

# Måling og modellering av vanntransportegenskaper til svelleband til høyspenningskabler

Ingrid Orvedal

Fysikk

Oppgaven levert: Desember 2011

Hovedveileder: Jon Andreas Støvneng, IFY

Biveileder(e): Torbjørn Andersen Ve, SINTEF Energi AS  
Sverre Hvidsten, SINTEF Energi AS



## Forord

Dette arbeidet er den avsluttende oppgaven for faget TFY 3900, ved Institutt for fysikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet(NTNU), høsten 2011. Arbeidet ble utført ved SINTEF Energi AS.

Eg ønsker å takke veilederne mine, Torbjørn A. Ve og Sverre Hvidsten ved SINTEF Energi for all hjelp og rettleiding underveis. Eg ønsker òg å rette en takk til Gunnar Håkonseth for all hjelp på laboratoriet og gode innspill ellers.

Til slutt ønsker eg å takke ansvarlig veileder på Institutt for fysikk, Jon Andreas Stovneng for all praktisk tilrettelegging underveis.

---

Trondheim, 5. desember 2011



## Sammendrag

Vanntrevekst er en av de viktigste grunnene til elektrisk havari i høyspenningskabler. Vanntreer begynner å vokse når den relative fukten (RH) i kabelisolasjonen overstiger 70 %RH. Det er derfor viktig å holde en lav fuktighet i kabelisolasjonen så lenge som mulig. Svelleband har som funksjon å hindre aksiell vanninntrenging, men bruk av svelleband senker òg den radielle økningen av fukt i kabelisolasjonen. Transport av vann i kabelisolasjonen og svellebandet blir styrt av transportegenskapene til materialene.

Det ble brukt to polymermaterialer i denne oppgaven; En termoplastisk polyuretan som blir brukt som kappemateriale og et isolerende svelleband. Polyuretan har blitt karakterisert tidligere, mens karakteriseringen av svellebandet har vært ufullstendig.

Svellebandet ble derfor karakterisert ved hjelp av et tilpasset måleoppsett. Beregnet diffusjonskoeffisienten viste en sterk ulinearitet ved 30-40 %RH, som ikke er blitt beskrevet tidligere, mens løseligheten er i overensstemmelse med tidligere resultat.

Svellebandet ble delt i to og svellepulverpartiklene ble studert med mikroskop. Det ble tatt bilde av svellepulverpartiklene ved økende relativ fukt og projisert areal ble målt. Den målte økningen i målt volum viste ikke en overensstemmelse med den beregnede endringen i diffusjonskoeffisienten. Metoden som er brukt i mikroskoperingen har store kilder til usikkerhet, som kan minimeres ved å se på svellepulver i løs form.

En numerisk modell for fuktinntrenging i kabelsystemet ble verifisert ved hjelp av en forenklet eksperimentell modell av det lagdelte isolasjonssystemet i høyspenningskabler. Ved hjelp av en spesialkonstruert testcelle kan en se om den numeriske modellen stemmer overens med faktisk målte data.

Løselighet og diffusjonskoeffisientene til svellebandet ble lagt til i den numerisk modellen og simuleringen ble sammenliknet med målte fuktopptaksdata. Modellen viser god overensstemmelse med målte data for fuktigheter under ca 37 %RH, før den numeriske modellen viser lavere fukt enn målingene. Forskjellen mellom målte data og numeriske beregninger er aldri større enn 8 %RH.

Numeriske beregninger gjort med data fra måleoppsett for karakterisering av transportegenskaper til kabelmaterialer stemmer godt overens med målte data for det samme systemet. Dette indikerer en god karakterisering av konsentrasjonsavhengig fuktopptak i polymeriske kabelmaterialer.

## Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teoretisk bakgrunn</b>	<b>3</b>
2.1	Innledning . . . . .	3
2.2	Polymerer . . . . .	3
2.3	Superabsorberende polymerer . . . . .	4
2.4	Absorpsjon og desorpsjon . . . . .	5
2.5	Diffusjon i polymerer . . . . .	6
2.6	Permeabilitet . . . . .	7
2.7	Diffusjon inn i en film senket i vann . . . . .	7
2.8	Temperaturavhengighet til transportkoeffisientene . . . . .	9
2.9	Effekt av fyllmaterialer . . . . .	10
2.10	Effekt av konsentrasjon . . . . .	10
2.11	Avvik fra Fickisk diffusjon . . . . .	11
2.12	Transportkoeffisienter for vann i luft . . . . .	12
2.13	Relativ fukt . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Eksperimentelt arbeid</b>	<b>14</b>
3.1	Innledning . . . . .	14
3.2	Materialer . . . . .	14
3.3	Testcelle for verifisering . . . . .	15
3.3.1	Støping av film på prøveholderen . . . . .	16
3.4	Måleoppsett . . . . .	17
3.4.1	Karakterisering av svelleband . . . . .	17
3.4.2	Testcellen for verifiseringsmålinger . . . . .	19
3.4.3	Mikroskop i klimaskap . . . . .	20
3.5	Måleprosedyrer . . . . .	21
3.5.1	Karakterisering av svelleband . . . . .	21
3.5.2	Fuktopptaksmålinger med testcellen . . . . .	23
3.5.3	Mikroskopering . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Numeriske beregninger</b>	<b>25</b>
4.1	Innledning . . . . .	25
4.2	Numerisk modell . . . . .	25
4.3	Geometrisk modell brukt i simuleringene . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Sensitivitetsanalyse av numerisk modell</b>	<b>27</b>
5.1	Innledning . . . . .	27
5.2	Elementtetthet for modell med polymerfilm . . . . .	28

5.3	Elementtetthet for modell med polymerfilm og svulleband . . .	29
5.4	Plassering av svulleband . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>31</b>
6.1	Karakterisering av svulleband . . . . .	31
6.1.1	Løselighet . . . . .	31
6.1.2	Diffusjonskoeffisienter . . . . .	31
6.2	Fuktopptaksmålinger og numeriske beregninger . . . . .	34
6.3	Mikroskopering . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>39</b>
7.1	Innledning . . . . .	39
7.2	Sensitivitetsanalyse for numerisk modell . . . . .	39
7.2.1	Elementtetthet for polymerfilm og luft . . . . .	39
7.2.2	Elementtetthet for svulleband . . . . .	40
7.2.3	Plassering av svulleband i numerisk modell . . . . .	41
7.3	Karakterisering av svulleband . . . . .	43
7.3.1	Løselighetskoeffisient . . . . .	43
7.3.2	Diffusjonskoeffisient . . . . .	45
7.4	Fuktopptaksmålinger og numeriske beregninger . . . . .	46
7.4.1	Fuktopptaksmålinger . . . . .	46
7.4.2	Numeriske beregninger . . . . .	47
7.4.3	Sammenligning av fuktopptak og numeriske beregninger . . . . .	48
7.5	Mikroskopering . . . . .	50
7.6	Kilder til usikkerhet . . . . .	51
7.6.1	Mikrometervekten . . . . .	51
7.6.2	Fuktighet og temperatur . . . . .	52
7.6.3	Måling av tykkelse av polymerfilm til numeriske beregninger . . . . .	52
7.6.4	Beregning av transportkoeffisienter . . . . .	53
7.6.5	Usikkerhet ved mikroskopering . . . . .	54
7.7	Oppsummering av resultat . . . . .	55
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>57</b>
	<b>Symbolliste</b>	<b>59</b>
	<b>Referanser</b>	<b>59</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>62</b>
<b>A</b>	<b>Støpedeler</b>	<b>62</b>

<b>B</b>	<b>Endelig elementmetoden</b>	<b>63</b>
B.1	Modellering i endelig elementmetoden . . . . .	64
B.1.1	Optimalisering av elementene . . . . .	64
B.1.2	Bruk av symmetri . . . . .	64
B.1.3	Elementkvalitet . . . . .	64
<b>C</b>	<b>Absorpsjon og desorpsjonskurver</b>	<b>65</b>
<b>D</b>	<b>Svellingens påvirkning av diffusjonskoeffisienten</b>	<b>67</b>
<b>E</b>	<b>Måleresultat fra fuktopptaksforsøk</b>	<b>70</b>
<b>F</b>	<b>Geometrisk modell for numeriske beregninger</b>	<b>75</b>
F.1	Geometrisk modell for forsøk 1 og 5 . . . . .	75
F.2	Geometrisk modell for forsøk 2 og 8 . . . . .	76
F.3	Geometrisk modell for forsøk 3 og 11 . . . . .	77
F.4	Geometrisk modell for forsøk 4 . . . . .	78
F.5	Geometrisk modell for forsøk 6 og 7 . . . . .	79
F.6	Geometrisk modell for forsøk 9 . . . . .	80
F.7	Geometrisk modell for forsøk 10 . . . . .	81
<b>G</b>	<b>Potensiell målefeil i fuktsensorene</b>	<b>82</b>
<b>H</b>	<b>Metningskonsentrasjon</b>	<b>83</b>
H.0.1	Metningskonsentrasjon . . . . .	83

## Figurer

1	Bilde av vanntre . . . . .	1
2	Typisk design for PEX-kabel . . . . .	1
3	Bilde av kabel der de forskjellige lagene er vist . . . . .	2
4	Svelleband . . . . .	4
5	Metningskonsentrasjon med konstant diffusjonskoeffisient . . . . .	9
6	Løselighet som funksjon av temperatur . . . . .	12
7	Sammenskrudd testcelle med sensor og vakuumentil . . . . .	15
8	Tverrsnitt av testcellen under forsøk med svelleband . . . . .	15
9	Prøveholder med påstøpt polymerfilm . . . . .	16
10	Stegvis endring i relativ fukt og illustrasjon av masseøkningen . . . . .	17
11	Oppsett for karakteriseringsmålinger . . . . .	18
12	Svellebandprøver tredd på metallnål for karakterisering . . . . .	19



13	Presisjonsvekt . . . . .	20
14	Kontrollenhet for mikroskop . . . . .	21
15	Oppsett av mikroskop i klimaskapet . . . . .	21
16	Tidslinje for karakteriseringsmålinger . . . . .	22
17	Tidslinje for fuktopptaksmålinger . . . . .	23
18	Tverrsnitt av testcellen, sett fra siden . . . . .	27
19	Modell uten svelleband . . . . .	28
20	Modell for forsøk med tre svelleband . . . . .	28
21	Modell med få elementer per areal/ grov mesh . . . . .	29
22	Modell med mange elementer per areal/ fin mesh . . . . .	29
23	Svelleband plassert på metallstifter . . . . .	30
24	Løselighet som funksjon av vanndamptrykk . . . . .	31
25	Eksempel på absorpsjonskurve . . . . .	32
26	Diffusjonskoeffisienter som funksjon av vanndamptrykk . . . . .	33
27	Sammenlikning av forsøk 2 og 4 . . . . .	34
28	Målte resultat og simuleringer for forsøk 1 . . . . .	35
29	Målte resultat og simuleringer for forsøk 2 . . . . .	35
30	Målte resultat og simuleringer for forsøk 3 . . . . .	36
31	Svelleband ved 10,0 %RH . . . . .	37
32	Svelleband ved 30,1 %RH . . . . .	37
33	Svelleband ved 50,0 %RH . . . . .	37
34	Svelleband ved 80,0 %RH . . . . .	37
35	Prosentvis arealendring i forhold til vanndamptrykk . . . . .	38
36	Sensitivitetsanalyse for polymerfilm . . . . .	39
37	Sensitivitetsanalyse av svelleband . . . . .	40
38	Forskjellig elementtetthet for luft. . . . .	41
39	Analyse for plassering av svelleband . . . . .	42
40	Fuktopptakskurver og simulering med gamle og nye transport- koeffisienter . . . . .	49
41	Illustrasjon av avdrifta . . . . .	51

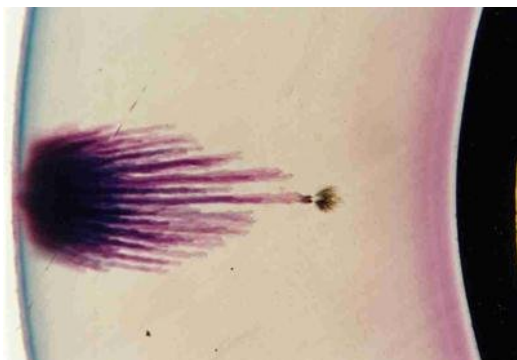
## Tabeller

1	Prøvematerialer . . . . .	14
2	Koeffisienter til bruk i numerisk modell . . . . .	26
3	Koeffisienter for andregradstilpasset løselighet . . . . .	32
4	Diffusjonskoeffisienter som funksjon av partielt vanndamptrykk . . . . .	33
5	Nødvendig elementtetthet for subdomenene . . . . .	43
6	Oversikt over fuktopptaksmålingene . . . . .	46
7	Initialbetingelser for fuktopptaksmålinger . . . . .	47

8	Koeffisienter for numeriske beregninger . . . . .	47
9	Tykkelse til svellebandet . . . . .	68
10	Initialbetingelser for fuktopptaksmålinger . . . . .	70
11	Koeffisienter tilpassing til metningskonsentrasjon . . . . .	83



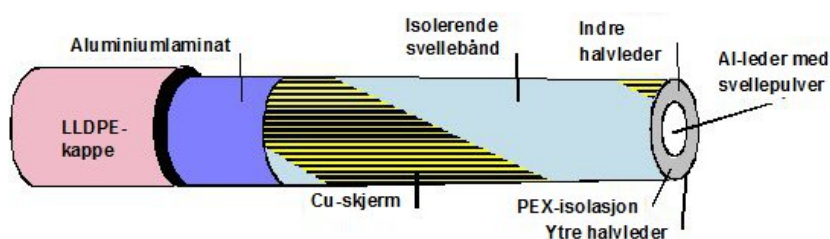
# 1 Innledning



Figur 1: Bilde av vanntre i kabelisolasjonen. Bildet er trykt med tillatelse fra rettighetshaver[1]

Dannelse og vekst av vanntre er den viktigste grunnen til feil i mellomspennings distribusjons PEX-kabler (12 og 24 kV). Vanntre begynner å vokse når den relative fukten(RH) i kabelisolasjonen er større enn 70 %[2]. Det kan ta fra 5 til over 30 år før elektrisk havari skjer på grunn av dannelse av vanntre. Figur 1 viser et vanntre med begynnende vekst av elektrisk tre. For landkabler er både såkalt våt og tørr konstruksjon kommersielt tilgjengelig. En våt kabelkonstruksjon er attraktivt på grunn av lav pris og enkel installasjon. En typisk våt design kabel er vist i figur 2.

Kabelen blir også lettere, mer fleksibel og mindre sårbar for mekaniske påkjenninger under installasjon og drift, enn tradisjonelle kabler med metallkappe ytterst.

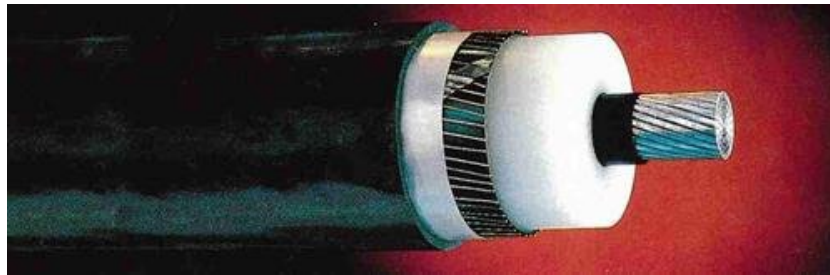


Figur 2: Typisk design for PEX-kabel. Bildet er trykt med tillatelse fra rettighetshaver[1]

En vanlig våt-design kabel består av en indre leder omgitt av elektrisk isolasjon, isolasjonsskjerm, jording og ytre kappe. Alle kablene har svellepulver mellom kordellene i lederen og et lag med svelleband mellom isolasjonen og den ytre kappen. Figur 3 viser de forskjellige lagene i kabelen.

Svellebandet består av en polymertekstil og et papirlag som innkapsler et lag med svellepulver. Svellerpulveret er en superabsorberende polymer som kan ta opp mange ganger sin egen vekt i vann. I våte omgivelse vil svellerpulveret ta opp fukt og utvide seg på grunn av vannmolekyler som blir bundet til polymerstrukturen. Bruk av svelleband i høyspenningskabler vil dermed forsinke opptaket av vann i kabelisolasjonen og forlenge levetiden til kablelen. Svellerbandet har tidligere vist seg vanskelig å karakterisere på grunn av en komplisert indre geometri og transportkoeffisienter som er avhengig av konsentrasjonen.

Hovedformålet med denne oppgaven er å etablere en ny metode for karakterisering svellerband, og å verifisere en forbedret numerisk modell for vanninntrenging i høyspenningskabler. Ved å beskrive målt absorpsjon, desorpsjon og gjennomtrenging av vann i svellerbandet ut fra en matematisk modell, vil en kunne for eksempel forutsi hvor lang tid det vil ta før fukten i kabelisolasjonen når kritisk verdi på 70 %RH.



Figur 3: Bilde av kabel der de forskjellige lagene er vist. Bildet er trykt med tillatelse fra rettighetshaver[1]

## 2 Teoretisk bakgrunn

### 2.1 Innledning

Vanntrær begynner å vokse når den relative fukten i isolasjonen når 70% RH[3]. For kabler uten en beskyttende metall-kappe ytterst, såkalt wet-design, har en et vannblokkeringsystem bestående av svelleband og/eller pulver. Svellepulveret ligger mellom kordellene i selve lederen, mens svellebandet blir lagt rundt den ytre skjermingen.

Hovedgrunnen for å bruke et slikt system er å unngå vanninntrengning i lengderetningen under montering og etter kabelfeil. Systemet har òg en effekt på vanninntrengning i den radielle retningen. Svellebandet vil ta opp fukt fra isolasjonen og dermed senke fuktinnholdet i isolasjonen og forsinke vekst av vanntrær[4].

### 2.2 Polymerer

En polymer er et stort molekyl som er bygd opp av en rekke mindre enkle kjemiske enheter. De mindre kjemiske enhetene, monomerer, kan lage lengre polymerkjeder som har få bindinger til hverandre. En polymer kan bestå av en eller flere forskjellige typer monomer i en polymerkjede[5]

Lengden til en polymerkjede er karakterisert av antall repetisjonsenheter, og blir kalt polymeriseringsgraden. Molekylvekten til en polymer er produktet av massen til en repetisjonsenhet og polymeriseringsgraden, og varierer fra 20 000 til flere 100 000[5].

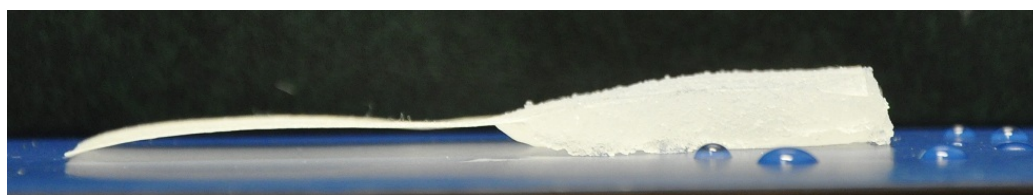
Fritt volum er en indre egenskap ved en polymer og er rom mellom de sammenfletta molekykjedene. Siden rommet er på atom-størrelse er det ikke mulig å direkte observere fritt volum. Volumet er avhengig av vibrasjons- og rotasjonsbevegelser i polymerkjedene rundt, og på grunn av dette kan fritt-volum porer åpne og lukke seg, i likhet med kanaler mellom porene. Diffusjon og sorpsjon av molekyler gjennom en polymer vil i stor grad være avhengig av tilgjengelig fritt volum i polymeren[6].

Vann i polymerer kan ha tre karakteristiske former

1. Oppløst vann, der vannmolekylene er fordelt mellom polymerkjedene. Vannmolekylene vekselvirker ikke med andre vannmolekyler eller polymermolekylene, og kan reknes som en gass.
2. Bundet vann som er svakt bundet til omkringliggende monomerer. I praksis vil bindingene være dipolbindinger forårsaket av dipolmomentet til vannmolekylene og monomerene.
3. Som flytende vann innesluttet i polymeren.

### 2.3 Superabsorberende polymerer

Superabsorberende polymerer kan absorbere opptil tusen ganger sin egen vekt med vann, og opptil hundre ganger sin egen vekt med tynn saltløsning. Superabsorbatorer tar opp vann gjennom diffusjonsmekanismer, der vannmolekylene vil bevege seg inn i polymeren for å senke det kjemiske potensialet[7]. Figur 4 viser hvordan et svelleband kan svulle når det utsettes for vann i væskeform.



Figur 4: Svelleband som er tørt til venstre og fuktet med vann til høyre

Den kjemiske sammensetningen til en polymer vil ha en sterk påvirkning på løselighet- og diffusjonsegenskapene til små molekyler. Dersom polymeren har polare grupper, vil de ha en sterk tiltrekning på polare molekyler som vann[6].

Diffusjonsprosessen til en polymer er avhengig av tilgjengelig fritt volum i polymeren. Endring i totalt volum er hovedsaklig på grunn av vannmolekyler som binder seg til polymerstrukturen. Absorbert vann viser ikke betydelig vekselvirkning med polymerstrukturen eller andre vannmolekyler. Vannet blir i det frie volumet og bidrar ikke til hygroskopisk svelling[8].

Polymerkjedene har en bestemt plass og orientering i rommet som avhenger av omgivelsene og de termiske bevegelsene i polymeren. Molekylene i polymerkjedene har en konstant bevegelse omkring en gjennomsnittlig posisjon på grunn av termisk energi. Når vann trenger inn i polymeren, blir denne posisjonen endret på grunn av utstrekkingen av monomeren, som en konsekvens av volumøkningen[7].

Når vann beveger seg inn i en partikkel av superabsorberende polymer må nettverket av polymerkjeder utvide seg for å gi rom til det ekstra volumet av vannmolekylene. For å øke volumet må polymernettet bevege seg i motsatt retning av vannet. Siden monomerene i polymeren er mye større enn molekylene til vann, beveger monomerene seg saktere.

