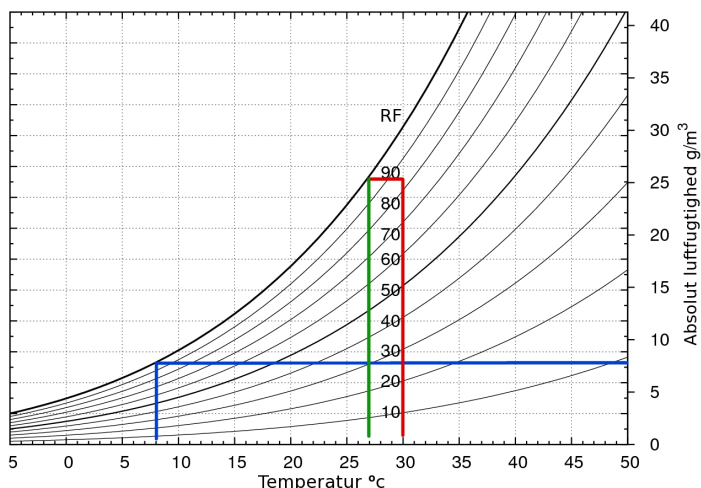
Ved anvendelsen af sluserum udtages biblioteksmaterialet direkte fra magasinet til sluserummet så akklimatiseringen af materialet sker i trin og man undgår kondensdannelse på biblioteksmaterialets overflade.



Figur 19 viser variationer i temperatur og RF magasinet på Njalsgade 112 under perioden fra juni 2010 til januar 2011. Klimaforholdene variere i perioden fra 8 til 14° C og 40 til over 55 % RF. De enkelte udslag i diagrammet kan skyldes ekspedition i magasinet. Datalogmålingerne er udført af Bevaringsafdelingen ved Det Kongelige Bibliotek.

Diagrammet i Figur 19 viser datalogmålinger fra magasinet på Njalsgade 112 i perioden juni 2010 til januar 2011. Klimaforholdene i magasinet varierer under perioden fra 8 til 14° C og 40 til over 55 % RF. Variationen i temperatur og RF i diagrammet stemmer, bortset fra stigningen til over 55 % RF under juli til september, overens med magasinets set point indstillinger i Tabel 1 afsnit 4.3.

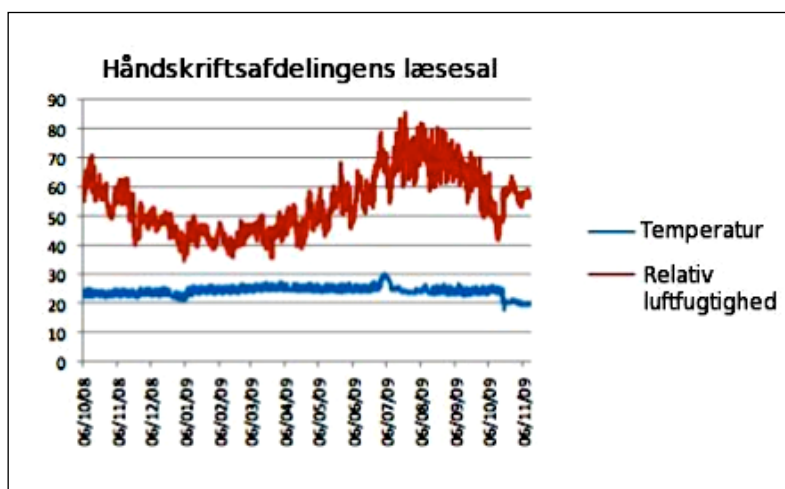
Biblioteksmateriale der udtages fra magasinet på Njalsgade 112 kan ifølge datalogmålingerne i Figur 19 og set point indstillingerne i Tabel 1 afsnit 4.3 være temperaturakklimatiseret helt ned til 8° C. Ved 8° C er luften ifølge dugpunktsskurven i Figur 20 mættet med fugt ved en absolut luftfugtighed på omkring 8 g/m³.



Figur 20 viser en dugpunktsskurve. Udtages biblioteksmateriale fra 8° C vil det være mættet med fugt ved en absolutluftfugtighed på 8 g/m³ (se blå linje). Ved udtagelsen af biblioteksmateriale fra 8° C til omgivelser med 30° C og 85 % RF vil der opstå risiko for kondensdannelse hvis temperaturen omkring materialet sænkes til under 27° C (se rød linje). Tegning af Signe Smedemark med udgangspunkt i et diagram hentet fra <http://www.conservationphysics.org>.

For at bestemme risikoen for kondensdannelse under udtagelsen af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner og direkte til læsesal, undersøges risikoen for kondensdannelse ved udtagelsen af materiale fra magasinet på Njalsgade 112 til håndskriftafdelingens læsesal på Det Kongelige Bibliotek ud fra dugpunktsskurven.

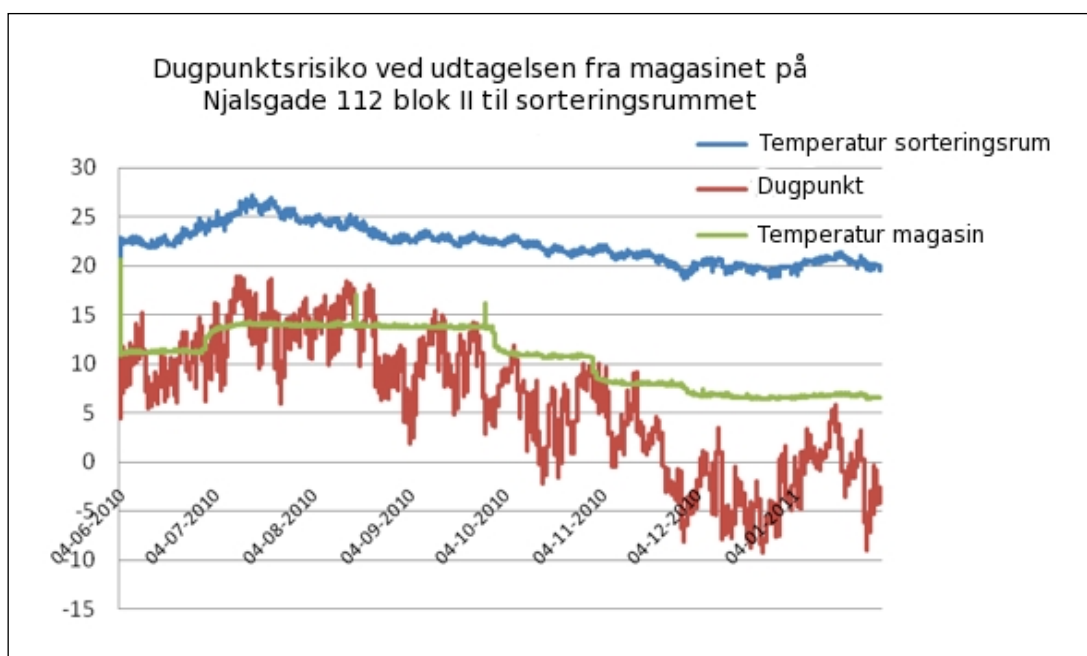
Diagrammet i Figur 21 viser datalogmålinger fra håndskriftafdelingens læsesal på Det Kongelige Bibliotek i perioden fra oktober 2008 til og med oktober 2009. På læsesalen fastholdes under hele året en temperatur over 20° C. Under juli til september er der imidlertid en periode med helt op til 30° C. RF varierer fra perioder med 35 % under januar til april til over 80 % RF fra juli til september.



Figur 21 viser variationer i temperatur og RF på håndskriftafdelingens læsesal på Det Kongelige Bibliotek fra oktober 2008 til og med oktober 2009. Klimaforholdene varierer fra 20 til 30° C og 35 til 85 % RF. Datalogmålingerne er udført af Bevaringsafdelingen ved Det Kongelige Bibliotek.

Materiale der udtages fra magasinet på Njalsgade 112 til håndskriftafdelingens læsesal vil i værste tilfælde udtages til 30° C og 85 % RF. Ved disse klimaforhold er den absolutte luftfugtighed over 25 g/m³ (se Figur 20). Afkøles denne luft til under 27° C vil luften blive mættet med vanddamp og sænkes temperaturen yderligere udskilles vanddampen som kondens (se Figur 20). Afkøles luften under udtagelsen af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasinet til under 27° C vil der dermed være risiko for kondensdannelse på materialets overflade. Ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner til uklimatiserede læsesale, som håndskriftafdelingens læsesal, med temperaturer over 20° C og en varierende RF er der således risiko for kondensdannelse under store dele af året.