Monomerene er også bundet til andre monomerer gjennom kryssbindinger, slik at polymeren ikke løser seg opp i vannet. For å bevege seg i en bestemt retning må monomerene i polymeren bevege seg samtidig, og krever med tid enn en monomer eller del av en monomer, som beveger seg alene[7].

## 2.4 Absorpsjon og desorpsjon

For at en gass skal kunne diffundere gjennom et polymerisk materiale, må det først bli absorbert i materialet. Dette skjer ved at gassen kondenserer på overflaten til polymeren. Konsentrasjonen til den diffunderende substansen i polymeren, er relatert til trykket ved Henrys lov[9]

$$C = Sp \quad (1)$$

der  $S$  er løselighetskoeffisienten og  $p$  er partialtrykket. Løseligheten avhenger av egenskapene til polymeren og den diffunderende substansen. For sorpsjon av enkle gasser i polymerer under moderate trykk er diffusjonsprosessene Fickiske og avvikene fra Henrys lov er neglisjerbare. I det mest generelle tilfellet er  $S$  en funksjon av temperaturen, trykket og konsentrasjonen[10].

Metningskonsentrasjonen er definert som den maksimale mengden av en substans en polymer kan løse, uavhengig av tiden, ved en gitt temperatur. Ut fra Henrys lov (1), kan dette skrives som

$$C_s = Sp_s \quad (2)$$

der  $p_s$  er det partielle metningstrykket til substansen[11].

Dersom konsentrasjonen av vann utenfor polymeren er lavere enn det som trengs for å opprettholde likevekt, vil noe av vannet desorbere av polymeren slik at en igjen når likevekt. Dersom polymerstrukturen har blitt endret av inndiffunderte vannmolekyler, vil ikke nødvendigvis desorpsjonsprosessen være motsatt av absorpsjonsprosessen. Det absorberte vannet kan bli bundet til polare grupper i polymeren og vannmolekylene vil derfor trenge høyere energi for å bryte bindingene til polymeren og desorbere. En kan, men ikke nødvendigvis, i slike tilfeller se en hysteresse mellom absorpsjon- og desorpsjonsforløpet.

Mengden vannmolekyl som befinner seg løst i polymerstrukturen er bestemt av termodynamikken til polymer-vann systemet og den gjensidige påvirkningen mellom polymeren og vannmolekyla. Det finnes fem forskjellige sorpsjonsmoder som beskriver de gjeldene påvirkningen som blir kort gjennomgått her.

Henrys sorpsjon eller type I sorpsjon er den enkleste typen sorpsjon. Sammenhengen mellom konsentrasjonen til det diffunderende materialet og vannedamptrykket er lineær og følger Henrys lov. Den diffunderende substansen vil fordele seg tilfeldig i polymeren slik at hverken penetrant-polymer eller penetrant-penetrant-par blir dannet[10].

Langmuir sorpsjon eller type II sorpsjon tilsvarer en predominans av penetrant-polymer vekselvirkninger. De diffunderende molekylene opptar forskjellige steder i polymeren som mikrobobler eller uorganiske fyllmaterialer med stort areal[10].



Tomodesorpsjon er en kombinasjon av type I og type II sorpsjon og forutsetter at det er to forskjellige diffunderende substanser. Denne modellen er gyldig for moderate trykk og uten sterke vekselvirkninger. Modellen kan ikke benyttes når diffusanten forårsaker svelling eller plastisering av polymeren[10].

I Flory-Huggins mode er velselvirkningene mellom de diffunderende molekylene er sterkere enn penetrant-polymer vekselvirkningene, og løselighetskoeffisienten øker med økende trykk. To fysiske tolkninger av dette er mulig: 1) plastisering av polymeren på grunn av de diffunderende molekylene, eller 2) grupperdannelse av vann-hydrofobisk polymer systemer[10].

BET mode sorption tilsvare en kombinasjon av Langmuir og Flory-Huggins sorpsjonsmoder og representerer sorpsjon av vann i sterkt hydrofile polymerer. Vannmolekylene er initialt fordelt i polare grupper på forskjellige steder i polymeren, ved høyere trykk kan grupperdannelse av vannmolekylene begynne[10].

## 2.5 Diffusjon i polymerer

Diffusjon skyldes molekylene termiske bevegelser. Diffusjon er en prosess der molekyler beveger seg fra et sted med høy konsentrasjon til et sted med lav konsentrasjon ved hjelp av tilfeldige bevegelser. Selv om en ikke kan si noe om bevegelsen til et enkelt molekyl, vil det være en netto transport av molekyler fra området med høy konsentrasjon til området med lav konsentrasjon, slik at konsentrasjonsforskjeller utjevnes.

Vanngjennomtrenging i polymerisk materiale i en dimensjon blir beskrevet matematisk av Ficks første lov

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

der  $F$  og  $C$  er henholdsvis fluksen og konsentrasjonen til det diffunderende materialet.  $D$  er diffusjonskoeffisienten og  $x$  er rom-koordinaten målt normalt til filmen. Dersom  $F$  og  $C$  blir uttrykt ved hjelp av de samme enhetene, er  $D$  uavhengig av enheten og har dimensjonen [lengde<sup>2</sup> tid<sup>-1</sup>].

Ved ikke-stasjonere tilstander vil konsentrasjonen endre seg med tiden. Ficks andre lov, i en dimensjon, beskriv endringa i fluksen når denne er avhengig av både posisjon og tid[9].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4)$$

## 2.6 Permeabilitet

Permeasjon av gass, damp eller væske gjennom en polymer, består av tre trinn: absorpsjon, diffusjon og desorpsjon. Permeasjon er dermed en funksjon av diffusjon og sorpsjon. Når løseligheten følger Henrys lov (1), kan en skrive

$$P = DS \quad (5)$$

der  $P$  er permeabilitetskonstanten,  $D$  er diffusjonskoeffisienten og  $S$  er løseligheten.

I det generelle tilfellet der en antar at transportkoeffisientene ikke er avhengige av konsentrasjonen av det diffunderende materialet i polymeren, er det en god tilnærming å bruke gjennomsnittlige verdier for  $D$  og  $S$ [10].

Permeabiliteten gjennom systemet blir dermed

$$\bar{P} = \bar{D}\bar{S} \quad (6)$$

der  $\bar{P}$  er den gjennomsnittlige permeabilitetskoeffisienten.

## 2.7 Diffusjon inn i en film senket i vann

En tynn polymerfilm blir senket ned i et vannbad. Temperaturen til filmen og vannet er lik og blir holdt konstant. Dersom vi antar at filmen har uendelig mye større utstrekning i  $y$ - og  $z$ -retningen, vil det bare diffundere inn vann i  $x$ -retningen.

Vann vil migrere inn i filmen til det er likevekt mellom konsentrasjonen av vann i filmen og omgivelsene. Ficks andre lov (4) med startbetingelsene

$$C(0 < x < l) = C_0 \quad (7)$$

$$C(x = 0) = C(x = l) = C_1 \quad (8)$$

gir løsningen[9, 12]

$$\frac{C - C_0}{C_1 - C_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n + 1} \exp \left\{ \frac{-D(2n + 1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \cos \frac{(2n + 1)\pi x}{2l} \quad (9)$$

Den totale massen av vann løst i filmen finner en ved å integrere likning (9) over tykkelsen på filmen

$$M = \int_0^l c \, dx \quad (10)$$

En antar at filmen har konstant tykkelse under diffusjonsprosessen[9].

Resultatet av denne integrasjonen gir den dimensjonsløse, men tidsavhengige parameteren  $G$

$$G = \frac{M(t)}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{\frac{-D(2n+1)^2\pi^2 t}{l^2}\right\} \quad (11)$$

$M(t)$  er mengden vann som har diffundert inn i materialet ved tida  $t$  og  $M_\infty$  er mengden vann når filmen er i metning. Likning (11) kan tilnærmes til uttrykket[13]

$$G = 1 - \exp\left\{-7,3\left(\frac{Dt}{l^2}\right)^{\frac{3}{4}}\right\} \quad (12)$$

Massekonsentrasjonen av vann som er absorbert av filmen er gitt som

$$C(t) = \frac{M(t)}{M_0} = G \frac{M_\infty}{M_0} \quad (13)$$

der  $M_0$  er tørrvekten til filmen og  $M_\infty$  er massen av prøven når den er i likevekt. Etter lang tid vil mengden vann i filmen nå metningskonsentrasjonen  $M(t \rightarrow \infty) = M_s$ .

En kan finne diffusjonskoeffisienten ved å plote konsentrasjonen av vann som er absorbert som funksjon av kvadratrotten av tiden. Med konstant diffusjonskoeffisient vil kurven vil være tilnærmet lineær til metningen er ca. 50 %, før den går mot en metningskonsentrasjon. Dersom  $D$  er en funksjon av konsentrasjon vil kurvene være lineære enda lenger[9].

Et eksempel på en typisk kurve fra likning (13) er plottet i figur 5, der diffusjonskoeffisienten  $D$  er satt konstant. Stigningstallet til den lineære delen av kurven kan tilnærmes ved hjelp av formelen

$$D = \pi \left(\frac{l}{4C_s}\right)^2 \left(\frac{C_2 - C_1}{\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}}\right)^2 \quad (14)$$

der  $C_s$  er metningskonsentrasjonen.

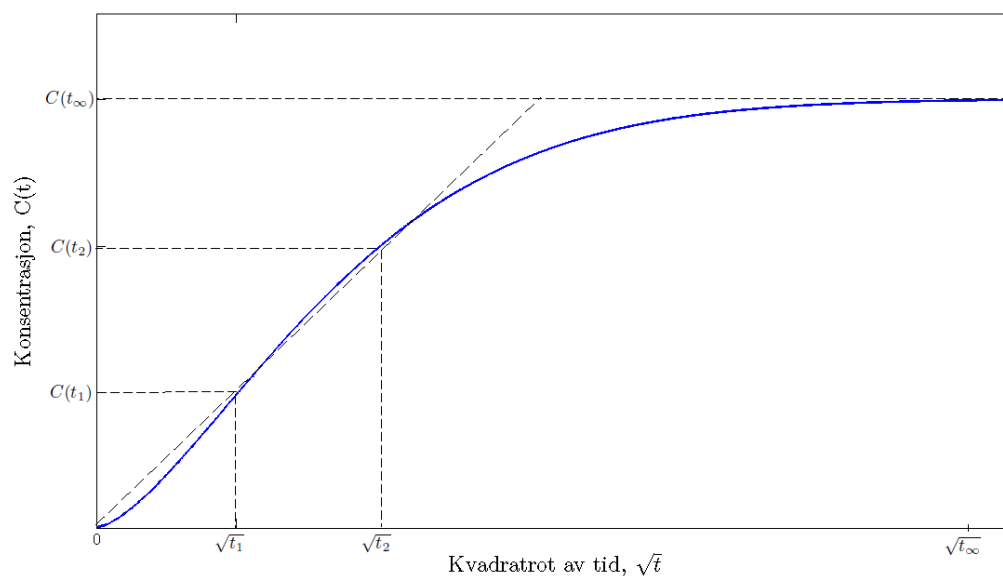
For å kunne sammenligne sorpsjonskurver for filmer med forskjellig tykkelse, er det vanlig å tilnærme kurven til en funksjon av formen

$$C(t) = C_s(1 - \exp(Kt^{*3/4})) \quad (15)$$

der  $t^*$  er redusert tid,  $t^* = \frac{\sqrt{t}}{l^2}$ .

For en film av endelig størrelse, må en ta med i betraktningen diffusjon fra kantene. I tilfellet der filmen er sirkulær skive, blir  $D$  erstattet med  $D_{\text{app}}$ [14]

$$D_{\text{app}} = D \left(1 + \frac{l}{r}\right)^2 \quad (16)$$



Figur 5: Eksempel på konsentrasjon som funksjon av kvadratrot av tiden, med konstant  $D$

der  $r$  er radiusen til skiven og  $l$  tykkelsen til filmen.  $D_{\text{app}}$  er den tilsynelatende diffusjonskoeffisienten. Likningen gjelder kun for materialer der diffusjonskoeffisienten er lik i alle retninger,  $D_x = D_y = D_z$ .

## 2.8 Temperaturavhengighet til transportkoeffisientene

Diffusjons-, løselighets- og permeabilitetskoeffisientene har fellesbetegnelsen transportkoeffisienter. Diffusjon i polymerer er en termisk aktivert prosess, der transportkoeffisientene er avhengige av temperaturen. Temperaturen vil øke mobiliteten til molekylene i polymeren, og dermed øke det frie volumet i polymeren. Temperaturavhengigheten til transportkoeffisientene er gitt ved Arrhenius lov[10]

$$S(T) = S_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_s}{RT}\right) \quad (17)$$

$$D(T) = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (18)$$

$$P(T) = P_0 \exp\left(\frac{-E_p}{RT}\right) \quad (19)$$

der  $S_0$ ,  $D_0$  og  $P_0$  er verdien når temperaturen går mot uendelig.  $R$  er gasskonstanten og  $T$  er temperaturen.  $E_p$  representerer aktiviseringsenergien for

permeasjonsprosessen og er lik summen

$$E_p = E_D + \Delta H_S \quad (20)$$

$E_D$  er aktiviseringsenergien til diffusjonsprosessen og  $\Delta H_S$  varmen et mol av et stoff trenger for å løse seg opp i polymeren. Likningene (17-19) er bare gyldige ved konstant trykk.

## 2.9 Effekt av fyllmaterialer

De fleste polymerer som blir brukt til praktiske formål, vil inneholde fyllpartikler og fibrer for å forbedre de mekaniske egenskapene og prosesseringsegenskapene. Fibrer er tilsatt for å forbedre de mekaniske egenskapene, gummipartikler for å forbedre hardheten og nanopartikler for å forbedre flere egenskaper, blant annet barriereytelse.

Fyllpartikler påvirker absorpsjonen på to prinsipielle måter. Når løseligheten til fyllmaterialet er forskjellig fra polymeren sin, kan absorpsjonen enten bli større eller mindre, avhengig av løseligheten til fyllmaterialet i forhold til løseligheten til polymeren.

Dersom de diffunderende partiklene har en affinitet til overflaten i fyllmaterialet, lager dette et absorpsjonssted for molekylene, som øker den totale løseligheten. Fyllpartikler kan også påvirke diffusjonsprosessen ved at diffunderende molekyler må gå rundt impermeable partikler, og dermed får lenger diffusjonsvei[6].

## 2.10 Effekt av konsentrasjon

For systemer der løseligheten følger Henrys lov(1), kan diffusjonskoeffisienten bli empirisk representert av kurver på formen

$$D(C) = D_0(1 + \beta C) \quad (21)$$

når en har en lineær konsentrasjonsavhengighet, og

$$D(C) = D_0 e^{\beta C} \quad (22)$$

når en har en eksponentiell sammenheng.  $D_0$  er grensen til  $D$  når  $C$  går mot null og  $\beta$  er en konstant som karakteriserer denne avhengigheten. Tilfellet der  $\beta = 0$ , tilsvarer konstant diffusjonskoeffisient[10].

Dersom løseligheten har en lineær sammenheng med konsentrasjonen, kan den modelleres av en kurve på formen

$$S(C) = aC + b \quad (23)$$

der  $C$  er konsentrasjonen og  $a$  og  $b$  er konstanter for materialet det diffunderes i. Ved hjelp av Henrys lov(1) kan konsentrasjonsavhenigheten til løseligheten uttrykkes som en funksjon av vanndamptrykket

$$S(C) = \frac{b}{(1 - ap)} \quad (24)$$

For systemer med en eksponentiell sammenheng mellom løseligheten og konsentrasjonen kan kurven tilpasses til en funksjon på formen

$$S(C) = S_0 e^{\sigma C} \quad (25)$$

der  $S_0$  er løseligheten når  $C$  går mot null og  $\sigma$  er en konstant relatert til polymer-diffusant vekselvirkninger. Løselighetskoeffisienten  $S(C)$  tilsvarer den i Henrys lov(1), når konsentrasjonen er lav[10].

## 2.11 Avvik fra Fickisk diffusjon

Polymerstrukturen er en viktig faktor for diffusjonen siden transportfenomenet i en polymer i glassfasen er grunnleggende forskjellig fra en i gummifasen. Det er vanlig å skille mellom tre former for diffusjon.

1. Type I eller Fickisk diffusjon, der diffusjonsraten er mindre enn relaksasjonsraten til polymeren. En når raskt likevekt og grensebetingelsene er uavhengig av tiden.
2. Type II eller ikke-Fickisk diffusjon, er relatert til en rask diffusjon sammenliknet med relaksasjonsraten til polymeren. Her er diffusjonsprosessen sterkt avhengig av svellingen til polymeren.
3. Anomal diffusjon er relatert til en diffusjonsprosess der diffusjonsraten og relaksasjonsraten er sammenlignbare. Sorpsjon og transport gjennom polymeren er påvirket av eventuelle mikrobobler i polymerstrukturen.

Det er vanlig å tilpasse målte data til en funksjon på formen

$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n \quad (26)$$

der  $M_t$  og  $M_\infty$  er massen ved tiden  $t$  og etter uendelig lang tid.  $k$  er en konstant og potensen  $n$  forteller om transport-mekanismen. Fickisk diffusjon er indikert med  $n = 0,5$ , mens  $n = 1$  er ikke-Fickisk diffusjon. Verdier mellom disse to indikerer en kombinasjon mellom disse to mekanismene[10].

## 2.12 Transportkoeffisienter for vann i luft

Diffusjonskoeffisienten til vann i luft er gitt empirisk av formelen[15]

$$D = 1,97 \cdot 10^{-5} \left( \frac{p_0}{p} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,685} \quad (27)$$

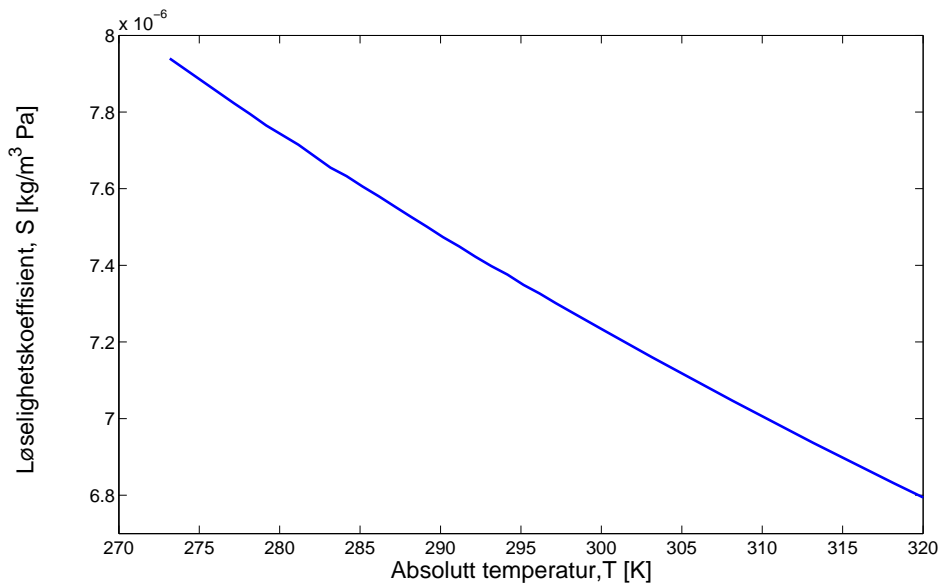
der  $p_0$  er 1 atm og  $T_0$  er 256 K. Formelen gjelder for temperaturer mellom 273 og 373 K.

Løselighetskoeffisienten til vann i luft finn en ved å omforme Henrys lov (1) til:

$$S(T) = \frac{1}{v(T) \cdot p_s(T)} \quad (28)$$

der  $v(T)$  er det spesifikke volumet av vanddamp og  $p_s(T)$  er metningstrykket ved gitt temperatur. Det finnes fullstendige tabeller over metningstrykket til vann ved gitt temperatur.

Ved å bruke data fra Moran & Shapiro[16], får en kurven på figur 6 som beskriver løselighetskoeffisienten som funksjon av temperatur.



Figur 6: Løselighetskoeffisient  $S$  som funksjon av absolutt temperatur  $T$

## 2.13 Relativ fukt

Relativ fukt defineres som brøkdelen, eller prosentdelen, av mengden vanddamp luften har ved en gitt temperatur til den maksimale mengden vann

lufta kan holde ved den samme temperaturen[17]. Relativ fukt er gitt ved

$$RH = \frac{p}{p_s} \quad (29)$$

der  $p$  er vanndamptrykket og  $p_s$  er metningstrykket til vann, ved en gitt temperatur.

Ved å omarbeide Clausius-Claperyon-likningen, med antagelsene om at trykket er lavt og at vanndampen oppfører seg som en ideell gass, finner en et uttrykk for metningstrykket som funksjon av temperaturen

$$p_s = p_0 \exp\left(\frac{l_v}{R_s}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (30)$$

der  $T$  er temperaturen i Kelvin,  $p_0$  og  $T_0$  er henholdsvis metningstrykket til vann og temperaturen ved 0 °C.  $l_v$  er den varmen som blir absorbert eller frigitt når vann går fra en fase til en annen uten å endre temperatur.  $R_s$  er den spesifikke gasskonstanten for vann[18].



## 3 Eksperimentelt arbeid

### 3.1 Innledning

Formålet med testcellen er å verifisere numeriske beregninger i forhold til målte data av diffusjon gjennom tynne filmer av forskjellige materialer. I denne oppgaven blir det sett på diffusjon av vann gjennom en polymerfilm og absorpsjon i svellebandprøver. Svellebandet blir plassert løst i luftkammeret til testcellen og vann vil diffundere inn fra alle kanter av svellebandet.

Svellebandet ble karakterisert ved å måle vektøkningen for forskjellige steg i relativ fukt. Transportkoeffisientene til svellebandet ble beregnet ut fra målte data og ble brukt i de numeriske beregningene til fuktopptaksmålingene.

I tillegg ble svellebandet undersøkt med mikroskop ved forskjellige fuktigheter for å observere svellingen til svellebandet.

### 3.2 Materialer

Det har blitt benyttet to forskjellige polymerer i denne oppgaven. En kort beskrivelse av de forskjellige prøvematerialene er gitt i tabell 1.

Tabell 1: Prøvematerialer

Test objekt	Beskrivelse
Polymerfilm	Polyester basert termoplastisk polyuretan(PU), blir brukt som isolasjonsmateriale i høyspenningskabler.
Svelleband	Superabsorberende polyakrylat(svellepulver) mellom en tekstilstruktur av polymerfibrer og papir på svellesiden. Svellebandet er isolerende.

Polymerfilmen er en polyester basert termoplastisk polyeuretan, og blir benyttet som isolasjonsmateriale i kablene. Polymerfilmen er tatt fra en oppkuttet kabel og eventuelle rester av andre materialer er fjernet med skalpell.

Svellebandet er et kommersielt tilgjengelig svelleband. Svellebandet består av en duk av polyesterfiber som det er drysset et pulver av superabsorberende polyakrylat og bindemiddel over, før det er lagt på et topplag av papir på svellesiden[7].

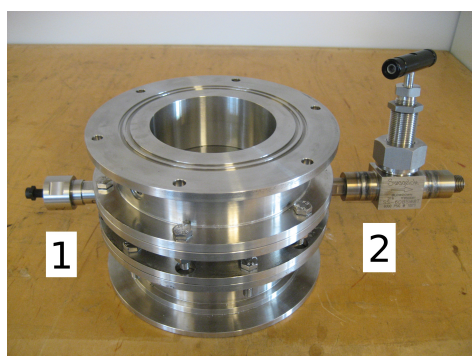
Det ble brukt svelleband fra to forskjellige partier. Svellebandet som ble brukt i fuktopptaksmålingene for verifisering er av samme partiet som ble brukt i tidligere forsøk[19], og blir heretter kalt parti A. Prøvene til karakteriseringsmålingene er tatt fra et nytt parti, kalt parti B. De eldste svellebandprøvene har blitt oppbevart i plast i et metallskap over lengre tid. Rommet

prøvene har blitt oppbevart i har hatt en temperatur rundt 25 °C og varierende fukt. En viss aldring av parti A må derfor påregnes.

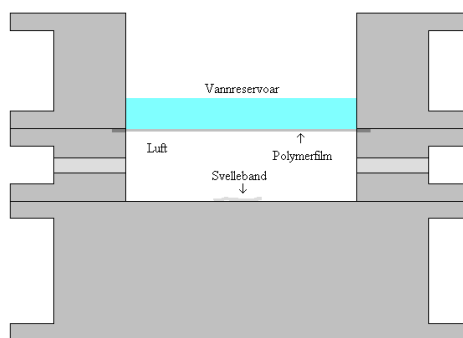
Det er oppgitt en høyere masse per areal i databladet for parti B enn det som er oppgitt i parti A. I tillegg er det for parti B oppgitt en større strekkstyrke. Databladene forøvrig er identiske. Mulige grunner til forskjellene kan være at polymerduken er byttet ut med en som tåler mekaniske påkjenninger bedre, men har større tetthet, eller at produsenten har tilsatt mer svellepulver i parti B.

### 3.3 Testcelle for verifisering

Testcellen er den samme som ble brukt i en tidligere oppgave[19]. Den består av flere sylindriske deler i rustfritt stål som kan skrues sammen. Figur 7 viser



Figur 7: Ferdig sammenskrudd testcelle med 1) sensorgjennomføring og 2) vakuumentil



Figur 8: Tverrsnitt av testcellen under forsøk med svulleband

et bilde og figur 8 illustrerer tverrsnittet til testcellen. På bunndelen er det montert en prøveholder med påstøpt polymerfilm og en toppdel. Mellom hver del er det to o-ringer av forskjellig størrelse, for å sikre at cellen er lufttett. Det er mulig å montere på flere prøveholdere for å se på diffusjon gjennom flere filmer samtidig. I denne oppgaven er det bare benyttet en prøveholder.

Prøveholderen har to gjennomføringer, en for vakuumentil og en for fukt og temperatursensor. Vakuumentilen er en nåleventil i metall og er nødvendig for å sjekke at testcellen er lufttett.

Fukt og temperatursensoren har en gjennomføring som er støpt i glass og har en gull-pakning mellom metalldelene for å sikre at den er tett. Vakuumentilen og sensoren er montert på testcellen med en kobberpakning og vakuumfett i kontaktflaten. Det er viktig at testcellen er tett for at vann ikke

skal diffundere inn eller ut av testcellen under forsøkene og påvirke måleresultatene.

### 3.3.1 Støping av film på prøveholderen

Kabelmaterialet som ble brukt i forsøkene ble tatt fra en nyoppkuttet kabel. Polymeren ble grundig rengjort med isopropanol for å fjerne eventuell forurensing. Prøveholderen, tetningsbolten og en tynn varmebestandig plastfilm ble så grundig rengjort med isopropanol og påført slippmiddel i tre lag. Det ble ikke påført slippmiddel på heftkanten til prøveholderen.

Ønsket mengde prøvemateriale ble så målt opp og plassert på tetningsbolten med plastfilm og støpelokk over. Mengden prøvemateriale ble avpasset til hvilken prøvebolt som ble brukt. For lite prøvemateriale vil ikke fylle prøveholderen tilstrekkelig, og for mye materiale vil renne ned mellom prøveholderen og tetningsbolten og gjøre tetningsbolten umulig å fjerne uten å ødelegge prøven.

Hele oppsettet ble så plassert i en hydraulisk presse av typen Wabash Genesis, der varmeplatene er varmet opp til 185 °C. Oppsettet ble utsatt for et trykk på 12 MPa i 8 min, og etter det 18 MPa i 2 min før varmeplatene ble kjølt ned med vann i 2 min.



Figur 9: Prøveholder med påstøpt polymerfilm

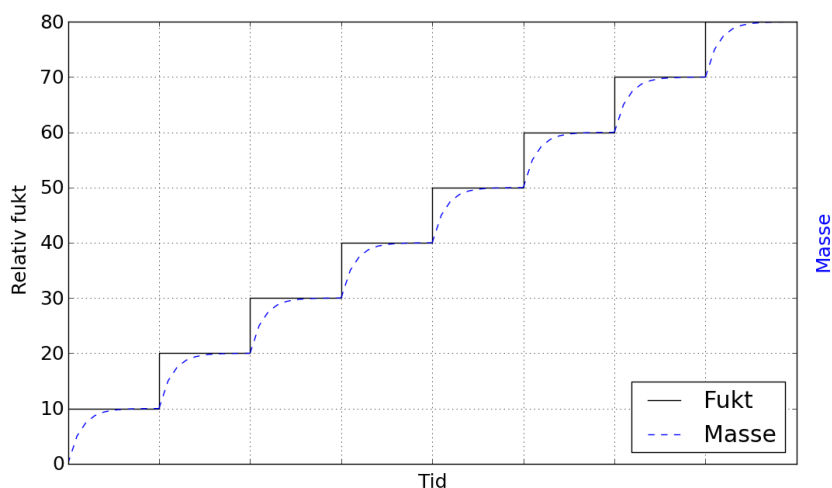
Etter prosessering ble tetningsbolten fjernet fra testcellen, ved hjelp av støpedelene beskrevet i vedlegg A, i likhet med støpelokket og plastfilmen. Polymerfilmen ble så grundig undersøkt for defekter som luftbobler, urenheter og strekk. Polymerfilmer med defekter ble forkastet og prosedyren ble gjentatt til polymerfilmen har tilfredsstillende kvalitet. Overflødig polymer-

materiale ble forsiktig fjernet ved hjelp av skalpell. Figur 9 viser en prøverholder med ferdig påstøpt prøve etter at tetningsbolten er fjernet. Det er og plassert på o-ringer for montering av testcellen.

## 3.4 Måleoppsett

### 3.4.1 Karakterisering av svelleband

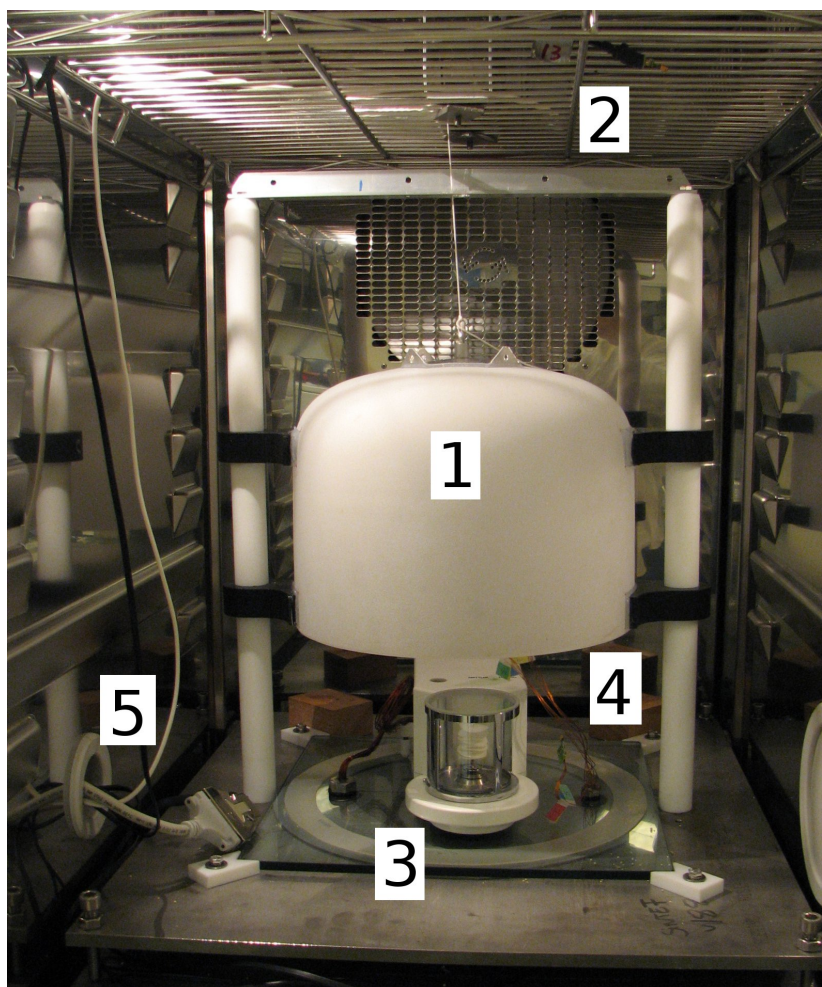
Formålet med måleoppsettet er å øke fuktigheten omkring svellebandprøvene stegvis og måle masseopptaket for hvert steg. Figur 10 illustrerer hvordan faktisk masseøkning for hvert fuktsteg kan se ut. Beregnet diffusjonskoeffisient vil være et gjennomsnitt for fuktsteget masseendringen er målt over.



Figur 10: Stegvis endring i relativ fukt og illustrasjon av masseøkningen for svellebandet

Måleoppsettet for karakteriseringsmålinger av svelleband er vist i figur 11, og består av en høypresisjonsvekt av typen Mettler- Toledo UMX2 ultramicrobalance, plassert i klimaskap. Over vekten er det plassert en impermeabel kuppel som kan heves og senkes over presisjonsvekten. Kuppelen heves og senkes ved hjelp av en vinsj som er plassert i klimaskapet med ekstern styring. Kuppelen kan heves og senkes uten at klimaskapet blir åpnet.

Når kuppelen er senket holdes fuktigheten seg konstant inne i kuppelen selv om den endres ellers i klimaskapet. Klimaskapet blir startet og stoppet ved hjelp av en datamaskin, som og måler vekten på prøven på presisjonsvekten. Vekten blir styret av et labview-program. På toppen av kuppelen er det en ledningsgjennomføring for fukt og temperatursensorer som er plassert inne i kuppelen.



Figur 11: Oppsett for karakteriseringsmålinger av svelleband. 1) Kuppel 2) Vinsj for heving og senking av kuppel 3) Mikrovekt 4) Sensorer 5) Ledningsgjennomføring ut av klimaskapet for strøm og datakabler, tett med silikonpropp

I alt fire sensorer av typen Sensirion SHT75 CMOSens måler fukt og temperatur i klimaskapet. Tre av sensorene er plassert inne i kuppelen, mens den siste er utenfor. I tillegg har klimaskapet innebygd fukt og temperatursensor. Data fra sensorene ble logget ved hjelp av programmet Multi-humiiiew v.1.6.

Det ble brukt 15 svellebandprøver i karakteriseringsmålingene. Svellebandprøvene ble tredd inn på en nål som var loddet til en metallstift, og fordelt jevnt på nålen. Antall svellebandprøver ble valgt slik at estimert masse av nål og svelleband ved 80 %RH var mindre enn kapasiteten til vekten. Det ble og tatt hensyn til tilgjengelig plass på nålen, slik at svellebandprøvene hadde plass til å utvide seg på uten å komme i kontakt med andre svellebandprøver. Metallnålen ble veid til 597,166 mg.

Figur 12 viser svellebandprøvene til karakteriseringen på metallnål.



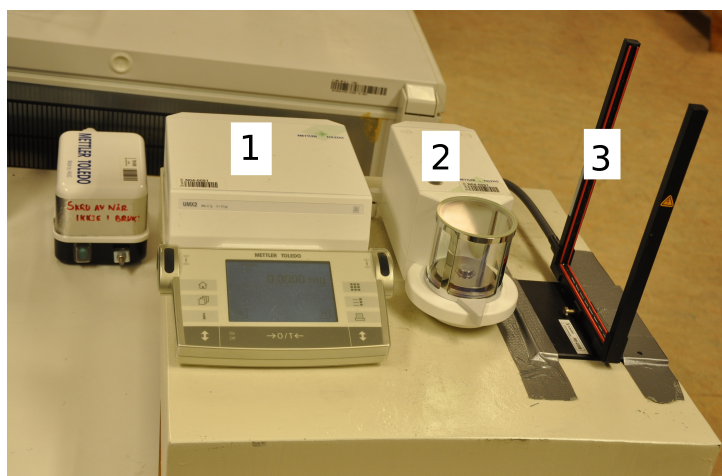
Figur 12: Svellebandprøver tredd på metallnål for karakterisering

### 3.4.2 Testcellen for verifiseringsmålinger

Etter at ønsket prøve er støpt på prøveholderen, blir testcellen montert med bunndel, prøveholder, mellomdel, vakuumentil og sensorer, før cellen er plassert i klimaskap. Svellebandet ble plassert løst på bunn av testkammeret før cellen ble montert i forsøkene med svelleband.

#### Måling av tørrvekt til svelleband

Tørrvekten til svellebandet ble målt for bruk i simuleringene. Svellebandet ble tørket i vakuumvarmeskap ved 30 °C i ett døgn, før det ble veid på en høypresisjonsvekt av typen Mettler Toledo UMX2 ultra-microbalance. Figur 13 viser oppsettet av presisjonsvekten.



Figur 13: Presisjonsvekt for måling av tørrvekt til svelleband. 1) Kontrolldel til vekten 2) Målekammer 3) Statisk utlader

Vakuumskapet var i umiddelbar nærhet til vekten, for å minimere opptak av vann under transport til vekten. Forsøk har vist at tørrvekten til svellebandet ikke varierer mer enn usikkerheten i målingen, på grunn av opptak av vann fra lufta, om den blir målt etter et døgn i forhold til tre døgn i vakuumvarmeskap. Ett døgn blir derfor sett på som tilstrekkelig tørketid for måling av tørrvekt.

Tørrvekten til svellebandet ble avlest til 0,001 mg nøyaktighet. Under ideelle forhold har vekten en nøyaktighet på  $\pm 0,0001$  mg og en repeterbarhet på 0,00025 mg. Siden opptak av vann i svellebandet er en rask prosess, vil svellebandet ta opp vann fra det blir tatt ut av vakuumvarmeskapet og øke til det er i likevekt med omgivelsene. Det er derfor ønskelig å måle tørrvekten umiddelbart etter at det blir tatt ut av vakuumvarmeskapet.

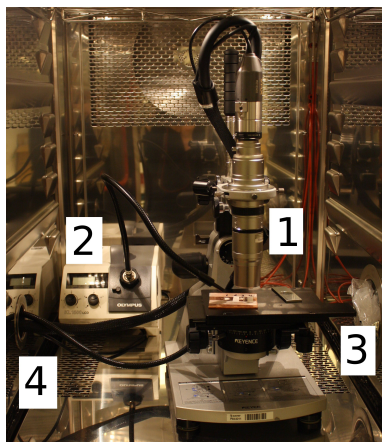
### 3.4.3 Mikroskop i klimaskap

For å kunne studere svelleband og svellepulveret ved bestemte fuktigheter, ble et portabelt digitalt mikroskop av typen UMX-500 plassert i et klimaskap av typen Vötsch VC4034. Kontrolldelen til mikroskopet ble plassert utenfor klimaskapet, mens linsen ble plassert i klimaskapet. Bilde av oppsettet utenfor klimaskapet er vist i figur 14, og mikroskopdelen inne i klimaskapet er vist i figur 15.

Svellebandet ble delt i to, så svellepulveret kunne observerbares. Siden svellebandet endrer form når det tar opp fukt, ble strimler av svellebandet festet til en metallplate ved hjelp av tape. Mikroskopet ble justert gjennom et hull i klimaskapet. Hullet ble kledd med plast for å hindre utskiftning av



Figur 14: Kontrollenhet for mikroskop



Figur 15: Oppsett av mikroskopet i klimaskapet med ekstern lyskilde. 1) Mikroskop på stativ, 2) Ekstern lyskilde, 3) Hull mikroskopet ble justert gjennom, 5) Gjennomføring for strømledning og optiske kabler til mikroskopet

luft og endringer i fuktighet og temperatur når mikroskopet ble justert.

## 3.5 Måleprosedyrer

### 3.5.1 Karakterisering av svelleband

Svellebandet ble for fuktsteget 0-10 %RH tørket i vakuumvarmeskap i to døgn, før det ble tatt ut av vakuumvarmeskapet og plassert på mikrovekten i klimaskapet.

Den laveste fuktigheten klimaskapet klarer å generere ved 30 °C er oppgitt til 10 %, men erfaring viser at klimaskapet vil stabilisere seg på rundt 20 %RH. Fukten i klimaskapet ble senket fra 20 %RH til ca 10 %RH ved å bruke ekstra absorbatore (ceolitter) i klimaskapet for fuktsteg under 20 %RH.

Klimaskapet og vektmålingene av svellebandet ble startet umiddelbart etterpå. Første måling av svellebandet kommer 30 s etter at dataprogrammet som styrer vekten ble startet og ca 1 min etter at svellebandprøvene ble tatt ut av vakuumvarmeskapet. Vekten til svellebandprøvene ble registrert hvert niende minutt til svellebandet når likevekt ved denne fuktigheten.

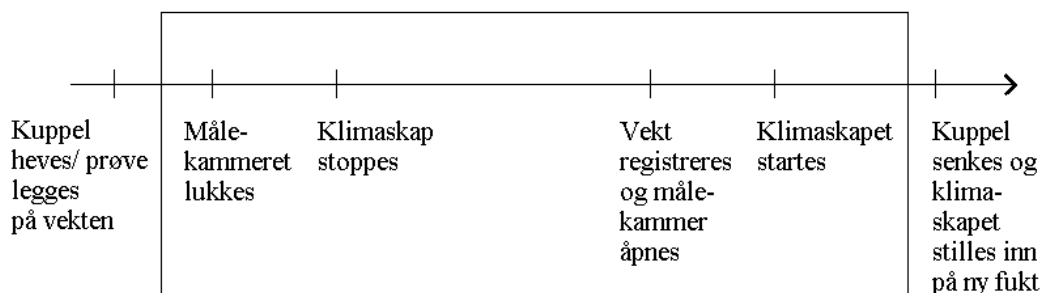
Kuppelen ble så senket over presisjonsvekten med svellebandprøver som er i likevekt med omgivelsene og klimaskapet blir nå stilt inn på ny relativ fukt. Når klimaskapet holder denne verdien stabilt blir kuppelen blir nå hevet



og en registrerer vekten til svellebandprøvene hvert 9. minutt, til svellebandet når ny likevekt.

Kuppelen ble hevet 4 min og 30 s etter et målepunkt. Siden variasjonene i fukt og temperatur inne i kuppelen er små i forhold til endringen i fukt utenfor kuppelen, ble siste målepunkt før kuppelen ble hevet satt som verdien umiddelbart før kuppelen ble hevet. For å få riktig tid ble det lagt til 4 min og 30 s til dette målepunktet i beregningene.

På grunn av vibrasjoner i klimaskapet når det er i gang, er det ønskelig at det blir slått av før presisjonsvekten foretar en måling. Vekten og klimaskapet ble synkronisert slik at klimaskapet ble slått av ca 30 sekunder før en vektmåling, slik at vibrasjoner fra skapet blir minimale. Etter en måling blir skapet startet igjen, for å holde fukt og temperatur stabilt til neste måling.



Figur 16: Tidslinje for karakteriseringsmålinger

Figur 16 viser en skjematisk oversikt over måleprosedyrene for karakteriseringsmålingene. Før første måling blir svellebandet tørket i vakuumbeskyttelse i minst 48 timer. Umiddelbart etter at svellebandet er tatt ut av vakuumbeskyttelse og plassert på vekten, blir registrering av måledata startet.

Før den første målingen, blir svellebandprøvene tørket i vakuumbeskyttelse ved 30 °C i 48 timer. Fuktstegene i hvert måleserie er på ca 10 %, og det måles fra 0-80 %RH for absorpsjon og 80-100 %RH for desorpsjonsmålingene.

### Måling av avdrift av presisjonsvekten

Det har vist seg at presisjonsvekten er avhengig av stabile forhold i fukt, i tillegg til temperatur, for å få nøyaktige målinger. Avdriften til vekten ble målt ved å plassere en brettet bit av rengjort aluminiumsfolie på vekten, og foreta en måleserie som om det var svelleband.