For at undgå kondensdannelse ved udtagelsen af biblioteksmateriale fra magasinet på Njalsgade 112 har bevaringsafdelingen i samarbejde med magasinpersonalet besluttet at anvende et sluserum for akklimatiseringen af materialet (Informant 1). Det nedenstående diagram viser datalogmålinger fra magasinet på Njalsgade 112. Diagrammet viser den nuværende risiko for kondensdannelse ved udtagning af biblioteksmateriale fra magasinet til sorteringsrummet.

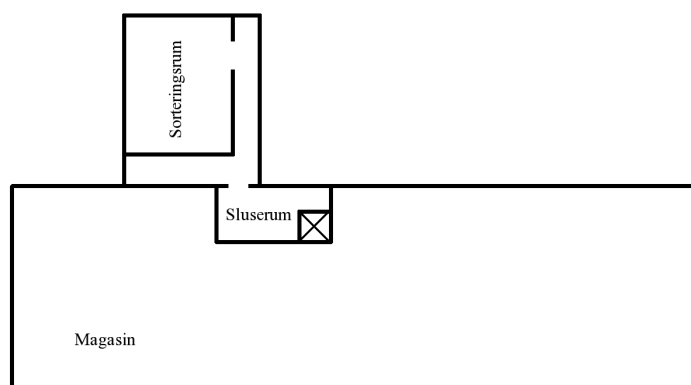


Figur 22 viser i hvilke måneder i perioden fra juni 2010 til januar 2011 der er risiko for kondensdannelse ved udtagning af biblioteksmateriale fra magasinet på Njalsgade 112 til sorteringsrummet. Den grønne kurve angiver temperaturen i magasinet, den blå kurve angiver temperaturen i sorteringsrummet og den røde kurve angiver dugpunktet. I de måneder hvor den røde kurve overstiger den grønne kurve er der risiko for kondensdannelse under udtagning af materialet. Datalogmålingerne er udført af Bevaringsafdelingen ved Det Kongelige Bibliotek.

Datalogmålingerne i diagrammet er foretaget i perioden fra juni 2010 til januar 2011. Diagrammet viser at med sorteringsrummets nuværende temperatur er der risiko for kondensdannelse fra juni til september. Risikoen for kondensdannelse er således størst under de fugtige sommermåneder, men også i oktober og november opstår der enkelte perioder med risiko for kondensdannelse. Diagrammet viser ikke risikoen for kondensdannelse under perioden fra januar til juni. Her er der sandsynligvis også perioder med risiko for kondensdannelse frem mod juni.

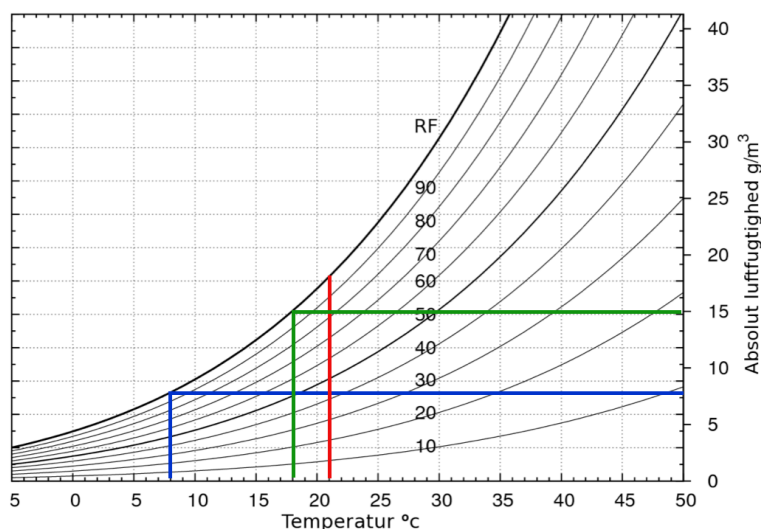
Biblioteksmaterialet udtages fra magasinets forskellige etager og transporteres via en elevator til sluserummet. Materialet temperaturakklimatiseres i sluserummet og transporteres herefter til sorteringsrummet og videre til læsesalene. Sluserummet er

oprindeligt et uanvendt forrum til elevatoren og klimaforholdene i rummet skal derfor tilpasses således at kondensdannelse på materialets overflade undgås.



Figur 23 viser Kongelige Biblioteks lavtemperaturmagasin på Njalsgade 112. Tegning af Signe Smedemark.

Temperaturen i sluserummet indstilles således at akklimatiseringen foregår i trin. I forsøget beskrevet under afsnit 5.3 er temperaturen i magasinet målt til 8° C. Dette stemmer overens med set point indstillingerne i Tabel 1 afsnit 4.3 og datalogmålingerne fra magasinet i Figur 19. I forsøget udtages biblioteksmaterialet til en temperatur på lige under 21° C i sorteringsrummet. Det semipassiv klimasystem i magasinet på Njalsgade 112 følger klimaforholdene udenfor. Under juli og august stiger temperaturen i magasinet til 15° C ifølge set point indstillingerne og 14° C datalogmålingerne fra magasinet i Figur 19. Under samme periode stiger temperaturen tilsvarende i sorteringsrummet (se Figur 22). Ved at indstille klimaforholdene i sluserummet til for eksempel 18° C og 45 % RF og temperaturakklimatisere materialet i sluserummet inden udtagelsen til sorteringsrummet kan dannelsen af kondens på biblioteksmaterialets overflade forebygges (se Figur 24).



Figur 24 viser en dugpunktcurve. Udtagelsen og akklimatiseringen af materialet fra magasinet på Njalsgade 112 til sluserummet og videre til sorteringsrummet er vist i figuren. Den røde linje viser sorteringsrummets temperatur, den blå linje viser den absolutte luftfugtighed ved 8° C og den grønne linje viser den anbefalede temperatur i sluserummet. Tegning af Signe Smedemark med udgangspunkt i et diagram hentet fra <http://www.conservationphysics.org>.

Ved tilbageflytningen af materiale til lavtemperaturmagasiner er der, som beskrevet under afsnit 5.4, en mindre risiko for kondensdannelse. Emballeres materialet under tilbageflytning vil den varme luft i emballagen give anledning til kondensdannelse på materialets overflade inde i emballagen. Biblioteksmateriale må derfor under ingen omstændigheder emballeres under tilbageflytningen til magasinet.

Det anbefales at biblioteksmateriale temperaturakklimatiseres enten i en uigennemtrængelig emballage eller i et sluserum i forbindelse med udtagelsen fra lavtemperaturmagasiner. I tilfældet med udtagelsen af materiale fra magasinet på Njalsgade 112 anbefales det at materialet udtages til sluserummet. Figur 22 viser at der i

enkelte tilfælde er risiko for kondensdannelse i oktober og november og ved anvende sluserummet fra april til november eller under hele året kan risikoen for kondensdannelse formindskes.

For at undgå kondensdannelse under udtagelsen af materiale fra magasinet på Njalsgade 112 anbefales det at klimaforholdene i sluserummet indstilles til 18° C og 45 % RF. Indstilles RF i sluserummet til moderate konstante værdier som 45 % vil det sikre en mindre forandring i RF ved transporten ind og ud af magasinet. RF omkring 45 % tager desuden hensyn til de forskellige sammensatte materialer i magasinet.

7.2 Akklimatiseringstiden

Forsøget beskrevet under afsnit 5.3 viser at temperaturakklimatiseringen af ydersiden af materialet sker hurtigere end midten af materialet. Tre timer efter udtagelsen af biblioteksmateriale fra magasinet på Njalsgade 112 vil materialet være tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til forholdene i sorteringsrummet og der vil hverken være risiko for kondensdannelse på overfladen eller i midten af materialet når det åbnes. Det er imidlertid betydningsfuldt at materialet placeres enkeltvis efter udtagelsen fra lavtemperaturmagasiner for at formindske akklimatiseringstiden.

Det anbefales derfor at materialet ved udtagning fra magasinet på Njalsgade 112 temperaturakklimatiseres i tre timer i sluserummet og at materialet placeres enkeltvis efter udtagelsen fra lavtemperaturmagasiner for at formindske akklimatiseringstiden.

7.3 Forlængede ekspeditionstider

Ved anvendelsen af lavtemperaturmagasiner vil temperaturakklimatiseringen af biblioteksmaterialet under udtagelsen forlænge ekspeditionen. Ifølge Det Kongelige Biblioteks leveringstider for biblioteksmateriale fra magasinerne kan materiale der bestilles inden 7.00 afhentes samme dag efter 14.00 (Bibliotek, 2011a). Denne forlængede ekspeditionstid vil forlænge tidsrummet inden låneren modtager biblioteksmaterialet og dermed føre til et lavere serviceniveau. Ved anvendelsen af lavtemperaturmagasiner er det som tidligere beskrevet betydningsfuldt at materialet temperaturakklimatiseres for at forebygge kondensdannelse og fysiske skader i forbindelse med udtagelsen. Det anbefales derfor at ekspeditionstiden forlænges og fastsættes således at den nødvendige akklimatiseringstid for undgåelse af kondensskader kan overholdes.

7.4 Restriktivt udlån

Ved at begrænse udlånet af biblioteksmateriale der opbevares i lavtemperaturmagasiner kan man forebygge skader som følge af transporten til og fra magasinet. Denne begrænsning i nutidens adgang til samlingerne er imidlertid ofte ikke en aktuell løsning. Biblioteksmaterialet skal udover at bevares for eftertiden også være tilgængelig for udstillinger, uddannelse, forskning og oplysning i nutiden.

7.5 Digitalisering

Digitaliseringen af samlingen vil sikre nutidens adgang til materialet samtidig med at den fysiske genstand opbevares for eftertiden. Dette mindsker den fysiske nedbrydning ved håndtering af materialet og den risiko for kondensdannelse og fysiske skader udtagelsen og tilbageflytningen imellem magasinet og læsesalen kan medføre.

Det anbefales at biblioteksmaterialet digitaliseres for at gøre det tilgængeligt for nutiden samtidig med at skader i forbindelse med håndteringen af materialet og transporten til og fra magasinet mindskes. Dette kan kombineres med at begrænse adgangen og mulighed for udlån af den fysiske genstand.

7.6 Temperaturgradient og mikroklima

Luften er i stand til at indeholde en mindre vandmængde ved lave temperaturer. I forbindelse med anvendelsen af lavtemperaturmagasiner er kontrollen af RF i magasinet derfor vigtig. I magasiner med manglende luftcirkulation kan der opstå en temperaturgradient eller områder med mikroklima i magasinet. Forekomsten af en temperaturgradient eller mikroklima kan give anledning til udviklingen af skimmelsvampe.

Det anbefales at RF kontrolleres i magasinet og at der er en tilstrækkelig luftcirkulation i magasinet for at undgå områder med RF der kan give anledning til udviklingen af skimmelsvampe.

7.7 Anbefalinger til forholdsregler mod kondensdannelse

De følgende anbefalinger tager udgangspunkt i mine undersøgelser på Det Kongelige Biblioteks magasin på Njalsgade 112, men tilsvarende forholdsregler og overvejelser er gældende for anvendelsen af andre lavtemperaturmagasiner.

1. *Materialet opbevares i lavtemperaturmagasiner* ved relativ luftfugtighedsværdier omkring 45 %. Det tager hensyn til de forskellige sammensatte materiale i magasinet og sikre en mindre forandring i RF ved transporten ind og ud af magasinet. Lave temperaturer ned til 2° C der udnytter vinterperiodens lave temperaturer, men døgnvariationer må ikke overstige 1° C.
2. *Materialet skal ved udtagning emballeres i en uigennemtrængelig emballage* inde i magasinet hvor luftens vandindhold er lavt. Ved udtagelsen sker kondensdannelsen på overfladen af emballagen. Efter temperaturakklimatiseringen af materialet fjernes emballagen og en ligevægt imellem vandindholdet i biblioteksmaterialet og omgivelserne indstiller sig.
3. *Der anvendes et sluserum for trinvis akklimatisering* af materialet ved udtagning. Datalogmålinger i sorteringsrummet udført af Bevaringsafdelingen ved Det Kongelige Bibliotek viser at der er risiko for dannelse af kondens under sommermånederne. Derfor er det nødvendigt med et sluserum imellem magasin og sorteringsrum, hvor materialet temperaturakklimatiseres i trin og herefter transporteres til sorteringsrum og videre til læsesalene. Ved opstilling af apparatur til måling af dugpunktetsrisiko, kan udtagningen tilpasses, så kondensdannelse undgås.
4. *Biblioteksmateriale må under ingen omstændigheder emballeres under tilbageflytningen* til magasinet, idet der så vil der være risiko for en stigning i materialets fugtindhold og for udviklingen af skimmelsvampe.
5. *Ved tilbageflytning akklimatiseres materialet i sluserum.* Der er en risiko for at RF stiger på ydersiden og i materialet, men at stigningen i RF ikke er tilstrækkelig til at kunne måles på den afstand hvor dataloggeren måler.
6. *En enkelt bog skal temperaturakklimatiseres i tre timer* for at undgå kondensdannelse såvel på overfladen som indeni.

7. *Bøger placeres enkeltvis i sluserummet.* Bøger, der ligger i en stak kræver væsentlig længere akklimatiseringstid.
8. *Bibliotekets ekspeditionstid forlænges* og fastsættes således at den nødvendige akklimatiseringstid for undgåelse af kondensskader kan overholdes.
9. *Udlån af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner begrænses.*
10. *Biblioteksmaterialet digitaliseres* for at udvide offentlighedens adgang til materialet og for at begrænse skaderne i forbindelse med fysisk udlån af genstandene.
11. *Der opsættes måleudstyr til kontrol af luftfugtighed og udstyr til at sikre luftcirkulation* til imødegåelse af fugtigt mikroklima og skimmeldannelse.

8. Diskussion og perspektivering

For at sikre den fortsatte bevaring af den litterære kulturarv i Det Kongelige Biblioteks samlinger er det vigtigt at samlingerne opbevares under hensigtsmæssige forhold. Mine anbefalinger ovenfor til forebyggelse af kondensdannelse ved opbevaring og udlån af genstande er baseret på tilgængelig viden i litteraturen og på egne undersøgelser. Ved at anvende en opdateret fysisk-kemisk-biologisk forskningsviden om materialets forgængelighed kan det bevares som genstande, og den information materialet indeholder, kan overdrages eftertiden. Den fysisk-kemisk-biologiske viden indenfor konserveringsarbejdet bør derfor styrkes igennem forskning.

For at sikre bevaringen af biblioteksmateriale er det imidlertid vigtigt at vælge en bæredygtig bevaringsstrategi. Etableringen af lavtemperaturmagasiner er en bevaringsmæssig fordel, men det er forbundet med store udgifter til energiforbrug. Bevaringsstrategien må hvile på en syntese af delvis modstridende hensyn: kulturelle hensyn, økologiske hensyn og økonomiske hensyn. Disse overvejelser opstilles herunder.

At kontrollere temperaturen og RF i magasinerne er energikrævende og dermed forbundet med store omkostninger. Energianvendelsen til klimastyring i magasinerne bør være CO₂-neutral og miljøskånsom. De økonomiske omkostninger bør være rimelige i forhold til samfundsøkonomien.

Ved etableringen af de nye lavtemperaturmagasiner på Njalsgade 112 valgte man et semipassivt klimasystem, der udnytter de lave temperaturer under vinterperioden og derved mindsker udgifterne til energi (Vest, 2008 s. 812-813). Flere andre er begyndt at anvende passive klimastyrede magasiner for at sænke energiudgifterne.

Bevaringsopgaven bør sikres kulturel bæredygtighed gennem legitimitet i befolkningen ved at sørge for åben og lige adgang til oplysningerne i de bevarede genstande. Den opgave sikres bedst ved digitalisering. Kort efter årtusindeskiftet overhalede verdens digitale lagerkapacitet den analoge. I 2007 var 94 % af alt information gemt i digitale medier. Analog information er information der ikke er digitaliseret som eksempelvis papirarkiver, museer, bøger, mikrofilm og bånd. Hvis man lægger den analoge og den digitale lagerkapacitet sammen, kan man lagre mindst 295 exabyte information, hvor en exabyte er det samme som en milliard gigabytes (Nordahl, 2011).