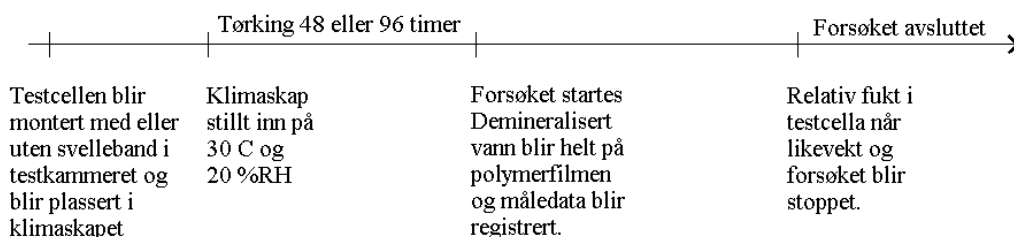
Siden metall er impermeabelt for vann, vil ikke vekten av aluminiumsfolien variere med fukten, og eventuelle endringer i den målte vekten vil være

et mål på avdriften til vekten.

### 3.5.2 Fuktopptaksmålinger med testcellen

Klimaskapet blir innstilt på ønsket temperatur og relativ fukt. Sensorer i klimaskapet og testcellen viser temperatur og fukt i klimaskapet i forhold til det som er inne i cellen. Når testcellen er i likevekt med omgivelsene, heller en demineralisert vann, som er temperert i klimaskapet, i toppdelen av testcellen. Polymerfilmen er nå fullstendig dekket med vann på oppsiden, mens det er luft på nedsiden.

Vann vil nå migrere gjennom polymerfilmen og bli absorbert av luften inne i testcellen. Sensoren inne i testcellen vil vise når luften er mettet av vann og forsøket blir avsluttet. Toppen av testcellen ble dekket med aluminiumsfolie for å hindre fordampning av vannet. Aluminiumsfolie ble valgt fremfor lokket til testcellen, fordi det er lettere å håndtere. Dersom en heller nok vann i testcellen er ikke fordampning noe problem, siden en når likevekt på relativt kort tid.



Figur 17: Tidslinje for fuktopptaksmålinger med og uten svelleband i testkammeret. Tørketiden er lenger for forsøkene der det er plassert svelleband i testcellen

En skjematisk oversikt over prosedyrene for fuktopptak er gitt i figur 17. Prosedyrene for forsøkene med og uten svelleband er like bortsett fra at tørketiden for fuktopptaksmålingene med svelleband er lenger en for forsøkene uten.

### Tetthetstest med vakuum

For å sjekke at testcellen er tett, og har minimalt med forstyrrelser gjennom gjennomføringene og o-ringene, blir det utført en tetthetstest. Vakuum blir satt på den sammenskrudde testcellen og startverdien til trykket blir notert ned. Etter 24 timer blir trykket målt på ny og differansen gir en indikasjon på hvor tett cellen er. Det ble målt at vakuomet tapte seg 0,1

mbar/time for en 24 timers test, og er tidligere funnet til å ha liten påvirkning av måleresultatet[19].

### Tetthetstest med klimaskap

En annen måte å sjekket tetthetsgraden til testcellen er å måle hvordan den relative fukten inne i testcellen forandrer seg i forhold til omgivelsene. Testcellen ble skrudd sammen og satt i klimaskap med 10 %RH og 30 °C til sensoren i cellen er i likevekt med sensoren i klimaskapet. Ventilen i cella ble så stengt og klimaskapet ble så innstilt på 80 %RH. Målingene viste ingen endring i den relative fuktigheten inne i testcellen etter ett døgn med 80 %RH i klimaskapet.

### 3.5.3 Mikroskopering

Fuktigheten i klimaskapet var mellom 10 %RH og 80 %RH under mikroskoperingen. Det ble tatt bilde av svellebandet med 10 %RH intervaller. Det gikk 18 timer fra klimaskapet ble stilt inn på ny fukt til bilder ble tatt for fuktigheter under 40 %RH og ned mot 8 timer intervall mellom bildene ved høyere fuktighet.

Bildene ble tatt med 200 ganger forstørrelse. Til slutt ble det tatt et kalibreringsbilde av et 0,1 mm rutenett, for å kunne skalere bildene.

På grunn av vibrasjoner i klimaskapet kom mikroskopet ut av fokus mellom hvert bilde. Mikroskopet ble justert til fokus igjen ved å endre avstanden mellom mikroskopet og prøveobjektet.

## 4 Numeriske beregninger

### 4.1 Innledning

COMSOL Multiphysics er et kraftig verktøy for å modellere og løse problemer basert på partielle differensialligninger (PDE)[20]. For mange fysiske anvendelsesområder, som akustikk, diffusjon og massetransport, har COMSOL innebygde moduler der en definerer fysiske størrelser i stedet for å definere partielle differensiallikninger på området. En kort gjennomgang av endelig elementmetoden er gitt i vedlegg B

En kan modellere problem i en, to og tre dimensjoner, i tillegg til tiden. Modellen blir så delt opp i forskjellige områder, kalt subdomene, som har sine egne fysiske parametre som definerer området. Hvert subdomene blir delt opp i sin egen gitterstruktur, kalt mesh, som definerer elementstørrelsen som COMSOL løser problemet ut fra. Beregningsmodulen brukt i oppgava er COMSOL Multiphysics' koeffisientbaserte partielle differensiallikningsmodul. Den styrende likninga i denne modulen er:

$$e_a \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} + \nabla(-c\nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \nabla u + au = f \quad (31)$$

der  $u$  er variabelen det skal løses for. Variabelen  $t$  er tiden og  $e_a$ ,  $d_a$ ,  $c$ ,  $a$  og  $f$  er definerbare skalarer og  $\alpha$ ,  $\beta$  og  $\gamma$  er definerbare vektorer. Denne modulen kan brukes både på lineære og ulineære problem[20].

Det er to grunnleggende former for grensebetingelser som blir brukt i modellen, Neumann og Dirichlet grensebetingelse. Neumann grensebetingelse er gitt av:

$$\mathbf{n}(c\nabla u + \alpha u - \gamma) + qu = g \quad (32)$$

der  $c$ ,  $\alpha$  og  $\gamma$  er det samme som i likning (31), og  $q$  og  $g$  er konstanter. Neumann grensebetingelse angir hvilken verdi den deriverte tar på grensen. Dirichlet grensebetingelse er gitt av:

$$\mathbf{n}(c\nabla u + \alpha u - \gamma) + qu = g - h^T; hu = r \quad (33)$$

som er Neumann grensebetingelse og et tilleggsledd. Dirichlet grensebetingelse brukes til å simulere konstant masseflyt over ei grense, og angir hvilken verdi løsningen må ta på grensen[20, 21].

### 4.2 Numerisk modell

Den numeriske modellen som ble brukt i oppgaven er en videreutvikling av en tidligere brukt modell[19]. Ved å omskrive Ficks andre lov (4) til sylindrer-

koordinater får vi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{D}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\} \quad (34)$$

Siden vi bare er interessert i den radielle komponenten, blir uttrykket forenklet til:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right\} \quad (35)$$

Ved videre omskrivning ved hjelp av Henrys lov (1) og bruk av kjerneregelen, får en uttrykket:

$$S \frac{\partial p}{\partial t} + \left( p \frac{\partial S}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( -D \left( p r \frac{\partial S}{\partial r} + S r \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right) = 0 \quad (36)$$

Ved å sammenligne med likning (31), får en koeffisientene i tabell 2 til bruk i den numeriske modellen.

Tabell 2: Koeffisienter til bruk i numerisk modell. Koeffisientene  $a$ ,  $f$ ,  $e_a$ ,  $\beta$  og  $\gamma$  fikk verdien null

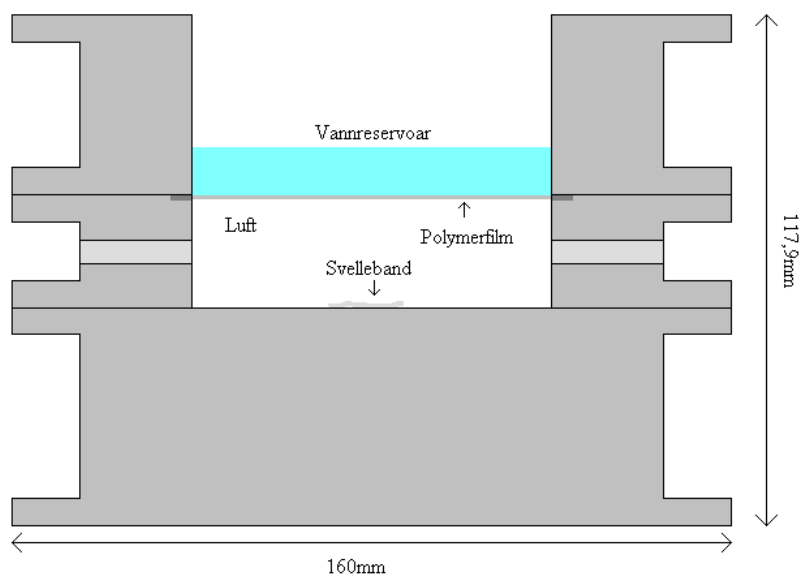
Koeffisient	Verdi
$c$	$x * D * S$
$d_a$	$p \frac{dS}{dp} + S$
$\alpha$	$x * D * \left( \frac{dS}{dx} + \frac{dS}{dy} \right)$

### 4.3 Geometrisk modell brukt i simuleringene

Den geometriske modellen tar direkte utgangspunkt i testcellen som er beskrevet tidligere. Det tredimensjonale problemet blir forenklet til et todimensjonalt problem som er sylinder-symmetrisk. Figur 18 viser et tverrsnitt av testcellen sett fra siden. Testcellen er laget av stål, som er impermeabelt. Veggene og bunn i testcellen kan derfor modelleres ved hjelp av Neumann-grensebetingelse.

Effekten av heftkanten som polymerfilmen er festet på, har i tidligere forsøk vist seg være neglisjerbar[19]. Volumet av vannet som diffunderer inn i testcellen, er lite i forhold til volumet av vannreservoaret. Volumet kan derfor simuleres som et uendelig vannreservoar ved hjelp av Dirichlet grensebetingelse. Det øverste kammeret kan dermed tas vekk fra modellen.

Svellebandprøvene som blir brukt i forsøket er utstansa skiver med en diameter på 25 mm. I forsøket blir svelleband plassert løst i testkammeret



Figur 18: Tverrsnitt av testcellen, sett fra siden

der vil det fungere som en absorlator som tar opp eller gir fra seg fukt, slik at det hele tiden prøver å komme i likevekt med omgivelsene.

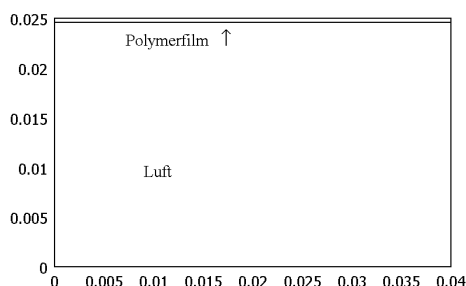
Mengden med vann som diffunderer inn i svellebandet fra kantene er liten i forhold til mengden fra topp og bunn. I modeller med flere svelleband, er svellebandet modellert som et område der bredden på subdomenet blir bestemt av antall svelleband, mens tørrvekten bestemmer høyden. Dermed vil ha arealet til topp og bunn av svellebandet i forsøkene tilsvare topp- og bunn-arealet til svellebandet som skal simuleres. Ulike mengder svelleband blir derfor modellert ved å endre størrelsen på subdomenet til svellebandet.

Figur (19) og (20) viser den geometriske modellen som blir brukt i beregningene med og uten svelleband.

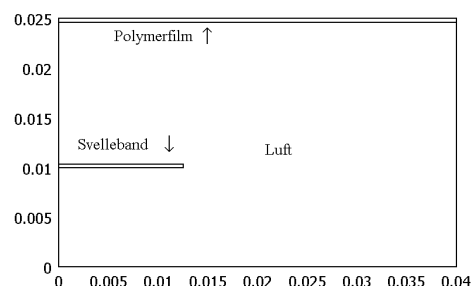
## 5 Sensitivitetsanalyse av numerisk modell

### 5.1 Innledning

For å se hvordan løsningen av modellen avhenger av elementtetthet, ble det utført en sensitivitetsanalyse. En tar da utgangspunkt i en modell med grov gitterstruktur, og ser hvordan løsningen endrer seg når en gjør elementstørrelsen mindre. En endrer da et enkelt subdomene om gangen for å se hvordan



Figur 19: Modell uten svelleband



Figur 20: Modell for forsøk med tre svelleband

dette påvirker løsningen.

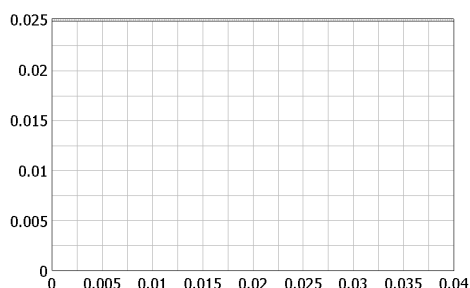
Det ble også utført en analyse for å se hvordan løsningen er avhengig av plasseringen av svellebandet over bunn i testcellen. Siden svellebandet endrer form når det tar opp fukt endres også gjennomsnittlig høyde over bunn. På grunn av dette er det vanskelig å finne en konkret plassering av svellebandet i den numeriske modellen. Det ideelle er å plassere svellebandet i testcellen slik at fukt kan tas opp fra begge sider, og at flaten som er i kontakt med stål er så liten som mulig.

## 5.2 Elementtetthet for modell med polymerfilm

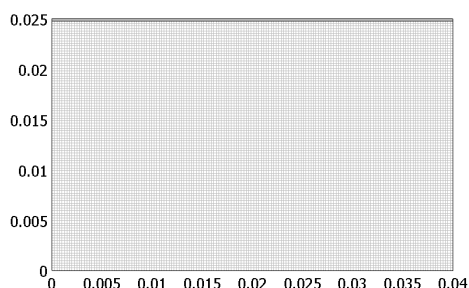
Først ble modellen i COMSOL innstilt på en grov gitterstruktur med få elementer per kvadratmillimeter på alle områdene. Etter å ha endret elementtettheten i et subdomene, kjører en programmet på nytt og ser på endringen mellom simuleringene. Dersom det ikke er noen endring mellom løsningene, endrer en elementtettheten på neste subdomene og ser etter endringer i løsningen.

Når en har vurdert alle områdene, begynner en prosessen på nytt og endrer det første området en gang til. Dette er fordi løsningen på hele området er avhengig av løsningen på hvert enkelt subdomene. Selv om en ikke hadde betydelig endring tidligere, kan det ha endret seg når elementtettheten på andre områder har blitt finere.

Figur 21 og 22 viser hvordan modellen ser ut med henholdsvis grov og fin gitterstruktur.



Figur 21: Modell med få elementer per areal/ grov mesh



Figur 22: Modell med mange elementer per areal/ fin mesh

### 5.3 Elementtetthet for modell med polymerfilm og svelleband

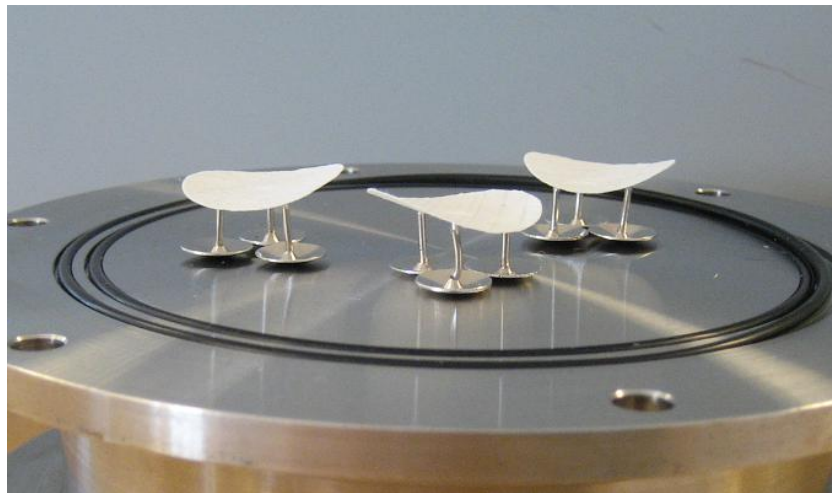
Analysen for modellen med polymerfilm og svelleband ble utført på samme måte som analysen for polymerfilm alene. Svellebandet ble plassert 10 mm over bunn i analysemodellen. Dette for å unngå tynne områder mellom svellebandet og bunn i modellen som er vanskelig å modellere og som kan forårsake kanteffekter.

### 5.4 Plassering av svelleband

Siden svellebandet endrer form når det tar opp vann er det vanskelig å anslå en riktig høyde over bunn i de numeriske beregningene. Det ble derfor gjort et forsøk der svellebandet var plassert på metallstifter i testkammeret. På denne måten var svellebandet tilnærmet uten kontakt med veggene og bunn av testkammeret og kan modelleres med en mer konkret plassering i den numeriske modellen.

Figur 23 viser hvordan svellebandet ble plassert på stifter i testcellen. Det ble gjort en tilsvarende analyse på hvordan plasseringen av svelleband over bunn i modellen påvirker den numeriske løsningen. Analysen ble gjort med modellen for tre svelleband i kammeret, siden forsøket med svelleband på stifter ble gjort med tre svelleband.





Figur 23: Svelleband plassert på metallstifter

## 6 Resultat

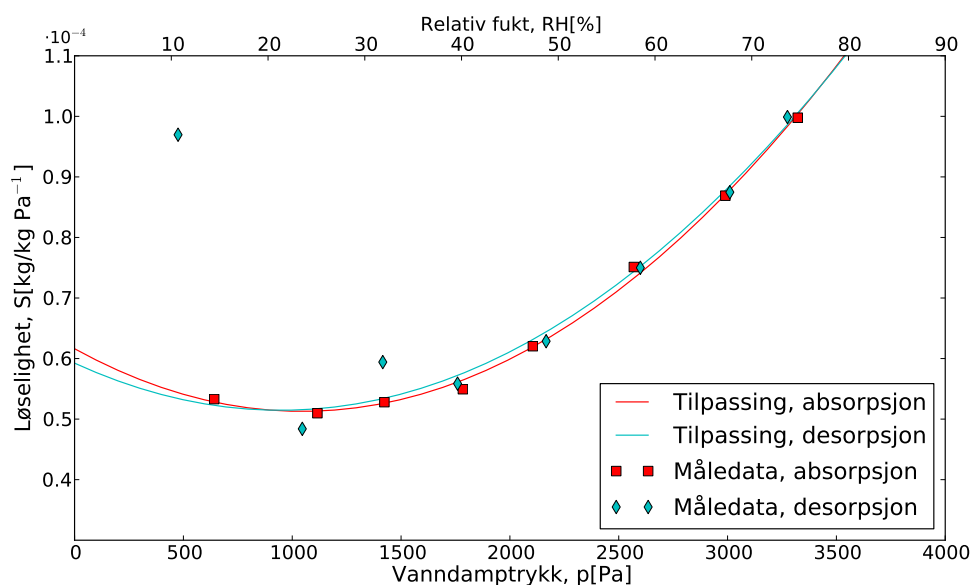
### 6.1 Karakterisering av svelleband

#### 6.1.1 Løselighet

Løseligheten er beregnet ved hjelp av målt likevektskonsentrasjon og likning (2). For fuktigheter under 30 %RH tar det typisk 2-3 ganger lenger tid før en oppnår likevekt, i forhold til fuktigheter over 30 %RH.

Løseligheten er plottet mot vanndamptrykket i figur 24. Målepunkta er tilpasset en andregradslikning,  $S = a_s p^2 + b_s p + c_s$ , der  $S$  er løseligheten,  $p$  er vanndamptrykket og  $a_s$ ,  $b_s$  og  $c_s$  er konstanter. Koeffisientene fra tilpassingen er gitt i tabell 3.

På grunn av usikkerhet (se kap 7.6) i målepunktet ved 10 %RH for desorpsjon, er dette målepunktet utelatt i tilpassingen.



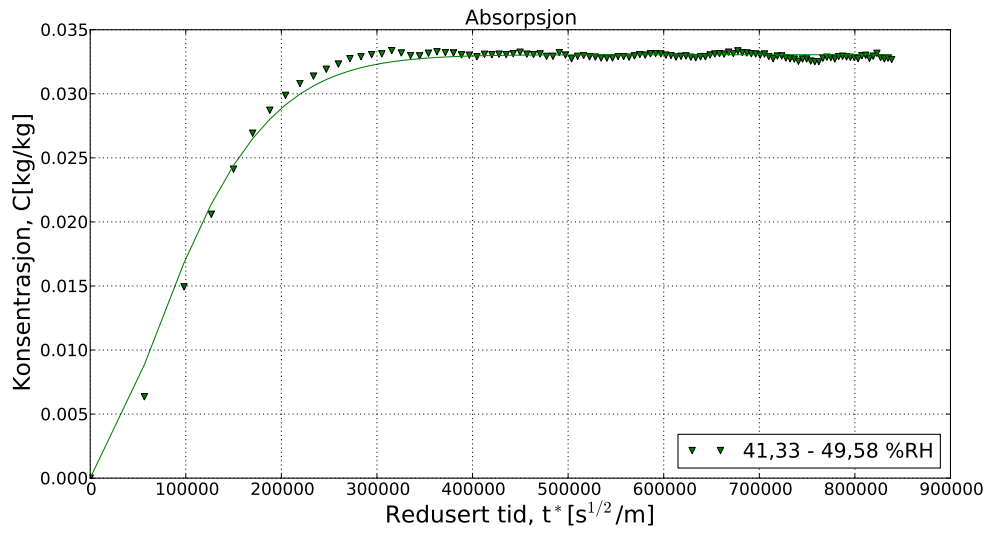
Figur 24: Løselighet som funksjon av vanndamptrykk. Målepunktene er tilpasset en andregrads likning. For desorpsjon er det første målepunktet utelatt i andregrads-tilpassingen

#### 6.1.2 Diffusjonskoeffisienter

Diffusjonskoeffisientene ble funnet ved å kurvetilpasse absorpsjon og desorpsjonsmålingene vist i vedlegg C, til likning (12). Figur 25 viser målte data for fuktsteget 40 - 50 %RH med tilpasset kurve.