En af Det Kongelige Bibliotek i Danmarks visioner er at digitalisere og udbygge den digitale infrastruktur (Bibliotek, 2011b). Digitaliseringen af biblioteksmaterialets information gør materialet mere tilgængeligt. Visionen bør være at udbygge den digitale infrastruktur for dansk og international forskning og for uddannelse og folkeoplysning, og samtidig bevare de fysiske genstande til særlige formål som forskning og udstilling. Digitalisering af materialet vil revolutionere offentlighedens adgang til det. Det må være en vigtig demokratisk målsætning og det vil samtidig gøre en bæredygtig opbevaringsstrategi for de fysiske genstande lettere at gennemføre. Den kemiske, fysiske og biologiske nedbrydning af den nationale kulturarv kan begrænses.

9. Konklusion

I forbindelse med bevaringen af biblioteksmateriale er et kendskab til nedbrydningen og de faktorer der internt i materialet og eksternt i omgivelserne påvirker nedbrydningen betydningsfuldt. Jeg har indsamlet relevant viden fra fysik, kemi, mikrobiologi, biokemi og museale forhold og sammenholdt de faktorer, der internt og eksternt påvirker nedbrydningen af papir. Med udgangspunkt i Det Kongelige Bibliotek i Danmarks ny lavtemperaturmagasin på Njalsgade 112 er klimaforandringerne i bøger, herunder specielt risikoen for kondensdannelse under udtagning og tilbageflytning fra lavtemperaturmagasiner, blevet undersøgt. Formålet var at svare på problemformuleringen: *"Hvorledes kan dannelsen af kondens ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner til læsesal, og de skader på papir som kondensdannelsen medfører, forebygges?"*

Indholdet af plantefibre og andelen af de forskellige polymerer cellulose, hemicellulose og lignin giver papiret dets egenskaber og har betydning for papirets nedbrydning, ligesom celluloses polymeriseringsgrad og antallet af reducerende endegrupper. Det færdige papirprodukts egenskaber og holdbarhed afhænger imidlertid også af tilsætningsstoffer tilsat under fremstillingen af papirmassen og af metoden anvendt til bearbejdning af fibrene i papirmassen.

Litteraturstudiet viste desuden at eksterne faktorer som temperatur og RF har en afgørende betydning nedbrydningen af papir. Den kemiske nedbrydning af cellulose fordobles for hver 5° C stigning i temperatur. Tilsvarende fordobles celluloses levetid ved et fald i temperatur på 5° C. Den biologiske nedbrydning afhænger ligeledes af temperaturen. Enzymernes aktivitet stiger eksponentielt med temperaturen og en sænkning af temperaturen i magasinet vil dermed medføre en formindskelse af den biologiske nedbrydning og en forlængelse af papirets levetid.

Mikroorganismer er tilstede overalt i luften og kan under fordelagtige vækstbetingelser nedbryde papirmateriale. De fleste mikroorganismer kræver mere end 90 % RF for at kunne vokse, men enkelte skimmelsvampe kan vokse ved helt ned til 65 % RF. Ved at halvere RF i omgivelserne kan man mere end fordoble papirets levetid og fastholdes RF under 65 % kan man formindske risikoen for biologisk nedbrydning. En sænkning af RF i magasinet vil således medføre en forlængelse af papirets levetid. En vis mængde vand i materialet og dermed en vis luftfugtighed i omgivelserne er imidlertid fordelagtig da det øger materialets fleksibilitet og mindsker risikoen for fysiske skader under håndteringen af materialet.

Bevaringsmæssigt er det således en fordel at anvende lavtemperaturmagasiner og ved at tillade temperaturen at variere med klimaforholdene udenfor og herved udnytte vinterens lave temperaturer kan man spare energi. Ved at tilpasse temperaturen og fastholde moderate konstante RF kan man sikre hensigtsmæssige opbevaringsforhold i magasinerne og forlænge biblioteksmaterialets levetid.

I forbindelse udtagning og tilbageflytning fra lavtemperaturmagasiner udsættes biblioteksmaterialet imidlertid for store forandringer i temperatur og RF. Ved forandringer i RF vil papir henholdsvis optage og afgive fugt fra omgivelserne og efterhånden som

vandmolekylerne optages imellem cellulosepolymererne udvides papiret og dette kan resultere fysisk nedbrydning af materialet, kondensdannelse og skader som misfarvende pletter og skjolder, spændinger imellem materialer der reagerer forskelligt på forandringer i luftfugtigheden og dimensionsforandringer.

Ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner er der risiko for kondensdannelse. Min undersøgelse af klimaforandringerne i bøger viser en stigning i RF på ydersiden af materialet under udtagning. Under sommermånederne vil forøgelsen af temperatur og fugtindhold i sorteringsrummet medføre en større stigning i RF under udtagning og risiko for kondensdannelse.

Datalogmålingerne viser desuden at ydersiden af materialet akklimatiseres hurtigere end midten og at tidsrummet for temperaturakklimatisering yderligere forlænges når materialet er placeret i en stak af bøger. Det er således betydningsfuldt at materiale placeres enkeltvis efter udtagning fra lavtemperaturmagasiner for at formindske akklimatiseringstiden.

Efter tre timer er biblioteksmateriale der udtages fra lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret til klimaforholdene i sorteringsrummet og der vil hverken være risiko for kondensdannelse på overfladen eller i midten af materialet, når det åbnes.

Ved tilbageflytning af biblioteksmateriale er der under sommermånederne med forøgelsen af temperatur og fugtindhold i sorteringsrummet en mindre risiko for kondensdannelse. Min undersøgelse af klimaforandringerne i bøger under tilbageflytning til magasinet på Njalsgade 112 viser et fald i RF. Reduktionen i RF under tilbageflytning af materiale til lavtemperaturmagasiner viser at der er ingen målelig risiko for opfugtning af materialet.

Datalogmålingerne under tilbageflytning viser ligeledes at ydersiden af materialet akklimatiseres hurtigere end midten og at tidsrummet for temperaturakklimatisering yderligere forlænges når materiale er placeret i en stak af bøger.

En fejlkilde ved forsøgene er måleusikkerheden ved anvendelsen af dataloggere, manglende kalibrering af dataloggerne og frem for alt at dataloggerne måler en temperatur og RF gradient omkring materialet og ikke klimaforholdene præcis ved ydersiden.

I magasiner med manglende luftcirkulation kan der opstå temperaturgradienter eller områder med mikroklima. Målinger tre steder i lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 viser ingen påviselig temperatur- og fugtighedsgradient.

Den tværfaglige viden fra litteraturstudiet sammenholdes med resultaterne fra forsøgene med klimaforandringer i bøger til en vurdering af problemerne. Herudfra er de nedenstående forholdsregler for udtagelsen og tilbageflytningen af biblioteksmateriale til og fra lavtemperaturmagasiner til forebyggelse af kondensdannelse i papirgenstande blevet opstillet:

1. *Materialet opbevares i lavtemperaturmagasiner* ved relativ luftfugtighedsværdier omkring 45 %. Det tager hensyn til de forskellige sammensatte materiale i magasinet og sikre en mindre forandring i RF ved transporten ind og ud af magasinet. Lave temperaturer ned til 2° C der udnytter vinterperiodens lave temperaturer, men døgnvariationer må ikke overstige 1° C.
2. *Materialet skal ved udtagning emballeres i en uigennemtrængelig emballage* inde i magasinet hvor luftens vandindhold er lavt. Ved udtagelsen sker kondensdannelsen

- på overfladen af emballagen. Efter temperaturakklimatiseringen af materialet fjernes emballagen og en ligevægt imellem vandindholdet i biblioteksmaterialet og omgivelserne indstiller sig.
3. *Der anvendes et sluserum for trinvis akklimatisering* af materialet ved udtagning. Datalogmålinger i sorteringsrummet udført af Bevaringsafdelingen ved Det Kongelige Bibliotek viser at der er risiko for dannelse af kondens under sommermånederne. Derfor er det nødvendigt med et sluserum imellem magasin og sorteringsrum, hvor materialet temperaturakklimatiseres i trin og herefter transporteres til sorteringsrum og videre til læsesalene. Ved opstilling af apparatur til måling af dugpunktetsrisiko, kan udtagningen tilpasses, så kondensdannelse undgås.
 4. *Biblioteksmateriale må under ingen omstændigheder emballeres under tilbageflytningen* til magasinet, idet der så vil der være risiko for en stigning i materialets fugtindhold og for udviklingen af skimmelsvampe.
 5. *Ved tilbageflytning akklimatiseres materialet i sluserum.* Der er en risiko for at RF stiger på ydersiden og i materialet, men at stigningen i RF ikke er tilstrækkelig til at kunne måles på den afstand hvor dataloggeren måler.
 6. *En enkelt bog skal temperaturakklimatiseres i tre timer* for at undgå kondensdannelse såvel på overfladen som indeni.
 7. *Bøger placeres enkeltvis i sluserummet.* Bøger, der ligger i en stak kræver væsentlig længere akklimatiseringstid.
 8. *Bibliotekets ekspeditionstid forlænges* og fastsættes således at den nødvendige akklimatiseringstid for undgåelse af kondensskader kan overholdes.
 9. *Udlån af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner begrænses.*
 10. *Biblioteksmaterialet digitaliseres* for at udvide offentlighedens adgang til materialet og for at begrænse skaderne i forbindelse med fysisk udlån af genstandene.
 11. *Der opsættes måleudstyr til kontrol af luftfugtighed og udstyr til at sikre luftcirkulation* til imødegåelse af fugtigt mikroklima og skimmeldannelse.

Anbefalingerne tager udgangspunkt i mine undersøgelser på Det Kongelige Biblioteks magasin på Njalsgade 112, men tilsvarende forholdsregler er gældende for anvendelsen af andre lavtemperaturmagasiner. Ved opbevaring af læder og pergament kan der være særlige forholdsregler at tage, som jeg ikke har taget hensyn til her.

10. Resume

I forbindelse med bevaringen af biblioteksmateriale er et kendskab til de faktorer der internt i materialet og eksternt i omgivelserne påvirker nedbrydningen betydningsfuldt. Igennem et tværfagligt litteraturstudie har jeg indsamlet relevant viden fra fysik, kemi, mikrobiologi, biokemi og museale forhold for at sammenholde de faktorer der påvirker nedbrydningen. Med udgangspunkt i Det Kongelige Bibliotek i Danmarks nye lavtemperaturmagasin på Njalsgade 112 har jeg desuden undersøgt klimaforandringerne i bøger, herunder specielt risikoen for kondensdannelse, under udtagning og tilbageflytning fra magasinet. Formålet var at svare på problemformuleringen: *”Hvorledes kan dannelsen af kondens ved udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner til læsesal, og de skader på papir som kondensdannelsen medfører, forebygges?”*.

Litteraturstudiet viste en sammenhæng imellem temperatur, RF og nedbrydningen af papir. Den kemiske nedbrydning af cellulose fordobles for hver 5° C stigning i temperaturen. Tilsvarende fordobles celluloses levetid ved et fald i temperaturen på 5° C. Den biologiske nedbrydning afhænger ligeledes af temperaturen. Enzymernes aktivitet stiger eksponentielt med temperaturen og en sænkning af temperaturen i magasinet vil dermed medføre en formindskelse af den biologiske nedbrydning og en forlængelse af papirets levetid.

Ved at halvere RF i omgivelserne kan man mere end fordoble papirets levetid og fastholdes RF under 65 % kan man formindske risikoen for biologisk nedbrydning. En sænkning af RF i magasinet vil medføre en forlængelse af papirets levetid. En vis mængde vand i materialet og dermed en vis luftfugtighed i omgivelserne er imidlertid fordelagtig da det øger materialets fleksibilitet og mindsker risikoen for fysiske skader under håndteringen af materialet.

Ved at tilpasse temperaturen og fastholde moderate konstante RF kan man sikre hensigtsmæssige opbevaringsforhold i magasinerne og forlænge biblioteksmaterialets levetid. I forbindelse med anvendelsen af materialet medfører udtagning og tilbageflytning fra lavtemperaturmagasiner imidlertid at materialet udsættes for store forandringer i temperatur og RF. Dette medfører en risiko for kondensdannelse og fysiske skader i materialet.

Datalogmålingerne fra forsøgene med udtagning af forsøgsbøger fra lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 til sorteringsrummet viser at materialets afkøling af den omgivende luft under udtagelsen medfører en stigning i RF. Under sommermånederne vil forøgelsen af temperaturen og fugtindholdet i sorteringsrummet medføre en større stigning i RF under udtagelsen og dermed risiko for kondensdannelse.

Datalogmålingerne fra forsøgene med tilbageflytning af forsøgsbøger fra sorteringsrummet til lavtemperaturmagasinet viser at materialets opvarmning af den omgivende luft medfører et fald i RF og der er dermed mindre risiko for kondensdannelse. Efter det kortvarige fald stiger RF igen til klimaforholdene i magasinet. Under tilbageflytning af materiale sker der således en reduktion af RF og der er dermed igen målelig risiko for opfugtning af materialet. En fejkilde er her at dataloggerne måler klimaforholdene i luften omkring materialet.

Datalogmålingerne viser desuden at materialet efter udtagning er tilnærmelsesvis temperaturakklimatiseret efter tre timer og at der herefter hverken er risiko for kondensdannelse på overfladen eller i midten af materialet. Det er imidlertid betydningsfuldt at biblioteksmaterialet placeres enkeltvis efter udtagning fra lavtemperaturmagasiner for at formindske akklimatiseringstiden.

De fysiske skader der kan forekomme i forbindelse med udtagning og tilbageflytning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner undersøges ved at flytte et papirbind fra kolde omgivelser til varmere. Undersøgelsen viser en dimensionsforandring af permen.

I magasiner med manglende luftcirkulation kan der opstå temperaturgradienter eller områder med mikroklima. Målinger tre steder i lavtemperaturmagasinet på Njalsgade 112 viser ingen påviselig temperatur- og fugtighedsgradient.

Den tværfaglige viden fra litteraturstudiet er sammenholdt med resultaterne fra forsøgene med klimaforandringer i bøger til en vurdering af problemerne. Herudfra er anbefalinger til forholdsregler for udtagning og tilbageflytning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner blevet opstillet.

Det anbefales at papirmateriale opbevares i lavtemperaturmagasiner ved temperaturer ned til 2° C og omkring 45 % RF. Det anbefales desuden at biblioteksmateriale temperaturakklimatiseres i en uigennemtrængelig emballage eller i et sluserum ved udtagning af materialet. Biblioteksmateriale må under ingen omstændigheder emballeres under tilbageflytning til lavtemperaturmagasiner.

En enkelt bog temperaturakklimatiseres i tre timer for at undgå kondensdannelse såvel på overfladen som indeni og at biblioteksmaterialet placeres enkeltvis i sluserummet for at formindske akklimatiseringstiden.

Det anbefales at bibliotekets ekspeditionstid forlænges og fastsættes således at den nødvendige akklimatiseringstid for undgåelse af kondensskader kan overholdes. Det anbefales at biblioteksmaterialet digitaliseres for at udvide offentlighedens adgang til materialet og for at begrænse skaderne i forbindelse med fysisk udlån af genstandene.

Der skal desuden opsættes måleudstyr til kontrol af luftfugtighed og udstyr til at sikre luftcirkulation til imødegåelse af fugtigt mikroklima og skimmeldannelse.

Anbefalingerne tager udgangspunkt i mine undersøgelser på Det Kongelige Biblioteks magasin på Njalsgade 112, men tilsvarende forholdsregler er gældende for anvendelsen af andre lavtemperaturmagasiner. Ved opbevaring af læder og pergament kan der være særlige forholdsregler at tage, som jeg ikke har taget hensyn til her.

Litteraturfortegnelse

Utrykte kilder

Informant 1: Tine Rauff, papirkonservator. Bevaringsafdelingen på Det Kongelige Bibliotek i København, Danmark.