Tabell 3: Koeffisienter for andregradstilpasset løselighet

Koeffisient	$a_s$	$b_s$	$c_s$
Absorpsjon	$9,46 \cdot 10^{-12}$	$-1,98 \cdot 10^{-8}$	$6,16 \cdot 10^{-5}$
Desorpsjon	$8,69 \cdot 10^{-12}$	$-1,64 \cdot 10^{-8}$	$5,92 \cdot 10^{-5}$



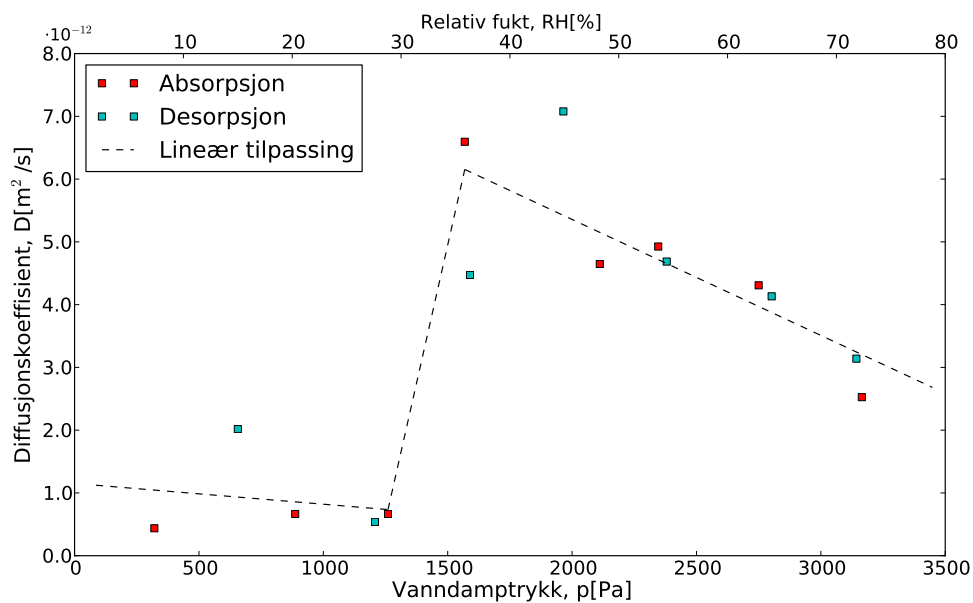
Figur 25: Eksempel på absorpsjonskurve som er tilpasset til likning (12)

Diffusjonskoeffisientene er plottet som funksjon av vanndamptrykket i figur 26, og tilpasset til kurver på formen  $y = a_D p + b_D$ . Kurven er tilpasset målte diffusjonskoeffisienter for både absorpsjon og desorpsjon.

Koeffisientene fra lineærtilpassningen er gitt i tabell 4 med vanndamptrykket koeffisientene gjelder for.

Tabell 4: Diffusjonskoeffisienter som funksjon av partielt vanndamptrykk

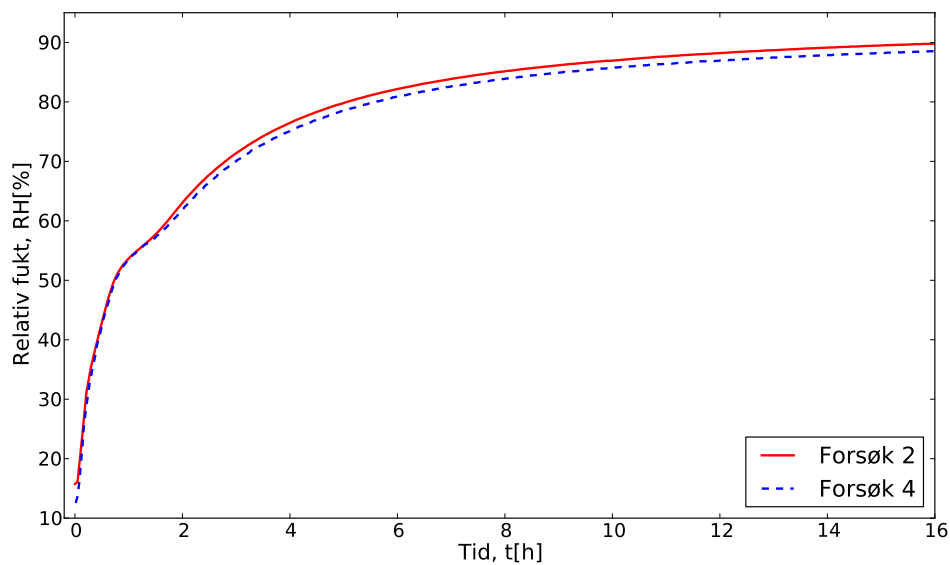
Vanndamptrykk, [Pa]	$a_D$	$b_D$
320 - 1260	$-3,08 \cdot 10^{-16}$	$1,15 \cdot 10^{-12}$
1260 - 1569	$1,76 \cdot 10^{-14}$	$-2,14 \cdot 10^{-11}$
1569 - 3165	$-1,85 \cdot 10^{-15}$	$9,05 \cdot 10^{-12}$



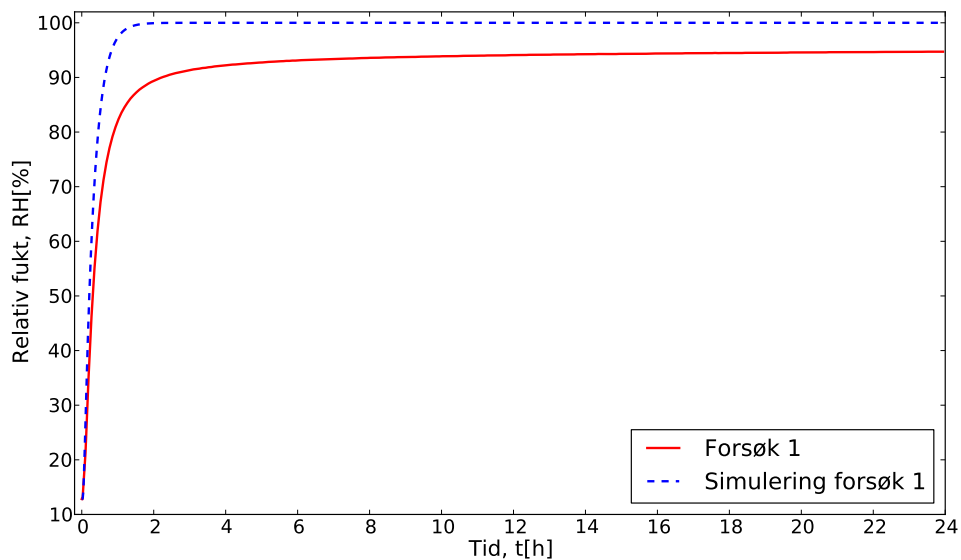
Figur 26: Diffusjonskoeffisienter som funksjon av vanndamptrykk

## 6.2 Fuktopptaksmålinger og numeriske beregninger

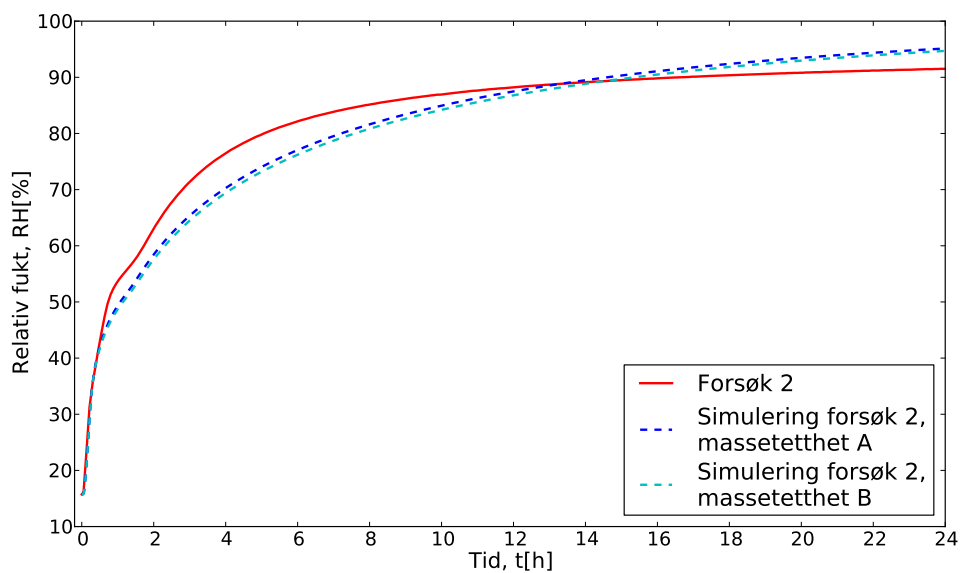
Figur 27 sammenligner fuktopptaksmålingene for forsøk 2 og 4, der svullebandet er plassert henholdsvis på bunn og på metallstifter. Figur 28-30 sammenligner fuktopptaksmålinger og numeriske beregninger for forsøk 1-3.



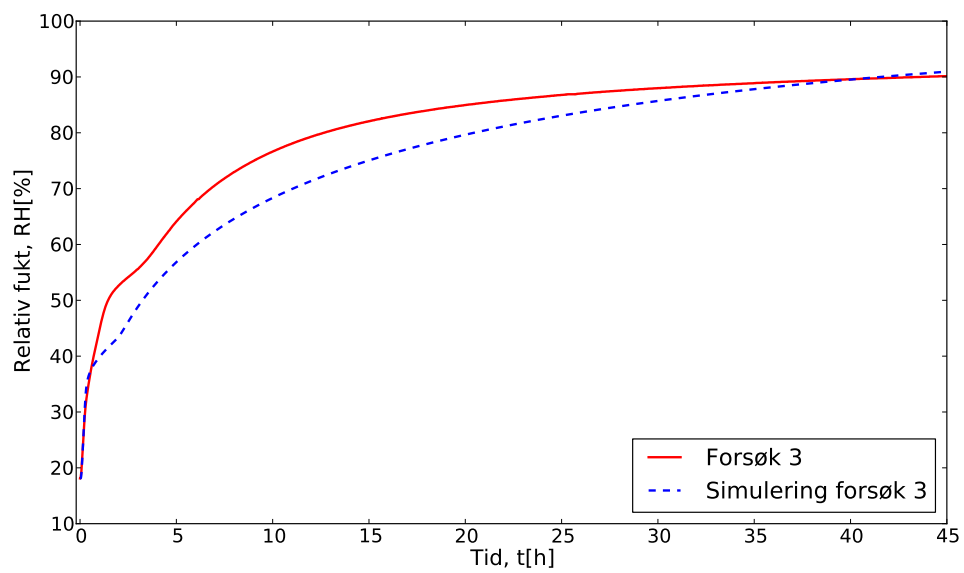
Figur 27: Sammenlikning av forsøk 2 og 4. I forsøk 2 er svullebandet plassert på bunn, mens det er plassert på metallstifter i forsøk 4



Figur 28: Målte resultat og simuleringer for forsøk 1



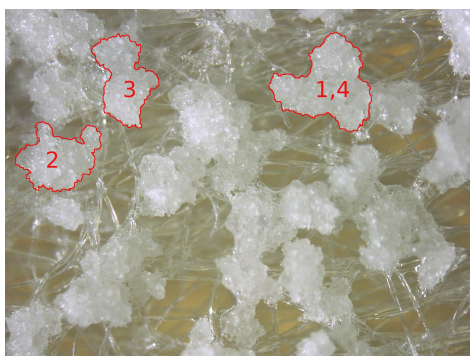
Figur 29: Målte resultat og simuleringer for forsøk 2, med tre svullebandprøver plassert i testkammeret



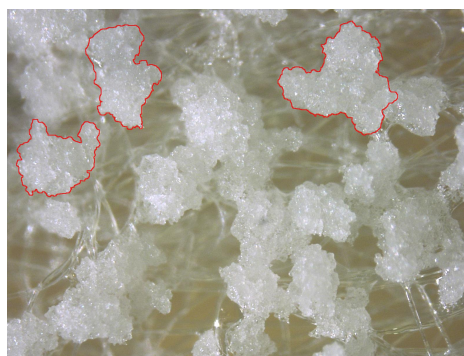
Figur 30: Målte resultat og simuleringer for forsøk 3, med ni svullebandprøver plassert i testkammeret

### 6.3 Mikroskopering

Figur 31- 34 viser bilder av det samme området av svellebandet med 200 ganger forstørrelse. I figur 31 er svellepulverpartiklene som arealet er målt på markert. Areal 1, 2 og 3 er målt med et dataprogram som automatisk identifiserer kantlinjene til partikkelen. Areal 4 er målt ved å manuelt velge kantlinjene til svellepulverpartikkelen.



Figur 31: Svelleband ved 10,0 %RH. Konturene til svellepulverpartiklene som arealet ble målt på er markert med rødt



Figur 32: Svelleband ved 30,1 %RH



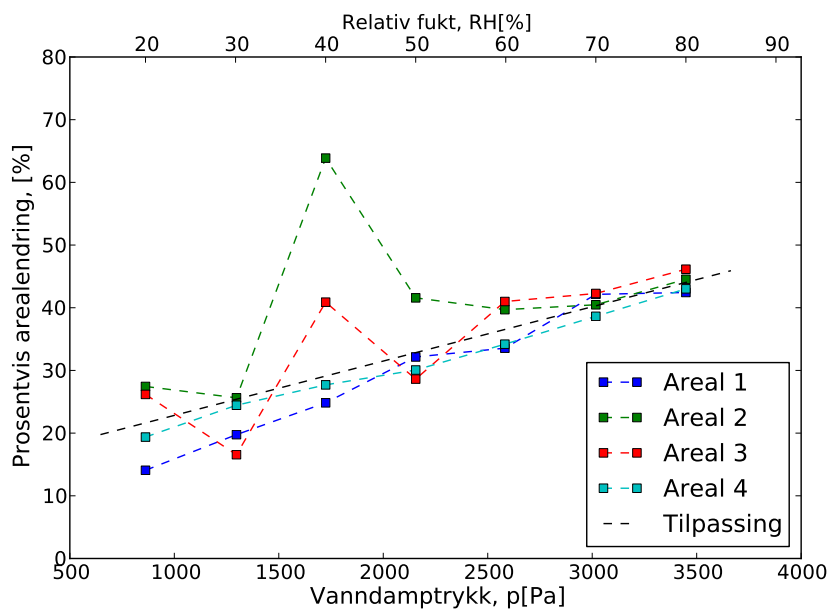
Figur 33: Svelleband ved 50,0 %RH



Figur 34: Svelleband ved 80,0 %RH

Figur 35 viser prosentvis endring av arealet til svellepulverpartikkelen mot relativ fukt.





Figur 35: Prosentvis arealendring i forhold til vanndamptrykk

## 7 Diskusjon

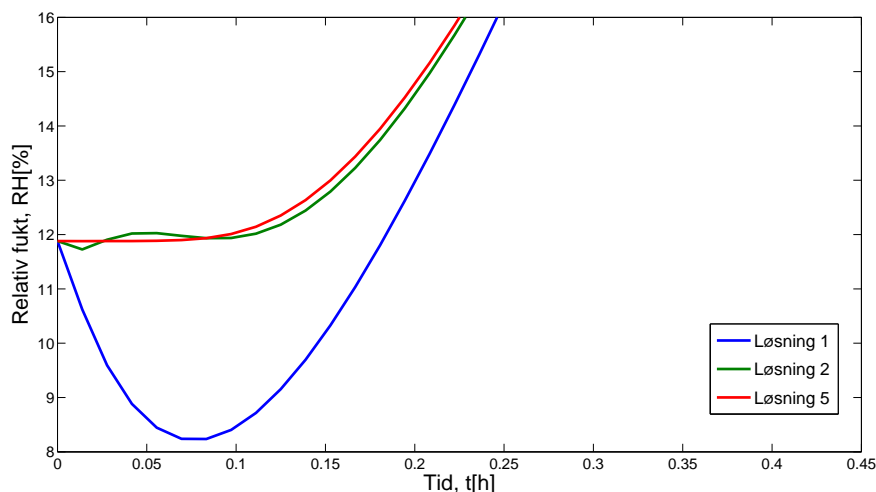
### 7.1 Innledning

I dette kapittelet blir resultatene som er presentert i kapittel 6 diskutert. I kapittel 7.2 vil analysen av elementtetthet for den numeriske modellen bli gjennomgått. I kapittel 7.3 vil karakteriseringen av svellebandet bli diskutert. Resultatene fra fuktopptaksmålingene blir gått gjennom i kapittel 7.4.1 sammen med numeriske beregninger for forsøkene. Resultatene fra mikroskoperingen blir diskutert i kapittel i kapittel 7.5 og forskjellige kilder til usikkerhet i målingene blir diskutert i kapittel 7.6.

### 7.2 Sensitivitetsanalyse for numerisk modell

#### 7.2.1 Elementtetthet for polymerfilm og luft

Simuleringene av modellen som består av to subdomener, et for polymerfilmen og et for luft, viser seg å være svært avhengig av antall elementer. Et utvalg av løsningene, med forskjellig elementtetthet er vist i figur 36 for de første 27 min av simuleringen.



Figur 36: Utsnitt av første 27 min av simuleringen. Løsningsnummeret tilsvarer antall elementer i høyden for subdomenet for polymerfilmen

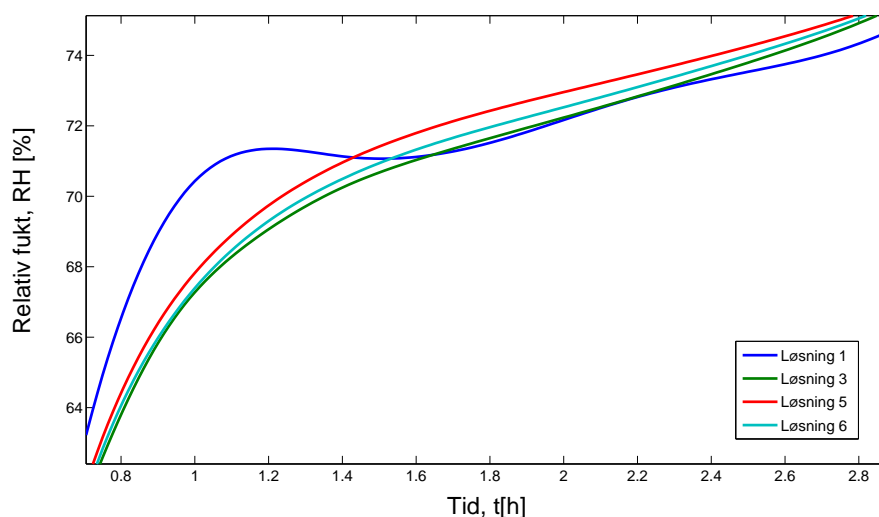
Løsning 1 i figur 36 tilsvarer simuleringen med ett element i høyden for subdomenet til polymerfilmen, løsning 2 to elementer i høyden, og løsning 5 fem elementer i høyden. Figur 36 viser at løsning 1 og 2 synker i RH

umiddelbart etter start og kommer av at en har for mange frihetsgrader for løsningen når en har få elementer i en retning, i dette tilfellet høyden på subdomenet. Løsning 5 har ikke denne effekten, og RH stiger fra start. Ved å endre elementtettheten videre fra fem til seks elementer i høyden får en endring i løsningen på  $3 \cdot 10^{-3} \%RH$ . Denne endringen er liten i forhold til usikkerheten i andre parametere. Subdomenet for polymerfilmen må derfor ha en elementtetthet på minst  $525 \text{ el/mm}^2$ , tilsvarende fem elementer i høyden.

Subdomenet for luft har liten innvirkning på resultatene i denne modellen. Ved å endre elementtettheten fra  $0,16 \text{ el/mm}^2$  til  $16 \text{ el/mm}^2$ , ble den største endringen mellom de to løsningene  $1 \cdot 10^{-5} \% RH$ .

### 7.2.2 Elementtetthet for svelleband

Modellen ble så modifisert med et subdomene for svelleband. Området for luft ble delt inn i tre mindre områder for å få gitterstrukturen til å passe med kvadratiske elementer. Området for svellebandet ble plassert 10 mm over bunn i testcellen med en høyde på 0,3 mm og 12,5 mm bredt. Elementtettheten for subdomenet for luft og polymerfilmen ble holdt på henholdsvis ca  $1 \text{ el/mm}^2$  og  $525 \text{ el/mm}^2$ , når svellebandet ble analysert. Forskjellige simuleringer for svellebandet er presentert i figur 37.