Trykte kilder

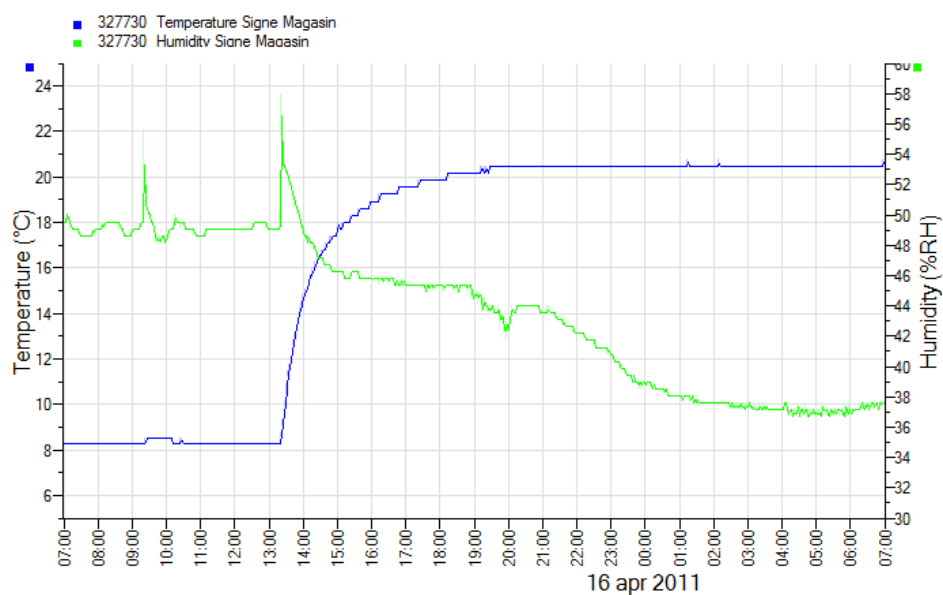
- BANIK, G. B., IRENE 2004. Paper and water : a guide for conservators. *Hand Papermaking*, 19, s. 19 - 22.
- BANIK, G. B., IRENE 2010. Principles of water absorption and desorption in cellulosic materials. *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*, 31, s. 164 - 177.
- BERG, J. M., STRYER, L. & TYMOCZKO, J. L. 2007. *Biochemistry*, New York, Freeman.
- BEVARINGSADFDELINGEN 2005a. Ekspedition af materialer fra kolde hhv. kølige magasiner til læsesal. *J.nr. 04-832-11*. København: Det Kongelige Bibliotek.
- BEVARINGSADFDELINGEN 2005b. Forsøg med klimaforandringer i bøger. *J.nr. 04-832-11*. København: Det Kongelige Bibliotek.
- BEVARINGSADFDELINGEN 2005c. Kondensrisiko ved etableringen af lavtempererede magasiner. *J.nr. 04-832-11*. København: Det Kongelige Bibliotek.
- BEVARINGSADFDELINGEN 2005d. Kondensrisiko ved materialeflytninger. *J.nr. 04-832-11*. København: Det Kongelige Bibliotek.
- BIBLIOTEK, D. K. 2011a. *Leveringstider* [Online]. Available: <http://www.kb.dk/da/kub/publikum/serviceydelser/udlaansinformation/leveringstid.html> [Accessed 01.05 2011].
- BIBLIOTEK, D. K. 2011b. *Mission og vission* [Online]. Available: <http://www.kb.dk/da/kb/formaal/> [Accessed 01.05 2011].
- BJÖRDAL, L. 1999. Pappersdokument. I: FJÆSTAD, M. (red.) *Tidens tand - Förebyggande konservering*. Stockholm: Riksantikvarieämbetet.
- BOGAARD, J. & WHITMORE, P. M. 2002. Explorations of the role of humidity fluctuations in the deterioration of paper. *Works of art on paper, books, documents and photographs : techniques and conservation*. Baltimore, USA.
- CAMPBELL, N. A. 2006. *Biology : concepts & connections*, San Francisco, Calif., Pearson/Benjamin Cummings.
- EDEBO, M. E. 1999. Mikroorganismer. I: FJÆSTAD, M. (red.) *Tidens tand - Förebyggande konservering*. Stockholm: Riksantikvarieämbetet.
- ERHARDT, D. 1989. Relationship of Reaction Rates to Temperature. *Abbey Newsletter*, 13, s. 38 - 39.
- ERHARDT, D. Temperature and relative humidity effects on aging of cellulose. Preservation research and development: round table proceedings, 1992. s. 31 - 34.
- ERHARDT, D., MECKLENBURG, M. F., TUMOSA, C. S. & MCCORMICK-GOODHART, M. 1995. *The Determination of Allowable RF Fluctuations* [Online]. Available: <http://cool.conservation-us.org/waac/wn/wn17/wn17-1/wn17-108.html> [Accessed 15.02 2011].

- FELLERS, C. & RIKSARKIVET 1988. *Åldring/nedbrytning av papper : en litteraturöversikt*, Stockholm, Riksarkivet.
- HANSEN, B. V. 2009. Cold storage as an alternative to mass deacidification. *Incredible industry - preserving the evidence of industrial society*. København.
- HOEL, I. A. L. 1999. *Bevaring af dokumenter : det teoretiske grundlag*, Helsingfors, NORDINFO.
- HOLMBERG, J. 1999. Påverkan av miljöfaktorer utifrån. I: FJÆSTAD, M. (red.) *Tidens tand - Förebyggande konservering*. Stockholm: Riksantikvarieämbetet.
- IMAGE PERMANENCE INSTITUTET, I. 2007. *Image Permanence Institute. Preservation Index* [Online]. Rochester Institute of Technology (RIT). Available: <https://www.imagepermanenceinstitute.org/resources/calculators> [Accessed 01.05.2011].
- ISO. 2003. *International standard ISO 11799. Information and documentation - Document storage requirements for archive and library materials* [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38536 [Accessed 02.02 2011].
- JOHANSSON, A. 2000. *Air pollution and paper deterioration : causes and remedies*, Göteborg, Sverige.
- LINDSTRÖM, T. 2008. The influence of raw materials on the permanence of paper. *IPH Yearbook Congress book*, 17, s. 75 - 81.
- LUND, J. 1997. *Den store danske encyklopædi. Bd 8, Græsning-hoste*, København, Danmarks Nationalleksikon.
- LUND, J. 1999. *Den store danske encyklopædi. Bd 15, Panama-ranum*, København, Danmarks Nationalleksikon.
- MARGUTTI, S., CONIO, G., CALVINI, P. & PEDEMONTI, E. 2001. Hydrolytic and oxidative degradation of paper. *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*, 22, s. 67 - 83.
- MICHALSKI, S. 2002. Double the life for each five-degree drop, more than double the life for each halving of relative humidity. *13th Triennial Meeting Rio de Janeiro. ICOM Committee for Conservation*. Rio de Janeiro, Brasilien.
- NORDAHL, M. 2011. *Vi gemmer og gemmer - menneskeheden kan nu lagre 295 exabyte data* [Online]. Available: <http://videnskab.dk/teknologi/vi-gemmer-og-gemmer-menneskeheden-kan-nu-lagre-295-exabyte-data> [Accessed 23.03 2011].
- PADFIELD, T. 2006. The interaction of water vapour with paper. *Kursusmateriale til kandidatkusur på Konservatorskolen efteråret 2009*, s. 1 - 17.
- PADFIELD, T. 2009. *Fundamental microclimate concepts* [Online]. Available: <http://www.conservaionphysics.org/intro/fundamentals.php> [Accessed 03.02.2011].
- RAKOTONIRAINY, M. S., HERAUD, C. & LAVEDRINE, B. 2003. Influence of pH and alkaline reserve of paper on the growth of some filamentous fungi. *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*, 24, s. 152 - 159.
- RICHTER, J. & JØRGENSEN, G. 1995. *Biologisk nedbrydning i museer og arkiver*, København, Konservatorskolen, Det Kongelige Danske Kunstakademi.
- RYHL-SVENDSEN, M., AASBJERG JENSEN, LARS, KLENZ LARSEN, POUL OG PADFIELD, TIM. 2006. *Does a standard temperature need to be constant?* [Online]. Available: www.conservaionphysics.org/standards/standardtemperature_mrs.pdf [Accessed 01.05 2011].

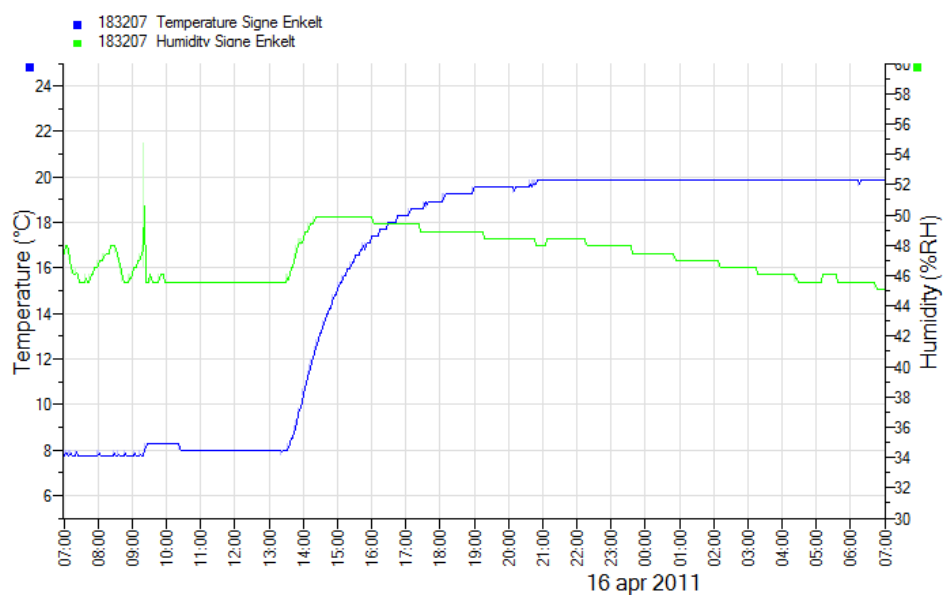
- SHAHANI, C. J. & HARRISON, G. 2002. Spontaneous formation of acids in the natural aging of paper. *Works of art on paper, books, documents and photographs : techniques and conservation*. Baltimore, USA.
- STRLIC, M. & KOLAR, J. 2004. *Ageing and stabilisation of paper*, Ljubljana, University library.
- SZCZEPANOWSKA, H. 1986. Biodeterioration of art objects on paper. *The paper conservator: journal of the Institute of Paper Conservation* 10, s. 31 - 39.
- THOMSON, G. & INTERNATIONAL INSTITUTE FOR CONSERVATION OF HISTORIC AND ARTISTIC WORKS 1986. *The museum environment*, London, Butterworth-Heinemann in association with the International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.
- TÍMÁR-BALÁZSY, Á. & EASTOP, D. 1998. *Chemical principles of textile conservation*, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- TORP, K. C. 2007. *Biokemibogen : liv, funktion, molekyle*, Århus, Nucleus.
- VEST, M. 2008. New long-term storage facilities at the Royal Library, Denmark: storage requirements for mixed collections. *15th Triennial Conference, ICOM Committee for Conservation*. New Delhi, Indien.

Bilag 1. Resultat fra forsøg med udtagning af bøger

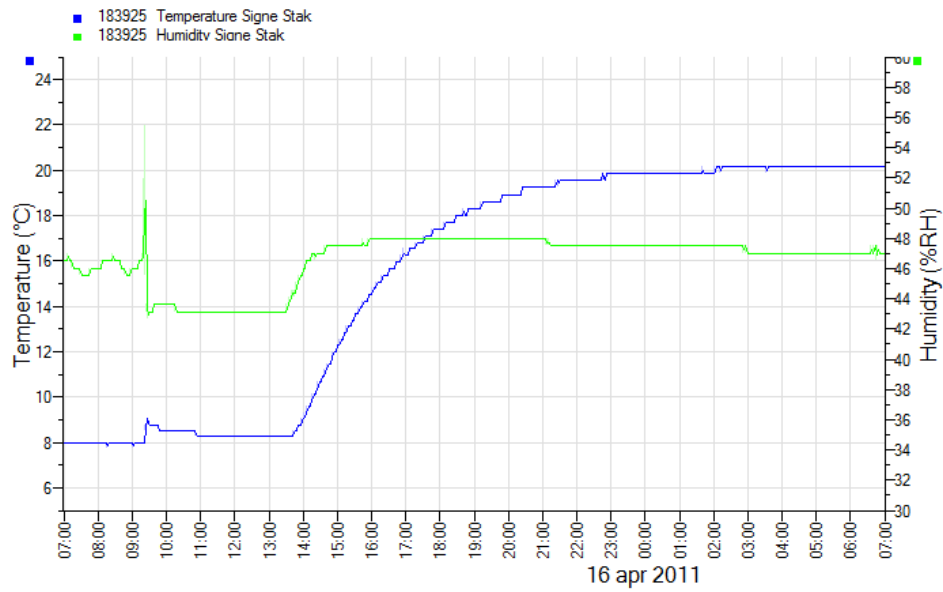
Et udsnit af diagrammerne fra de to delforsøg med udtagning af biblioteksmateriale fra lavtemperaturmagasiner, beskrevet under afsnit 5.3, er vist herunder i henholdsvis figur 11b, 12b og 13b.



Figur 11 b viser et udsnit af diagrammet i figur 11 a. Diagrammet viser temperatur og RF på ydersiden af bog_{data logger1} under udtagning fra magasinet til sorteringsrummet. Datamålinger udført af Signe Smedemark.



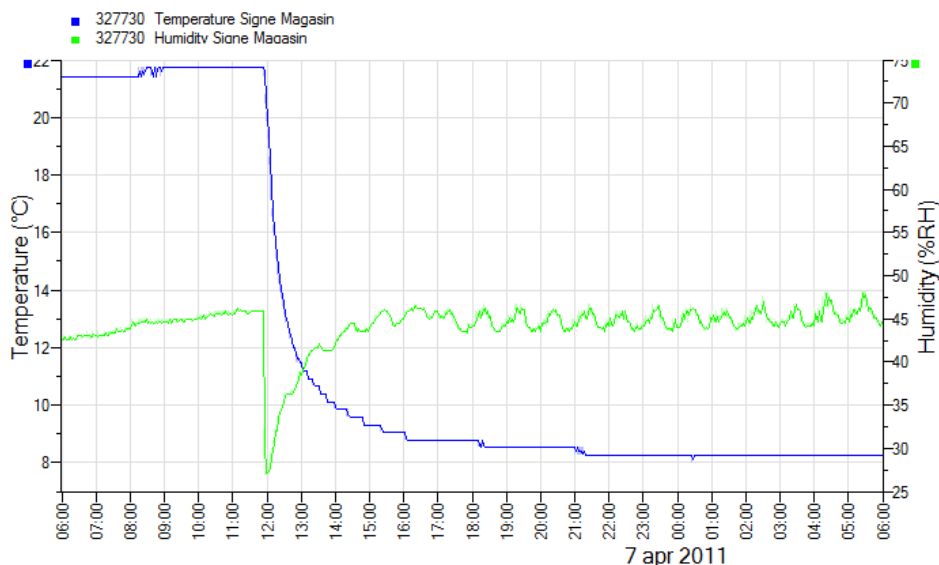
Figur 12 b viser et udsnit af diagrammet i figur 12 a. Diagrammet viser temperatur og RF inde i bog_{datalogger1} under udtagning fra magasinet til sorteringsrummet. Datamålinger udført af Signe Smedemark.