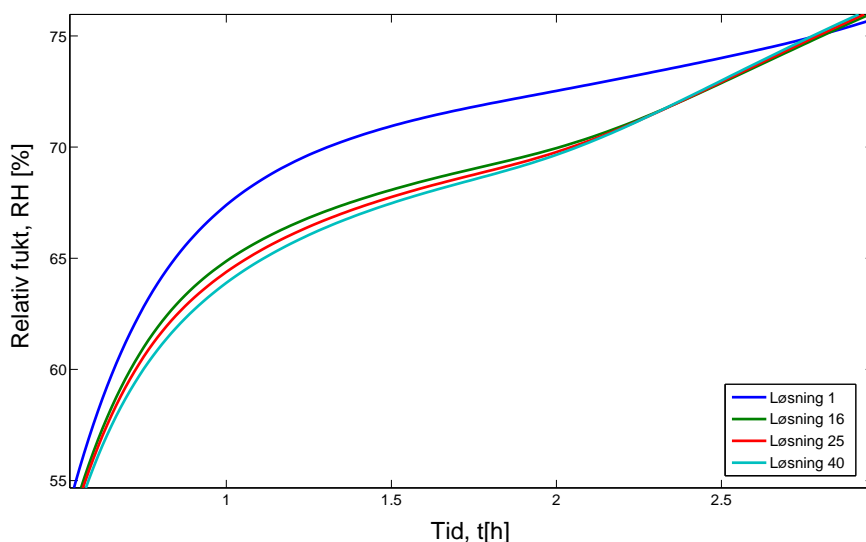
Figur 37: Forskjellig elementtetthet for svelleband. Løsningsnummeret svarer til antall elementer subdomenet for svellebandet har i høyden

Figur 37 viser et utsnitt av simuleringen, mellom 62 og 76 %RH, fordi kurvene ellers var sammenfallende. Løsning 1, 3, 5 og 6 har henholdsvis 1, 3,

5 og 6 elementer i høyden på subdomenet for svellebandet. Kurvene endrer seg mye når en endrer antall elementer i høyden fra 1 til 3 og 5, men da har en forholdsvis stor endring i elementtettheten òg.

Elementtettheten til svellebandet bør være på minst  $400 \text{ el/mm}^2$ , tilsvarende fem elementer i høyden. Simuleringer med høyere elementtetthet ble gjort, men avviket var på  $0,1 \text{ \%RH}$  ved å øke elementtettheten til  $710 \text{ el/mm}^2$  og seks elementer i høyden.

Elementtettheten for subdomenet for luft ble så evaluert ved å øke elementtettheten gradvis. Endringene her er først og fremst en vertikal forskyvning av kurven rundt  $64 \text{ \%RH}$ , og ser ut til å konvergere ved økende elementtetthet. Elementtettheten for subdomenet for luft er her henholdsvis 1, 16, 25 og  $40 \text{ el/mm}^2$  for løsning 1, 16, 25 og 40. Et utsnitt av kurvene er vist i figur 38.



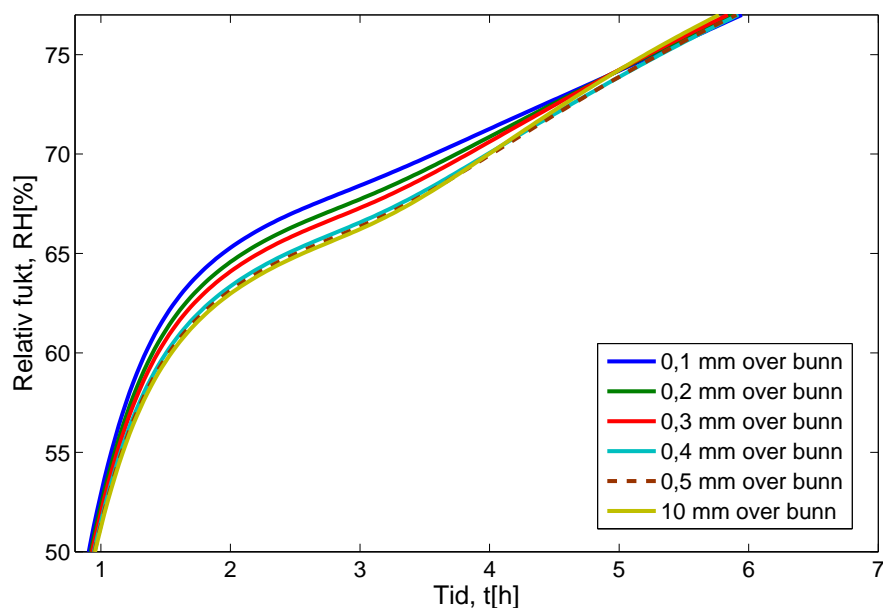
Figur 38: Forskjellig elementtetthet for luft. Løsningsnummeret svarer til den minste elementtettheten til subdomenet for luft

Den største forskjellen mellom løsning 25 og 40 er på  $0,56 \text{ \%RH}$ . Ved å øke elementtettheten til  $50 \text{ el/mm}^2$ , endrer løsningen seg maksimalt  $0,3 \text{ \%RH}$  ved  $59 \text{ \%RH}$ . Elementtettheten til luft bør være  $25 \text{ el/mm}^2$ . Ytterligere økning av elementtettheten, for subdomenet for luft, har liten hensikt siden en får ut lite ny informasjon og det går betydelig ut over løsningstiden til modellen.

### 7.2.3 Plassering av svelleband i numerisk modell

En kjørte flere simuleringer der elementtettheten på hvert område ble holdt så konstant som mulig. Plasseringen av svellebandet ble så endret gradvis fra

å ligge helt på bunn av modellen, til være 10 mm over bunn. Figur 39 viser et utsnitt av simuleringene mellom 50 og 70 %RH, siden kurvene utenfor dette området har sammenfallende form. Figur 39 viser at løsningene tilsynelatende konvergerer mot en løsning der svellebandet er plassert en viss høyde over bunn.



Figur 39: Utsnitt av simuleringer med forskjellig plassering over bunn

Figur 27 viser forsøk 2 og 4, der tre svelleband var plassert henholdsvis løst på bunn av testcellen i forsøk 2 og på metallstifter i forsøk 4. Metallstiftene var ca 10 mm høye. Forløpet til ca. 55 %RH er sammenfallende for forsøkene. Etter 55 %RH er avviket mellom forsøk 2 og 4 ca 2 %RH, og ser ut til å holde seg konstant ved økende fukt. Likevektsfuktigheten for forsøk 4 er ca. 2 %RH lavere enn for forsøk 2.

Svellebandprøvene i forsøk 4 var plassert nærmere fuktsensoren i testcellen. Konsentrasjonen av vann, og dermed fuktigheten, rundt sensoren kan derfor være mindre fordi svellebandet absorberer fukt lokalt rundt svellebandet, og dermed sensoren. Denne effekten ser ut til å inntre ved 60 %RH, når vandamptrykket begynner å bli høyt.

Differansen i målt fuktighet kan og komme av at fordelingen av fuktighet i testkammeret ikke nødvendigvis er uniform. Den målte fuktigheten i testkammeret vil derfor variere med plasseringen av sensoren over bunn i testcellen. At dette ikke gir utslag før fuktigheten når ca 50 %RH, er antage-

ligvis fordi konsentrasjonsgradientene er større ved lav relativ fukt og vannet vil fordele seg raskere.

En annen ting som bidrar til forskjellen i mengden svelleband i forsøkene og initialbetingelsene. Forsøk 4 har ca 2 mg mer svelleband plassert i kammeret enn forsøk 2, og vil derfor ta opp mer fukt. Sammenligning av forsøk 3 og 11 (vedlegg E), som har en differanse på ca 2 mg, viser imidlertid ikke den samme differansen i fukt.

Det er dermed grunnlag for å plassere området for svellebandet i simuleringene over bunn i modellen. Avstanden mellom svellebandet og bunnen i modellen ble valgt til 10 mm fordi det er enklere å lage kvadratiske gitterelementer for et stort område og fordi en unngår kanteffekter fra et tynt subdomene.

Den nødvendige elementtettheten som ble funnet er gitt i tabell 5. Det er ikke oppgitt noe minste antall elementer i høyden for subdomenet for luft, fordi en har tilstrekkelig med elementer i høyden når elementtettheten er tilfredsstillt, forutsatt at en har kvadratiske gitterelementer.

Tabell 5: Oversikt over nødvendig elementtetthet

Subdomene for	Elementtetthet [el/mm <sup>2</sup> ]	Antall elementer i høyden [el/mm <sup>2</sup> ]
Luft	25	-
Polymerfilm	525	5
Svelleband	400	6

Sensitivitetsanalysen ble gjort med diffusjon- og løseligheten fra [22]. Ved å bruke diffusjon- og løselighetskoeffisienter fra karakteriseringen til å simulere forsøkene, kan den nødvendige elementtettheten endre seg på grunn av ulineariteten i diffusjonskoeffisienten.

Ved å doble antall elementer i høyden og bredden, for subdomenet til svellebandet i den numeriske modellen til forsøk 2, ble det funnet at løsningen endret seg maksimalt 0,8 %RH. Det vil derfor være tilstrekkelig å bruke elementtettheten som er oppgitt i tabell 5 for subdomenet til svellebandet.

## 7.3 Karakterisering av svelleband

### 7.3.1 Løselighetskoeffisient

Løseligheten er plottet mot partielt vandamptrykk i figur 24 og tilpasset til en andregradsfunksjon. I figur 24 ser en at løseligheten til svellebandet tilsynelatende synker i starten før den stiger igjen. For relativ fukt over 15 %RH stemmer tilpassingen til løseligheten godt overens med målepunktene.

En sorpsjonsmode som beskriver en økende løselighet som funksjon av vanndamptrykk er BET-mode. BET-mode er en kombinasjon av Flory-Huggins- og Langmuir-mode sorpsjon. Moden er beskrevet i kapittel 2.4 og gjelder for sterkt hydrofile polymerer. I denne moden vil vannmolekylene først lokalisere seg på spesifikke plasser, korresponderende til polare grupper. Ved høyere vanndamptrykk vil gruppedannelse mellom vannmolekylene være den dominerende prosessen. For svullebandet er det en dominans av Flory-Huggins-sorpsjon.

Siden løseligheten er beregnet fra massekonsetrasjonen til svullebandet, får løseligheten enheten  $[kg/kg \cdot Pa]$ . Beregningene i COMSOL krever at koeffisientene som nyttes har samme enhet og må dermed regnes om til volumkonsentrasjon ved hjelp av massetettheten for svullebandet, siden koeffisientene for luft og polymerfilmen har enheter fra volumkonsentrasjon. Løseligheten ble multiplisert med tettheten til svullebandet for å få riktig enhet.

For parti A og B av svullebandet som ble brukt i fuktopptaksmålingene og i karakteriseringsmålingene er det oppgitt forskjellig masse per areal i databladet. Oppgitt masse per areal er større for parti B enn A, mens tykkelsen er den samme. Massetettheten ble ansatt til å være masse per areal/tykkelse og er dermed størst for parti B

Differansen mellom de oppgitte verdiene gir en differanse i tettheten på i underkant av 6 %. Løseligheten til svullebandet får en forskyvning oppover dersom massetettheten øker, og nedover dersom massetettheten blir mindre. Endringen i løseligheten tilsvarer den relative endringen i massetetthet.

Dersom differansen i oppgitt masse per areal skyldes en større mengde svellepulver i svullebandet vil likevektskonsentrasjonen være større for parti B enn for parti A. Endringen i oppgitt masse i databladet kan òg skyldes at svullebandet fra parti B har blitt målt ved en høyere relativ fukt enn parti A. Det er ikke oppgitt hvilken temperatur eller relativ fukt massen har blitt målt ved. Komponentene i svullebandene er forøvrig oppgitt til å være de samme, men endringer i produksjonsmetoden kan ha endret tettheten.

Volumet til svullebandet vil øke på grunn av svellingen til svellepulveret og massen vil øke på grunn av absorpsjon av vann. Det er blitt målt en eksponentiell økning i massen til svullebandet, for fukt over 30 %RH (se vedlegg H). Endringen i volum er funnet til å være lineær.

En økende massetetthet vil bety at løseligheten til svullebandet vil øke mer enn funnet i figur 24. Siden en har brukt massekonsentrasjon ved beregning av løseligheten, trenger en kun ta hensyn til endringen i volum. Volumet til svellepulveret er økende og en har derfor en lavere løselighet enn den som er vist i figur 24. Endringen i volum, og dermed løselighet, er størst ved høy relativ fukt.

### 7.3.2 Diffusjonskoeffisient

Et eksempel på målt absorpsjon og tilpassing til likning (12), er vist i figur 25, for intervallet 40-50 %RH. Tilpassingen ligger over de første målepunktene og er sammenfallende ved ca 75 % av metningskonsentrasjonen før tilpassingen er lavere enn målepunktene ved høyere konsentrasjon. Den beregnede diffusjonskoeffisienten vil på grunn av denne tilpassingen være for høy for de første målepunktene. Alle absorpsjons og desorpsjonsmålingene og tilpassingen til likning (12) er vist i vedlegg C.

Trenden i desorpsjonsmålingene er den samme som er observert i absorpsjonsmålingene. Fra 30-40 %RH øker diffusjonskoeffisienten med i underkant av 10 ganger. For desorpsjonsmålingene er det et målepunkt mindre enn for absorpsjonsmålingene, fordi det er praktisk vanskelig senke fuktigheten i klimaskapet til 0 %RH med dette måleoppsettet.

Diffusjonskoeffisienten til svellebandet ble tilpasset med en steg-funksjon som er vist i figur 26. Koeffisientene fra tilpassingen er gitt i tabell 4.

Ved beregning av diffusjonskoeffisienten er tykkelsen som er oppgitt i databladet brukt i formel (12), og det er ikke tatt hensyn til svellingen til svellebandet. Det er ikke oppgitt hvilken temperatur og luftfuktighet tykkelsen til svellebandet er målt ved, noe som kan antas å gi utslag på tykkelsen siden diffusjon inn og ut av svellebandet er en relativt hurtig prosess.

Dersom en kurvetilpasser måledataene til likning (12), vil beregnet diffusjonskoeffisienten være lavere om en legger vekt på de første målepunktene i forhold til målepunktene når svellebandet går mot likevekt. Beregnet diffusjonskoeffisient er et gjennomsnitt for fuktintervallet den er målt over og ble plottet for gjennomsnittet av start og slutfuktigheten for måleintervallet.

Ved å bruke start- eller slutfuktigheten vil en observere at steget i diffusjonskoeffisienten for absorpsjon kommer ved et høyere vanndamptrykk enn diffusjonskoeffisienten for desorpsjon.

Ved å beregne diffusjonskoeffisienten med forskjellige tykkelser for de ulike fuktstegene, har det vist seg at endringen i diffusjonskoeffisienten ikke er større enn variasjonen i beregnet verdi med vektingen til tilpassingen. En diskusjon av tykkelsens påvirkning av diffusjonskoeffisientene er gjort i vedlegg D.

Målt absorpsjon og desorpsjon er en diffusjonsprosess som ikke følger Ficks lov og svellepulveret er derfor et ikke-fickisk materiale. Dette kan skyldes svellepulveret, som er den substansen i svellebandet som endrer seg mest når det tar opp vann, eller en kombinasjon av svellepulveret og polymer- og papir-lagene som innkapsler svellepulveret.



## 7.4 Fuktopptaksmålinger og numeriske beregninger

### 7.4.1 Fuktopptaksmålinger

Det ble utført i alt 11 forskjellige fuktopptaksmålinger med testcellen. Kun fire av eksperimentene blir diskutert siden det er små avvik mellom målinger med samme mengde svelleband plassert i testkammeret. Fuktopptakskurver for alle forsøkene er gitt i vedlegg E, mens en oversikt over eksperimentene som blir diskutert er vist i tabell 6.

Et eksperiment var uten svelleband i kammeret, mens resten hadde henholdsvis tre og ni svelleband i kammeret. Et forsøk ble utført med svellebandet plassert på metallstifter.

Tabell 6: Oversikt over fuktopptaksmålingene

Forsøk nr:	Prøveobjekt
1	Polymerfilm
2	Polymerfilm og tre svelleband
3	Polymerfilm og ni svelleband
4	Polymerfilm og tre svelleband på stifter

Fuktighet og temperatur i testkammeret blei logget med programmet Multi-humiview v.1.6. For forsøk en og to ble det registrert data hvert femte minutt. Siden den relative fuktigheten endrer seg forholdsvis raskt i starten, ble det langt mellom målepunktene i begynnelsen. For resten av forsøkene ble det derfor registrert data hvert minutt.

Alle forsøkene blei utført med den samme støpte polymerfilmen. Tykkelsen til filmen ble funnet ved å måle filmen med mikrometerskrue og ta gjennomsnittet av målingene. Tykkelsen ble funnet til å være 0,148 mm og denne ble brukt i de numeriske beregningene.

Klimaskapet som ble brukt til målingene er av typen Vötsch V4034. Den nedre grensen for relativ fukt klimaskapet kan opprettholde er oppgitt i databladet til 20 % ved 30 °C, men klimaskapet stabiliserer seg ofte på en verdi høyere enn dette. På grunn av dette endrer en startbetingelsene i de numeriske beregningene ut i fra hvilket forsøk som skal simuleres. Temperaturen i klimaskapet varierer med  $30,2 \pm 0,4$  °C i løpet av forsøket. Temperaturen i testcellen har en variasjon på  $30,2 \pm 0,2$ °C. Temperaturen i de numeriske beregningene ble tatt som et gjennomsnitt av den målte temperaturen i fuktopptaksmålingene.

I forsøkene med svelleband ble testcellen demontert mellom hvert forsøk og svellebandprøvene byttet ut med nye prøver.

### 7.4.2 Numeriske beregninger

Geometriske modeller til numeriske beregninger er vist i vedlegg F. Elementtettheten til de ulike subdomenene ble endret til å tilfredsstille nødvendig elementtetthet funnet i tabell 5.

Mengden svulleband som blir simulert i de numeriske beregningene blir justert ved å endre høyden av subdomenet for svullebandet etter formelen

$$h = \frac{m_{\text{torr}} h_0}{\pi r^2 \rho} \quad (37)$$

der  $m_{\text{torr}}$  er mengden svulleband,  $h_0$  er gjennomsnittlige tykkelsen på svullebandet,  $r$  er radiusen til svullebandet og  $\rho$  er masse per areal.

Initialbetingelsene, målt tørrvekt til svullebandet og beregnet bredde og høyde på subdomenet som ble brukt i de numeriske beregningene er gitt i tabell 7.

Tabell 7: Oversikt over initialbetingelser og størrelse på subdomenet for svullebandet

Forsøk nr:	RH [%]	T [°C]	Mengde svulleband [mg]	Bredde subdomene [mm]	Høyde subdomene [mm]
1	12,82	30,14	-	-	-
2	15,74	30,30	141,834	21,70	0,31
3	18,11	30,27	427,955	37,50	0,32
4	12,75	30,36	145,428	21,70	0,32

Diffusjonskoeffisienten til svullebandet ble implementert i den numeriske modellen ved hjelp av verdier fra tabell 4, som COMSOL brukte en lineær interpoleringsfunksjon på. Koeffisienter for polymerfilmen og løseligheten for svullebandet er gitt i tabell 8.

Tabell 8: Koeffisienter for numeriske beregninger.  $D$  og  $S$  for polymerfilmen og  $a$ ,  $b$  og  $c$  for løseligheten til svullebandet

Koeffisient	Verdi	Enhet
$D_{\text{Polymerfilm}}$	$7,17 \cdot 10^{-12}$	$m^2/s$
$S_{\text{Polymerfilm}}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$m^2/s$
$a$	$9,46 \cdot 10^{-12}$	$\text{kg/kg Pa}^{-3}$
$b$	$-1,98 \cdot 10^{-8}$	$\text{kg/kg Pa}^{-2}$
$c$	$6,16 \cdot 10^{-5}$	$\text{kg/kg Pa}^{-1}$

I de numeriske beregninge for forsøk 2 og 3 ble løselighet- og diffusjonskoeffisienten som ble funnet i karakteriseringen brukt.

### 7.4.3 Sammenligning av fuktopptak og numeriske beregninger

Figur 28 viser målte resultater og numeriske beregninger for forsøk 1. Den numeriske beregningen får mot likevekt ved 100 %RH, mens fuktopptaksmålingen går mot likevekt ved ca 95 %RH. En kan og observere at knekkpunktet der fuktigheten går mot likevekt er skarpere for den numeriske beregningen enn for målt fuktopptak.

Overensstemmelsen mellom målt fuktopptak og numerisk beregning for forsøk 1 er god for fuktigheter opp til 75 %RH. Etter 75 %RH stiger fuktigheten i beregningen til 100 %RH, mens forsøket går mot en likevekt ved ca 95 %RH. Mulige grunner til denne forskjellen vil bli diskutert i kapittel 7.6.

Figur 29 viser forsøk 2 og to simuleringer for forsøk 2 med massetettheten fra parti A og parti B. Simuleringen med massetetthet fra parti A blir heretter kalt simulering A, og simuleringen med massetetthet fra parti B blir kalt simulering B.

Lavere massetetthet i parti A gjør at løseligheten blir mindre for simulering A, og svellebandet vil dermed ta opp mindre vann. Fuktigheten i rundt svellebandet vil dermed bli høyere.

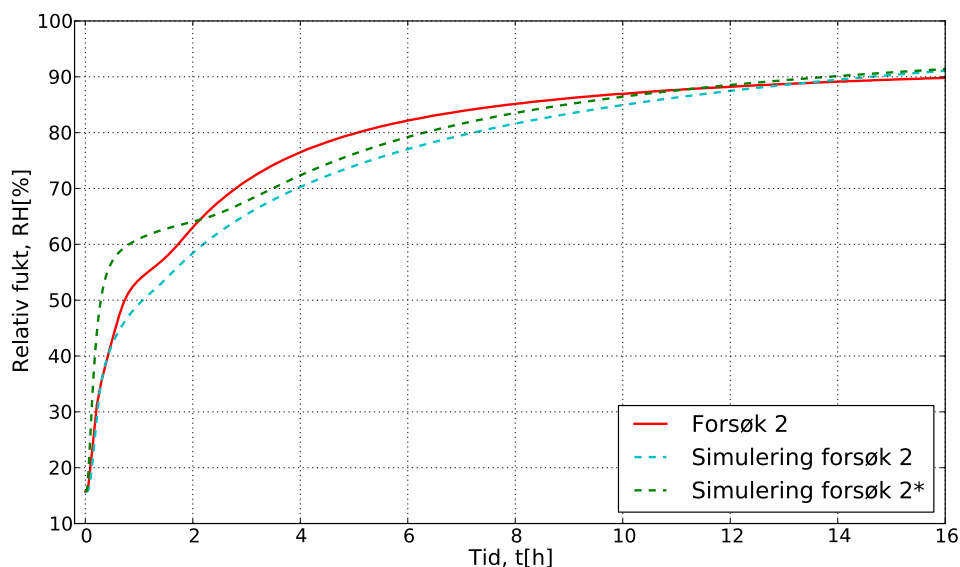
Avviket mellom simulering A og B inntreffer først etter 45 %RH, hvor simuleringen har et knekkpunkt og er maksimalt 0,9 %RH. Løselighetene for simuleringene har en differanse på 6 %. Avviket mellom løselighetene blir ikke sett på som hovedgrunnen til differansen mellom fuktopptakskurvene og simuleringene.