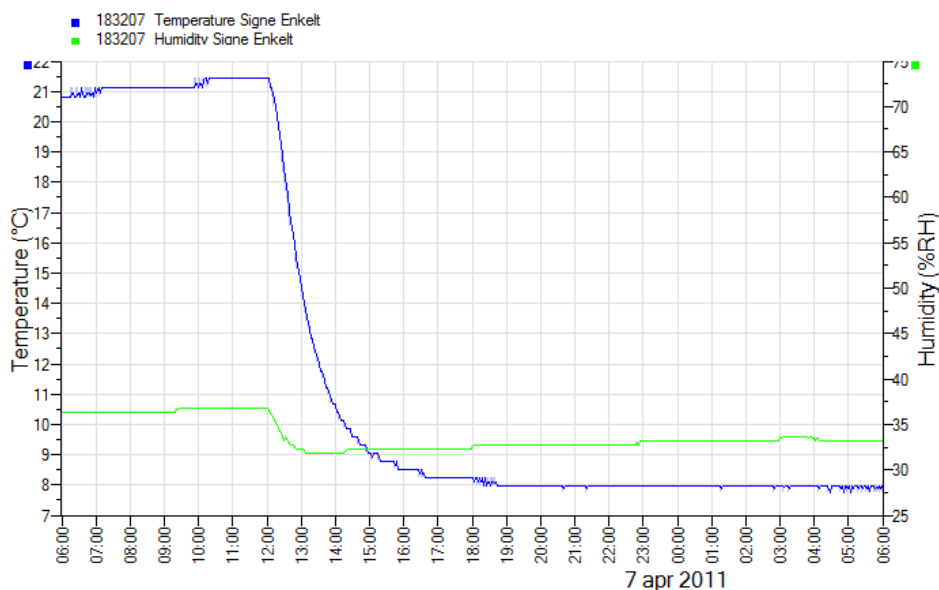
Figur 13 b viser et udsnit af diagrammet i figur 13 a. Diagrammet viser temperatur og RF inde i bog_{datalogger2} placeret i en stak af bøger under udtagning fra magasinet til sorteringsrummet. Datamålinger udført af Signe Smedemark.

Bilag 2. Resultat fra forsøg med tilbageflytning af bøger

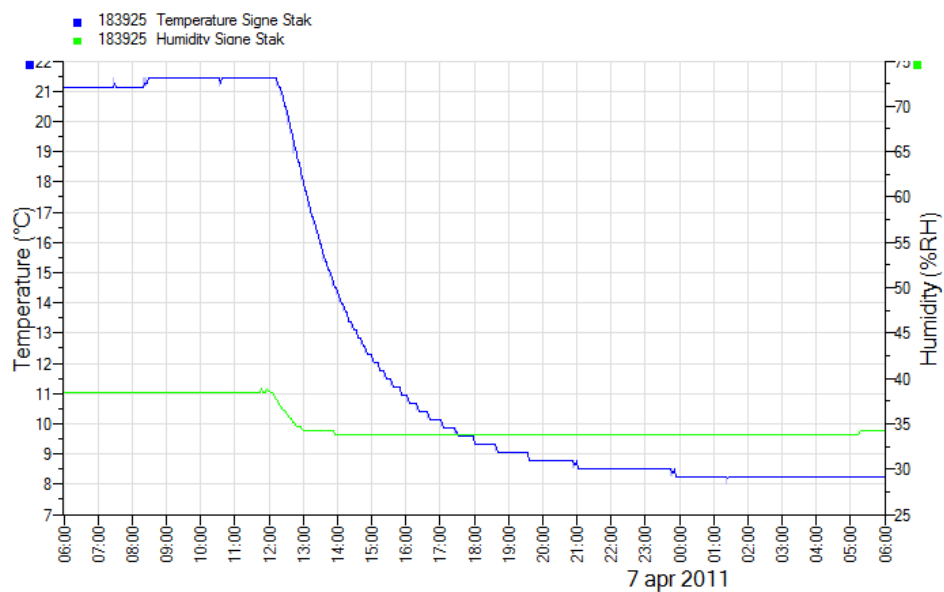
Et udsnit af diagrammerne fra de to delforsøg med tilbageflytning af biblioteksmateriale til lavtemperaturmagasiner, beskrevet under afsnit 5.5, er vist herunder i henholdsvis figur 13b, 14b og 15b.



Figur 13 b viser et udsnit af diagrammet i figur 13 a. Diagrammet viser temperatur og RF på ydersiden af bog_{data logger1} under tilbageflytning fra sorteringsrummet til magasinet. Datamålinger udført af Signe Smedemark.



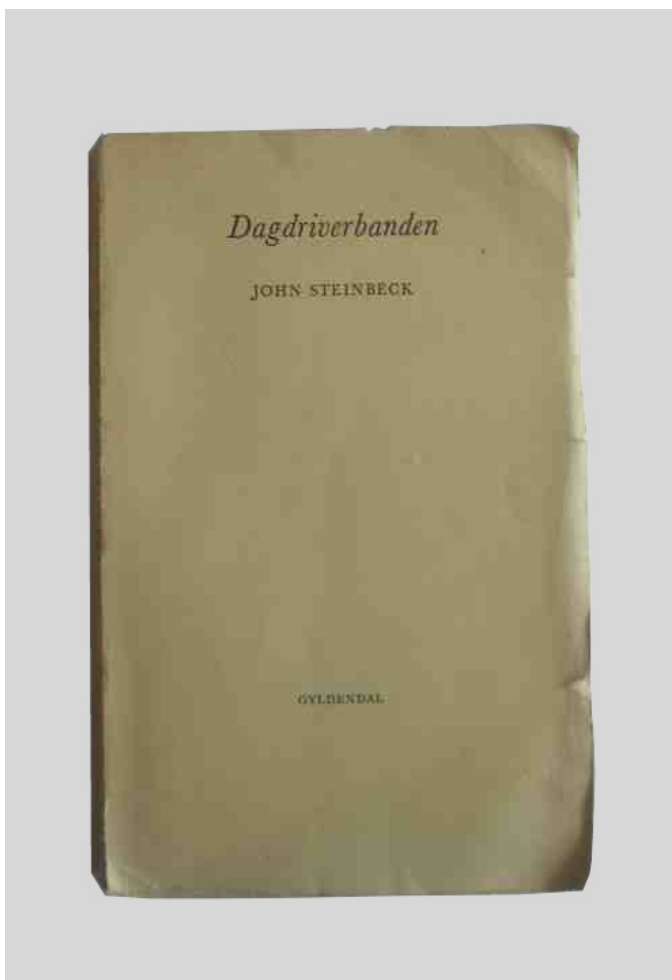
Figur 14 b viser et udsnit af diagrammet i figur 14 a. Diagrammet viser temperatur og RF inde i bog_{data logger1} under tilbageflytning fra sorteringsrummet til magasinet. Datamålinger udført af Signe Smedemark.



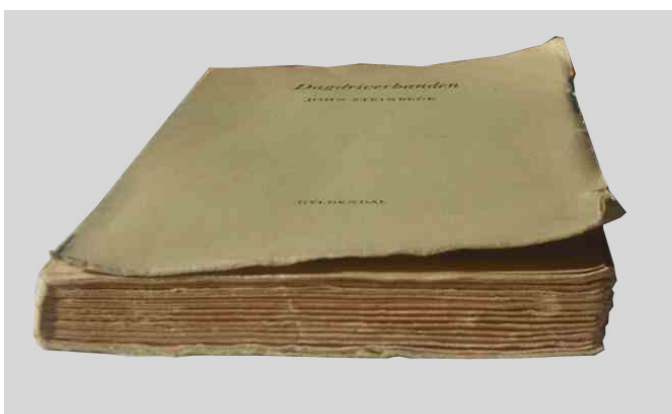
Figur 15 b viser et udsnit af diagrammet i figur 15 a. Diagrammet viser temperatur og RF inde i bog_{data logger2} placeret i en stak af bøger under tilbageflytning fra sorteringsrummet til magasinet. Datamålinger udført af Signe Smedemark.

Bilag 3. Resultat fra forsøg med gentagne udtagninger

Figur 18b – 18e viser før og efter billederne fra forsøget beskrevet under afsnit 6.1.1 med gentagne udtagelser af et papirbind fra køleskab til stuetemperatur.



Figur 18 b viser papirbindet anvendt under forsøget beskrevet i afsnit 6.1.1 inden udtagning fra køleskab til stuetemperatur. Foto Signe Smedemark.



Figur 18 c viser papirbindet anvendt under forsøget beskrevet i afsnit 6.1.1 efter en udtagning fra køleskab til stuetemperatur. Foto Signe Smedemark.



Figur 18 d viser papirbindet anvendt under forsøget beskrevet i afsnit 6.1.1 efter anden udtagning fra køleskab til stuetemperatur. Foto Signe Smedemark.



Figur 18 e viser papirbindet anvendt under forsøget beskrevet i afsnit 6.1.1 efter tre udtagninger fra køleskab til stuetemperatur. Foto Signe Smedemark.