Resten av de numeriske beregningene er gjort med massetettheten fra parti A, siden denne simuleringen ligger nærmest de målte resultatene.

Simuleringen til forsøk 2 får en lavere stigningstakt ved ca 45 %RH, mens fuktopptakskurven stiger til ca 54 %RH før stigningen avtar. I simuleringen øker stigningen ved ca 53 %RH, mens den for fuktopptakskurven øker ved ca 57 %RH. Stigningen ved 53 %RH er ikke like markert som i fuktopptakskurven, og simuleringen viser en lavere fukt i kammeret.

Den numeriske beregningen og simuleringen har en differanse i fukt på 7 %RH fra ca 1 time til 5 timer før den synker til ca 4 %RH ved 8 timer. Differansen mellom fuktopptakskurven og simuleringen blir mindre, før kurvene krysser ved 90 %RH. Simuleringen ser ut til å gå mot et likevektspunkt som ligger høyere enn fuktopptakskurven.

Endringer i diffusjonskoeffisienten kan endre knekkpunktet til simuleringen. En lavere diffusjonskoeffisient for lav relativ fukt indikerer at vann diffunderer senere inn i svellebandet. Når vann ikke blir absorbert i svellebandet



Figur 40: Fuktopptakskurver og simulering med gamle og nye transportkoeffisienter

vil det være mer fukt tilgjengelig i testkammeret som dermed har høyere relativ fukt. Overgangen fra den lave og den høye diffusjonskoeffisienten kan øg komme ved høyere relativ fukt, som diskutert i avsnitt 7.3.2.

En sammenligning av forsøk 2 og beregninger med data fra litteraturen [22] og fra karakteriseringsmålingene er vist i figur 40. Simulering forsøk 2\* er med transportkoeffisienter hentet fra en tidligere oppgave [22].

Diffusjonskoeffisienten fra [22] er tilpasset med en konsentrasjonsavhengig eksponentialfunksjon, mens løseligheten har vært en konsentrasjonsavhengig tilpassing.

Den numeriske beregningen med nye data viser en bedre overensstemmelse med fuktopptakskurven for de første 3 timene av simuleringen. Simuleringen har de samme knekkpunktene som er observert i de fuktopptaksmålingene.

Fuktopptakskurve og numerisk beregning for forsøk 3 er vist i figur 30. Simuleringen har et knekkpunkt ved ca 37 %RH og fuktopptakskurven har et tilsvarende knekkpunktet ved ca 52 %RH. Differansen mellom forsøk 3 og simuleringen er større enn differansen mellom forsøk 2 og simuleringen for forsøk 2.

De numeriske beregningene og målte resultata ser ut til å ha en forskyvning på ca 10 %RH og en forskyvning i tid på ca 1 time. Fuktigheten i simuleringen ser ut til å stige raskere en fuktopptakskurven opp til 37 %RH.

Ved å bruke en diffusjonskoeffisient som er tilpasset mot fukten ved likevekt, i stedet for snittet av start- og slutfukten, vil den maksimale endringen i simuleringen være under 2 %RH for forsøk 2. Differansen vil komme i løpet av de 2 første timene til simuleringen og gir utslag ved at knekkpunktet til simuleringen kommer litt høyere. Simuleringene vil være sammenfallende etter 2 timer.

## 7.5 Mikroskopering

Figur 31-34 viser bilder av svellepulverpartikler på ene halvdel av svellebandet. På grunn av svellingen og den diffuse bakgrunnen er det vanskelig å definere grensene til svellepartiklene klart på bildene. En ser likevel at det projiserte arealet til de forskjellige partiklene øker. Bildene er tatt mens vann blir absorbert i partiklene.

For lav fukt er avstanden mellom partiklene stor og partiklene kan ekspandere tilnærmet fritt. Ved høyere fukt vil partiklene ekspandere inn i hverandre og volumendringen er størst i retningen med minst motstand.

Figur 35 viser den prosentvise endringen av projisert areal for svellepulverpartiklene som er markert i figur 31. En kan anta at svellingen til partiklene er uniform i alle retninger dersom partiklene får ekspandere fritt og at arealendringen er proporsjonal med endringen i volum. En ser da en lineær økning i arealet, og dermed volumet til svellepulverpartiklene.

Volumendringen til svellepulveret er hovedsaklig relatert til løseligheten til svellebandet. Svellepulveret vil absorbere mer vann når volumet øker, men dersom den relative volumøkningen til svellebandet er større enn den relative masseøkningen, vil løseligheten til svellebandet bli mindre.

Steget i diffusjonskoeffisienten og den eksponentielle økningen i løseligheten ved 30 %RH blir ikke observert som en tilsvarende volumendring i svellepulveret. Diffusjonskoeffisienten er et mål på hastigheten vann diffunderer inn i svellebandet, og ved økt overflateareal vil mengden vann som diffunderer inn være større. Den målte arealendringen til svellepulveret viser ikke noen sammenheng mellom økning i overflateareal og målt diffusjons-koeffisient.

Det observerte steget i diffusjonskoeffisienten til svellebandet kan derfor skyldes vekselvirkningen mellom polymeren og vannmolekylene som utløses når konsentrasjonen av vann i polymeren eller vandamptrykket rundt polymeren når et visst nivå.

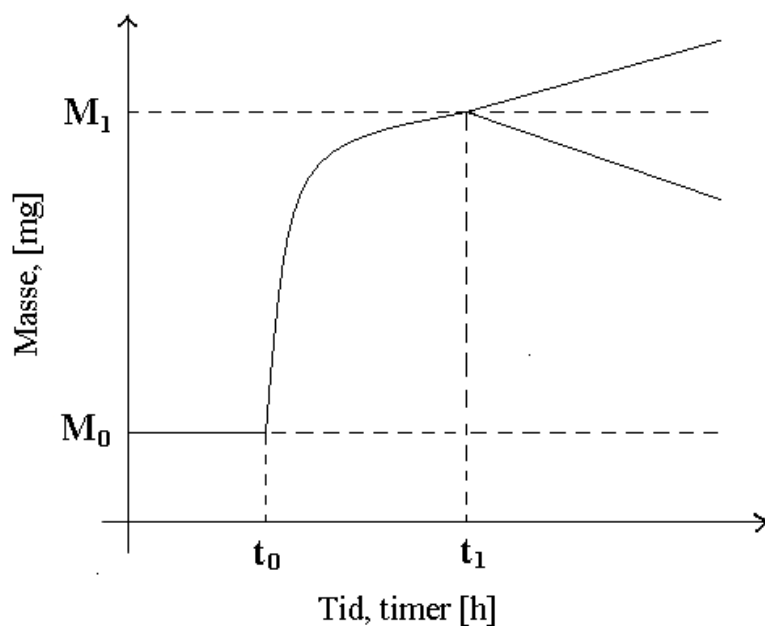
## 7.6 Kilder til usikkerhet

### 7.6.1 Mikrometervekten

#### Avdrift av vekten på grunn av endring i fukt

På grunn av endringer i den relative fukten under karakterisering av svellebandet, ble det sett på om dette påvirker presisjonen til vekten. Driften til vekten kan karakteriseres som en todelt prosess der en har en stor initiell drifting som forekommer i løpet av en til to timer etter at fuktsteget ble introdusert, men også en langsom drift som forekommer etter den initielle driften. Den initielle driften var forutsigbar ettersom et positivt fuktsteg ville føre til positiv endring i målt masse og et negativt fuktsteg ville redusere målt masse.

Figur 41 illustrerer hvordan vekten kan reagere på en fuktøkning i ved tiden  $t_0$ .



Figur 41: Illustrasjon av avdrifta

Tiden fra  $t_0$  til  $t_1$  i figur 41 er typisk mellom en og to timer. Driften fortsetter fra  $t_1$  til en setter på et nytt fuktsteg, og har ikke noen klare tendenser til å flate ut. Aluminiumsfoliene som ble brukt til måling av driften til vekten, hadde massen ( $M_0$ ) på henholdsvis 1591 mg og 1044 mg.

Differansen  $M_1 - M_0$  ble målt til å være maksimalt  $\pm 0,07$  mg, for begge måleseriene. For enkelte fuktsteg ble det funnet at den initielle driften var

større for måleserien med 1591 mg, men ingen klare tendenser ble funnet.

Driftprosess nummer to var ikke forutsigbar hverken i størrelse eller vektendring. I gjentatte forsøk var det tilfeldig om vekten økte eller minket i løpet av testen. Dette kan tyde på at vekten er avhengig av fukthistorikken, og dermed gjør det vanskelig å bestemme driften.

Usikkerheten forbundet med den initielle driften til vekten vil gi små, om noen, utslag i karakteriseringen. Alle fuktstegene hadde en total masseendring på over 12 mg og den initielle driften til vekten gir dermed et bidrag til usikkerheten på  $\pm 0,6$  %.

Driften til vekten, etter den initielle driften, vil kunne gi et likevektspunkt som ligger høyere eller lavere enn det reelle likevektspunktet. Siden fuktopptaket i svellebandet er en hurtig prosess, vil en nå likevekt før driften til vekten blir signifikant.

Den initielle driften til vekten bidra med en relativt liten usikkerhet i den beregnede diffusjonskoeffisienten.

### **Andre bidrag til usikkerhet**

Det ble observert at vekten i enkelte tilfeller, når labview-programmet som styrer vekten ble stanset og startet igjen, gjorde et steg i målingene. Dette kan ha gi en offset i måleseriene. Det er ikke gjort systematiske målinger på dette.

### **7.6.2 Fuktighet og temperatur**

Sensorene som ble brukt til å måle fuktighet inne i testcellen og i kuppelen til karakteriseringsmålingene, var av typen SENSIRION SHT75 COMSens relativ fuktsensor. Potensiell målefeil oppgitt fra produsent er gitt i vedlegg G.

Den relative fuktigheten blir målt med en kapasitiv sensor, mens temperaturen blir målt med en bånd-gap sensor. Usikkerheten i temperaturmålingene er  $\pm 0,4$  °C ved 30 °C, mens den er  $\pm 2$  % for fuktighet i området 10-90 %RH. For fuktigheter utenfor dette området stiger usikkerheten lineært til  $\pm 4$  %RH.

### **7.6.3 Måling av tykkelse av polymerfilm til numeriske beregninger**

Tykkelsen til polymerfilmen i fuktopptaksforsøkene ble målt med en digitalt avlesbar mikrometerskrue for bruk i de numeriske beregningene. Polymerfilmen kan lett komprimeres lokalt under trykket fra mikrometerskruen som

ble benyttet til å måle tykkelsen. Den målte tykkelsen som blir brukt i beregningene kan derfor være for liten i forhold til den faktiske tykkelsen, og dermed gi utslag i de numeriske beregningene.

#### 7.6.4 Beregning av transportkoeffisienter

Det er flere kilder til usikkerhet i beregning av diffusjonskoeffisienten. Tilpassingen kan bli vektet mot de første målepunktene eller mot målepunktene ved likevekt. Alle målepunktene har i tilpassingen blitt vektet like mye, men siden det er flere målepunkter ved likevekt er tilpassingen bedre ved likevekt, enn i starten av fuktopptaket.

Ved tilpassing til fuktopptakskurvene er det brukt en konstant tykkelse for svellebandet. På grunn av svellingen til svellepartiklene ved økende fukt, vil tykkelsen til svellebandet øke. I vedlegg C er det benyttet økende tykkelse for diffusjonskoeffisienten og for fuktigheter under 30 %RH er endringen i diffusjonskoeffisienten neglisjerbar. For høyere fukt øker diffusjonskoeffisienten maksimalt ca  $0,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , dersom en antar at svellebandet blir lineær tykkere. Endringen i diffusjonskoeffisient påvirker ikke den grunnleggende trenden til diffusjonskoeffisienten.

Den oppgitte tykkelsen til svellebandet bla antatt til å ha en målefeil på  $\pm 5\%$ . Ved å øke tykkelsen som ble brukt i likning 12, ble diffusjonskoeffisienten større for alle målepunktene. Den største endringen var for målepunktene ved 30 og 40 %RH, og var på henholdsvis  $1,1 \cdot 10^{-13} [\text{m}^2/\text{s}]$  og  $1,1 \cdot 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$ . Diffusjonskoeffisienten økte imidlertid med 10 ganger fra 30 - 40 %RH fremdeles. En reduksjon av tykkelsen på 5 %, ga en tilsvarende negativ endring av diffusjonskoeffisienten.

Den beregnede diffusjonskoeffisienten er et gjennomsnitt for fuktintervallet den ble målt på. Det ble derfor valgt å bruke et snitt av start- og slutfukten til hvert fuktsteg ved kurvetilpassing av diffusjonskoeffisienten. Ved å bruke startfukten, vil diffusjonskoeffisienten bli forskjøvet mot venstre for absorpsjon og mot høyre for desorpsjon. Ved å bruke slutfukten vil diffusjonskoeffisienten bli forskjøvet mot høyre for absorpsjon og mot venstre for desorpsjon.

Det har vist seg å gi små utslag på simuleringen om en bruker slutfuktigheten i stedet for et gjennomsnitt av start- og slutt-fukt. For forsøk 2 er differansen maksimalt på 0,8 %RH. Etter 1,5 timer vil simuleringene være sammenfallende. Det har derfor ikke signifikant betydning for simuleringen om en bruker startfukt, slutfukt eller et gjennomsnitt.

Driften til vekten er diskutert tidligere, mens måling av bidrag fra mekaniske vibrasjoner i klimaskapet er avhengig av at andre kilder til usikkerhet er minimerte. En må da måle med konstant temperatur og fuktighet i kam-



meret. Klimaskapet vil ha en variasjon rundt ønsket temperatur på  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  og ønsket fukt på  $\pm 1,1\% \text{RH}$ , noe som gjør nøyaktige målinger vanskelige.

Løseligheten vil ha størst usikkerhet på grunn av måleusikkerheten til sensorene og mikrometervekten, ved lav relativ fukt. En liten endring i målt konsentrasjon eller fuktighet vil gi en relativt stor endring i løseligheten.

### 7.6.5 Usikkerhet ved mikroskopering

Det er flere kilder til usikkerhet i mikroskoperingen. I løpet av tiden svellepulveret trengte for å komme i likevekt etter et fuktsteg i klimaskapet førte vibrasjoner fra klimaskapet til at mikroskopet kom ut av fokus. Mikroskopet kommer ut av fokus ved at avstanden mellom linsen og prøveobjektet blir endret eller at endring av forstørrelsen.

Designet av linsen til mikroskopet gjør at innstilt forstørrelse holder seg stabil, selv under vibrasjoner. Avstanden mellom linsen og prøveobjektet justeres med en skure på mikroskopstativet som justerer høyden på platen prøvene plasseres på. Designet til stativet gjør at vibrasjoner kan endre posisjonen til prøveplaten og få mikroskopet ut av fokus.

Dersom det er kun avstanden mellom linsen og prøveobjektet som blir endret på grunn av vibrasjoner, vil det være tilstrekkelig å justere den tilbake slik at avstanden mellom linsen og prøveplanet blir den samme for alle bildene.

Dersom en tar utgangspunkt i en svellepartikkel når en justerer fokus, vil denne endre størrelse når fuktigheten til omgivelsene endrer seg. Fokus vil derfor ikke ha samme avstand mellom linsen og prøveplaten ved forskjellig fukt. For å være sikker på at avstanden mellom linsen og prøveplaten er den samme på alle bildene må en ha et referansepunkt som ikke endrer seg med relativ fukt.

I mikroskoperingen ble fokus satt til å være på en svellepartikkel og avstanden for fokus vil derfor endre seg med svellingen til partiklene. I tillegg var svellepulverpartiklene på polymerstrukturen i undersøkelsene. Ved 10 %RH var svellebandet strukket mellom tapebitene, mens det ble observert at svellebandet krummet seg ved høyere relativ fukt. Det ble dermed et mellomrom mellom prøveplaten og svellebandet.

Videre undersøkelser av svellingen til svellepulverpartiklene bør gjøres med demping under mikroskopstativet slik at mekaniske vibrasjoner fra klimaskapet blir minimerte og svellepulver i løs form slik at en kan velge fokuspunkt på prøveplaten.

Beregningen av arealet for svellepartiklene var vanskelig på grunn av diffuse overganger fra svellepartiklene til polymerstrukturen partiklene var festet til. Ved bruk av dataprogram til å beregne areal ble arealet valgt manuelt i

tilfeller der konturene til svellepartiklene er svært diffuse og det valgte arealet inkluderer andre partikler.

## 7.7 Oppsummering av resultat

I analysen av elementtetthet for de forskjellige subdomenene ble det funnet tilstrekkelig elementtetthet for gitterstrukturen. Siden subdomenene for polymerfilmen og svellebandet er tynne i forhold til den totale størrelsen til modellen krever områdene et visst antall elementer i høyden. For polymerfilmen ble den relative fuktigheten i testkammeret mindre i starten av simuleringen dersom en ikke hadde tilstrekkelig med elementer på subdomenet. Subdomenet for luft kunne i dette tilfellet ha en lav elementtetthet uten at det gav utslag i simuleringen.

For simulering av forsøk med svelleband i testkammeret ble det sett på elementtetthet for subdomenet for svelleband og for luft. I tillegg ble det sett på plasseringen av subdomenet for svelleband. På grunn av den sterkt ulineære diffusjonskoeffisienten, må subdomenet for svellebandet ha en relativt stor elementtetthet for å få et tilfredsstillende resultat. Luften måtte og ha større elementtetthet i forhold til simuleringene uten svelleband.

Det ble nytt et tilpasset måleoppsett for å karakterisere transportkoeffisientene til svellebandet. Diffusjonskoeffisienten ble funnet til å ha en steg-funksjon som ikke har blitt beskrevet i litteraturen før. Løseligheten ble tilpasset med en andregrads-funksjon og passer godt overens med målepunktene for løseligheten. Sorpsjonsmoden ble funnet til å være BET-mode sorpsjon, med en dominans av Flory-Huggins.

For forsøket uten svelleband ble det funnet at overensstemmelsen mellom målt fuktopptak og numeriske beregninger er god. Avvikene mellom målte data og numeriske beregninger kan ses som en skarpere overgang mot likevekt for simuleringen og likevektspunktet til fuktopptaksmålingene ligger ca 5 %RH under likevektspunktet til de numeriske beregningene. Forskjellen i likevektspunkt for forsøk 1 og tilhørende simulering skyldes mest sannsynlig en systematisk målefeil i fuktsensorene. Det ble funnet at forskjellen i overgangen kan skyldes at tykkelsen brukt i de numeriske beregningene kan være mindre enn den reelle.

Måleusikkerheten til sensorene er fra produsent oppgitt til å være 4 %RH ved 100 %RH. I tillegg er det i en tidligere oppgave[19] blitt observert at sensorene akklimatiserer seg ved lengre opphold i samme klima. Den systematiske målefeilen til sensoren blir dermed mindre etter lang tid.

Forsøkene med svelleband har en god overensstemmelse mellom numeriske beregninger og fuktopptakskurver til 42 %RH for forsøk 2 og 37 %RH for forsøk 3. Avvikene i målt fuktopptak og numeriske beregninger er maksimalt

ca 8 %RH for begge forsøkene og differansen avtar når fuktigheten går mot likevekt. For forsøk 3 observerer en i tillegg en tidsforskyvning på ca 1 time som ikke er observert for forsøk 2.

De numeriske beregningene med koeffisientene fra karakteriseringsmålingene viser en betydelig forbedring i forhold til tidligere numeriske beregninger.

I mikroskoperingen ble det funnet kilder til usikkerhet som kan påvirke måleresultatene. Ved å måle direkte på løst svellepulver kan en del av kildene til usikkerhet minimeres.

Den observerte økningen i projisert areal viste ingen sammenfallende trend med observert endring i transportkoeffisientene for partiklene det ble målt på. To av partiklene viste en økning i projisert areal ved 40 %RH, som ikke ble observert på den siste partikkelen. Økningen i volumet til svellepulvret ved 40 %RH er sammenfallende med endringen i diffusjonskoeffisient.

## 8 Konklusjon

Følgende konklusjoner kan trekkes fra dette arbeidet:

- Diffusjons- og løselighetskoeffisienter er funnet for svulleband for høy-spenningskabler ved å anvende en ny metode for karakterisering av materialer med konsentrasjonsavhengig fuktopptak.
- Løselighetskoeffisienten er ulineær og i god overensstemmelse med tidligere målinger. Løseligheten blir beskrevet av BET-mode sorpsjon, med en dominans av Flory-Huggins-mode. Diffusjonskoeffisienten som er funnet har en signifikant ulineær karakteristikk ved 30-40 %RH som ikke har blitt beskrevet i tidligere arbeid.
- Måling av svelling med mikroskop viser en tilnærmet lineær karakteristikk som funksjon av relativ fukt. Dette kan ikke forklare endringen i løselighet og diffusjonskoeffisient som funksjon av relativ fukt.
- Numeriske beregninger, med bruk av transportkoeffisientene fra karakteriseringen, viser en god overensstemmelse med målt fuktopptak for det samme systemet. Metoden og måleoppsettet er dermed etablert for karakterisering av konsentrasjonsavhengig vannopptak i polymeriske kabelmaterialer.



## Symbolliste

$C$ :	Konsentrasjon, [kg kg <sup>-1</sup> ]
$C_s$ :	Metningskonsentrasjon, [kg kg <sup>-1</sup> ]
$D$ :	Diffusjonskoeffisient, [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\bar{D}$ :	Gjennomsnittlig diffusjonskoeffisient, [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$D_0$ :	Diffusjonskoeffisient ved uendelig temperatur, [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$D_{app}$ :	Tilsynelatende diffusjonskoeffisient, [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$E_D$ :	Aktiviterinsenergien til diffusjonsprosessen, [kJ mol <sup>-1</sup> ]
$E_p$ :	Aktiviterinsenergien til permeasjonsprosessen, [kJ mol <sup>-1</sup> ]
$F$ :	Fluks, [kg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
$G$ :	Tidsavhengig dimensjonslaus parameter, []
$\Delta H_s$ :	Varmen av et mol treng for å løse seg i polymeren, [kJ mol <sup>-1</sup> ]
$h_0$ :	Gjennomsnittlig tykkelse av svelleband, [m]
$l$ :	Tykkelse av polymerfilm, [m]
$l_v$ :	Faseovergangsvarme, [J kg <sup>-1</sup> ]
$M$ :	Vekt, [kg]
$M_\infty$ :	Vekt etter uendelig tid, [kg]
$M_{torr}$ :	Tørrvekt, [mg]
$P$ :	Permeabilitet, [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> ]
$\bar{P}$ :	Gjennomsnittlig permeabilitet, [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> ]
$P_0$ :	Permeabilitetskoeffisient ved uendelig temperatur, [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> ]
$p$ :	Partialtrykk, [Pa]
$p_0$ :	Atmosfæretrykk, [atm]
$p_s$ :	Metningstrykk, [Pa]
$R$ :	Gasskonstanten, [J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]
$r$ :	Radius av utstansa prøver svelleband, [m]
RH:	Relativ fukt, [%]
$R_s$ :	Spesifikk gasskonstant for vann, [J kg <sup>-1</sup> ]
$S$ :	Løselighetskoeffisient, [kg m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup> ]
$\bar{S}$ :	Gjennomsnittlig løselighetskoeffisient, [kg m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup> ]
$S_0$ :	Løselighetskoeffisient ved uendelig temperatur, [kg m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup> ]
$T$ :	Temperatur, [K]
$T_0$ :	Referansetemperatur, [K]
$t$ :	Tid, [s]
$t^*$ :	Redusert tid, [s <sup>-1/2</sup> m <sup>-1</sup> ]
$V$ :	Volum, [m <sup>3</sup> ]
$v(T)$ :	Spesifikk volum, [m <sup>3</sup> ]
$\rho$ :	Masse per areal, [g m <sup>2</sup> ]

## Referanser

- [1] SINTEF project memo. *Oversikt over problemer med ulike kabeltyper og kabelutstyr*, 2008.
- [2] J. Sletbak. A theory of water tree initiation and growth. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98(4):1358-1365, July 1979.
- [3] H.Faremo E.Ildstad. Importance of relative humidity on water treeing in xlpe cable insulation. ISH 91, 1991.
- [4] S. Hvidsten S. Nordås, S.M Hellesø. Measurements and modelling of water diffusion in water blocking tapes for high voltage extruded cables. *Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials ISEIM*, 2008.
- [5] S.K. Roy M. Chanda. *Plastics Technology Handbook*. Marcel Dekker AG, 1997.
- [6] S.Roberts B.Duncan, J.Urghart. Review of measurement and modelling of permeation and diffusion in polymers. Rapport DEPC MPR 012, National Physical Laboratory, Division of Engineering and Process Control, 2005.
- [7] A.T Graham F.L Buchholz. *Modern Superabsorbent Polymer Technology*. Wiley-vch, 1998.
- [8] Xuejun Fan. Mechanics of moisture for polymers: Fundamental concepts and model study. *International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems*, 2008. EuroSimE 2008.
- [9] Park G.S Crank J. *Diffusion in Polymers*. Academic press, 1968.
- [10] B. Flaconnèche M.H Klopffer. Transport of gases in polymers: Bibliographic review. *Oil & Gas Science and Technology- Rev*, IFP(56):223:244, 2001.
- [11] E. Ildstad. *High Voltage Insulating Materials*. Norges teknisk naturvitenskaplige universitet, Institutt for elkraftteknikk, 2009.
- [12] Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University press, 1956.
- [13] Springer G.S. Shen C. Moisture absorption and desorption of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 10(1):2-20, 1976.

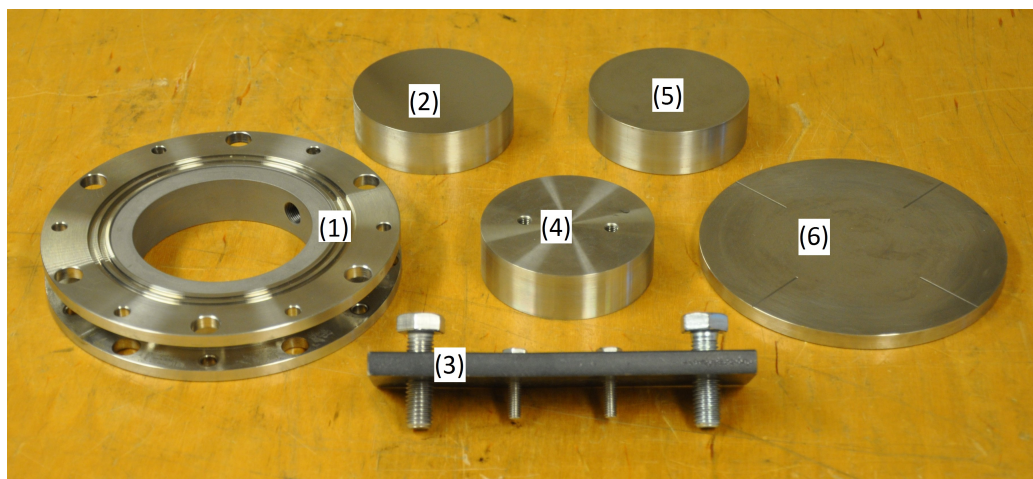
- [14] Hagen S.T. *AC Breakdown Strength of XLPE Cable Insulation: The effect of Artificial Inclusions and Byproducts from Crosslinking Process*. PhD thesis, Universitetet i Trondheim, Norges tekniske Høgskole, Institutt for elkraftteknikk, 1993.
- [15] Yuwen Zhang Amir Faghri. *Transport phenomena in multiphase systems*. Academic press, 2006.
- [16] H. N.Shapiro M. J.Moran. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Wiley, 2004.
- [17] Stepen R. Turns. *Termodynamics: Consepts and applications*. Cambridge University press, 2006.
- [18] Murry L Salby. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. Academic press, 1996.
- [19] T.A Ve. Verifisering av numeriske berkningar av diffusjon av vatn. *Hovedoppgave*, 2008.
- [20] COMSOL AB. *Comsol Multiphysics User's Guide*, 2008.
- [21] Heinrich J.C Pepper D.W. *The finite element method: basic consepts and applications*. Hemisphere Publ. Corp., 1992.
- [22] V.C Henøen. Numerical calculations of water ingress in polymetric cable insulation. *Hovedoppgave*, 2008.
- [23] D.L Logan. *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning, 2012.
- [24] Sensirion AG. *Data sheet for humidity sensor SHT7x*, 2011.



## Vedlegg

### A Støpedeler

Støpedelene til testcellen er vist i figur (Bilde må tas for dette avsnittet). Det er tre forskjellige tetningsbolter til prøveholderen. Figur 42 viser de for-



Figur 42: Støpedeler: (1) prøveholder, (2) tetningsbolt, (3) avdrager, (4) tetningsbolt sett fra undersiden, (5) tetningsbolt, (6) støpelokk

skjellige støpedelene til testcellen.

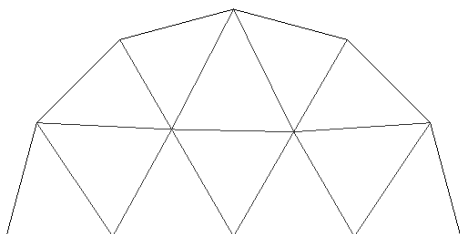
Ved hjelp av tetningsboltene kan en lage polymerfilmer i tykkelsene 0,25 mm, 0,5 mm og 1,0 mm tykkelse. I tillegg trenger en avdrageren på figur 42 (4), for å kunne fjerne tetningsbolten etter at prøven er støpt på. To skruer blir skrudd fast i tetningsbolten, mens to andre skruer presser mot prøveholderen og drar tetningsbolten ut. Det er her viktig å legge en flat metallbit mellom skruene og prøveholderen, slik at det ikke blir laget spor i tetningsflaten på prøveholderen som kan gjøre den utett.

## B Endelig elementmetoden

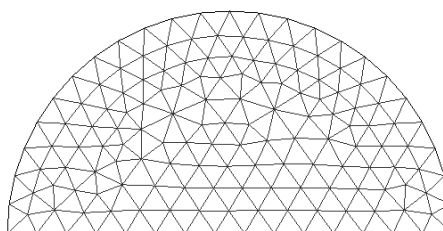
Endelig elementmetoden er en numerisk teknikk som gir en tilnærmet løsning på differensialligninger som modellerer problemer i fysikken og ingeniørarbeider [21]. Metoden krever at problemet er definert på et geometrisk område som kan deles opp i et endelig antall mindre områder, kalt elementer. Elementene kan være trekanter for kurvede områder eller rektangel for rektangulære områder i to dimensjoner, og tetrahedron eller hexahedron i tre dimensjoner. Over hvert endelig element blir den ukjente variabelen tilnærmet ved hjelp av kjente funksjoner, for eksempel lineære eller høyere ordens polynomer som avhenger av den geometriske nodene som bestemmer formen til elementene. Responsen til hvert element blir så uttrykt ved kjente funksjoner og responsen til hele systemet er så tilnærmet ved å samle løsningen til hvert enkelt element[20].

Endelig elementmetoden er kraftig avhengig av oppdelingen av området. Finere oppdeling er nødvendig av to grunner; en geometrisk og en matematisk[21].

Geometrisk: Områder som har kurvede subdomener, er bedre representert med små elementer. Figur (43) viser hvordan et buet område blir modellert når det har for få elementer. Ved å øke antallet elementer vil en få en modellen vist i figur (44).



Figur 43: Halvsirkel med få elementer, grov inndeling



Figur 44: Halvsirkel med mange elementer, fin inndeling

Matematisk: I endelig elementmetoden bruker en funksjoner til å interpolere fra node til node, for å få en løsning på hele elementet. Løsningen på et enkelt element er mer nøyaktig når elementet er lite, i forhold til et større element som en bruker samme interpoleringsfunksjonen på. En får løsning for hele området ved å samle løsningene fra alle elementene i modellen. Løsningen for området blir dermed bedre når elementstørrelsen er liten[21].

## B.1 Modellering i endelig elementmetoden

For å lage en god modell må elementene lages små nok til å gi en brukbare resultater, men grovt nok til at det kan løses. En for fint oppdelt geometri vil gå utover behovet for regnekraft og løsningsstiden vil øke betraktelig. Det er forskjellig konsepter en bør ta i betraktning når en modellerer i endelig elementmetoden for å lage en god modell.

### B.1.1 Optimalisering av elementene

Sideforholdet er definert som forholdet mellom den største siden og den minste siden i et kvadratisk element I mange tilfeller vil feilen i løsningen øke med økende sideforhold. En vil få best resultat når sideforholdet er så nært en som mulig og en har rette vinkler mellom sidene[23].

### B.1.2 Bruk av symmetri

Bruk av symmetri lar en se på et forenklet problem i stedet for hele problemet. En kan dermed bruke en finere oppdeling av elementene med mindre arbeid og regnekraft[23]. For et sylinder-symmetrisk problem vil en se på et plan normalt på symmetriaksen.

### B.1.3 Elementkvalitet

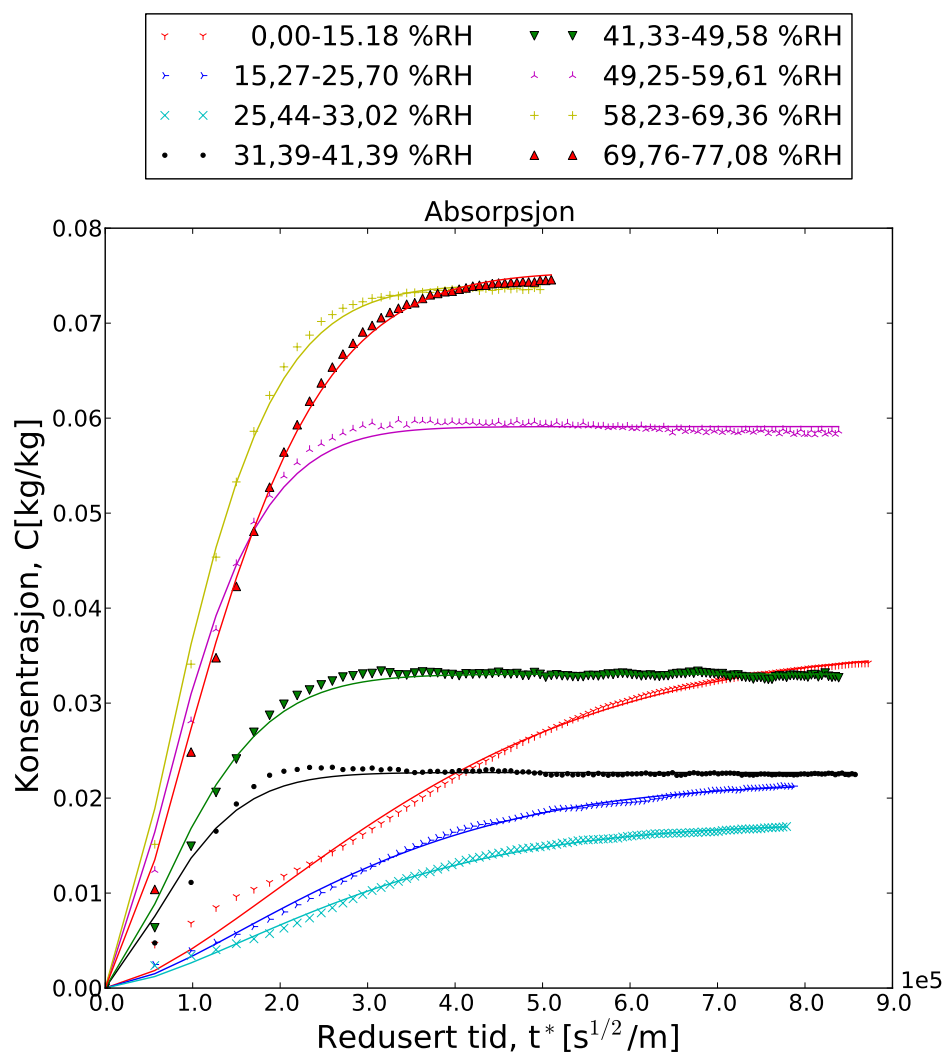
I COMSOL er elementkvaliteten for et rektangulært element definert som

$$q = \frac{4A}{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + h_4^2} \quad (38)$$

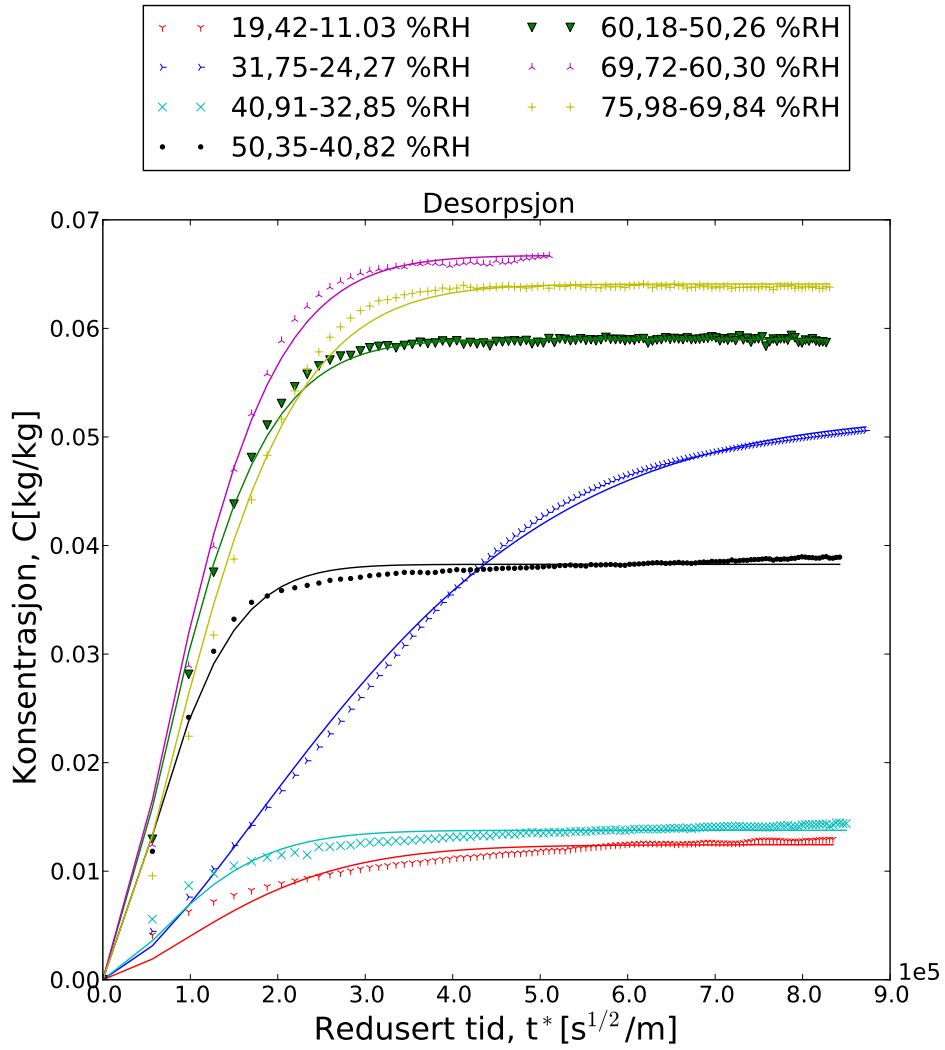
der  $A$  er arealet av elementet og  $h_1, h_2, h_3$  og  $h_4$  er lengden av sidene i elementet. Elementkvaliteten er et tall mellom null og en, og et kvadratisk element har  $q=1$ . Elementer kan få et lavt kvalitetsmål selv om elementformen er god.

## C Absorpsjon og desorpsjonskurver

Resultata fra absorpsjons- og desorpsjons-eksperimentene ble kurvetilpasset til likning (12).



Figur 45: Absorbent vann som funksjon av redusert tid



Figur 46: Desorbert vann som funksjon av redusert tid

## D Svellingens påvirkning av diffusjonskoeffisienten

Flere forskjellige modeller for tykkelsen til svellebandet ble brukt for å se hvordan svellebandets diffusjonskoeffisienter blir påvirket av tykkelsen til svellebandet. Tykkelsen til svellebandet er i databladet oppgitt 0,29 mm og blir antatt å være tykkelsen av tørt svelleband. Diffusjonskoeffisienter beregnet med denne tykkelsen ble satt som referanseverdi. I fuktige omgivelser vil svellebandet ta opp fukt og utvide seg. Det har vist seg vanskelig å måle tykkelsen direkte på svellebandet siden det vil presses sammen dersom det utsettes for trykk.

En forenklet modell for svellingen til svellebandet er å la volumet til vannet som diffunderer inn tilsvare volumendringen i svellebandene. Endringen er gitt av

$$\Delta l = \frac{\Delta m}{v_f} \cdot \frac{1}{\pi r^2 n} \quad (39)$$

der  $\Delta m$  er endringen i masse,  $v_f$  er spesifikt volum for vann og  $n$  er antall svellebandprøver. Tykkelsen til svellebandet ble i denne modellen satt til gjennomsnittet i tykkelsen for et fuktsteg. For det første fuktsteget ble tykkelsen satt til oppgitt tykkelse.

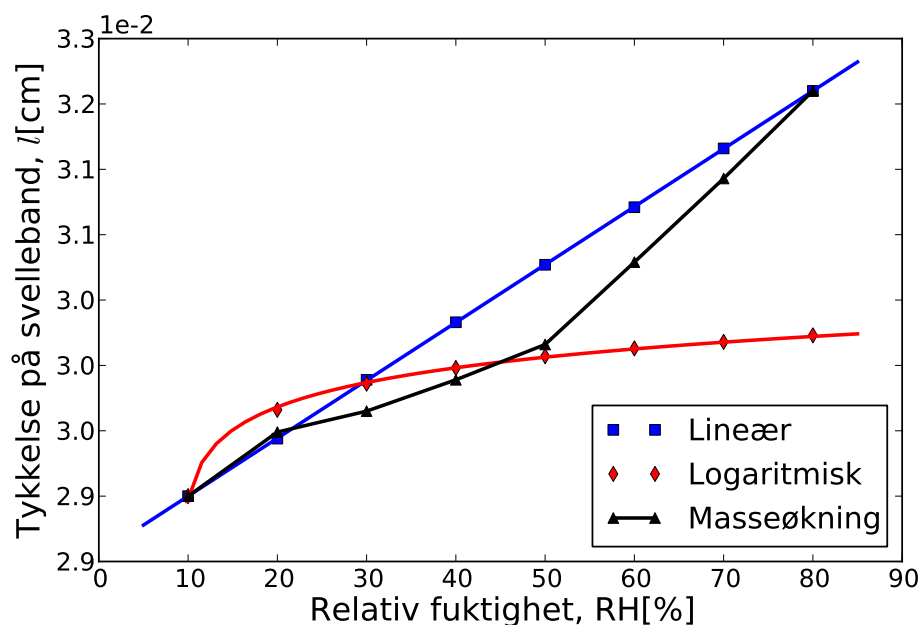
Tykkelsen til svellebandet ble òg modellert ved en logaritmisk økning og en lineær økning. For den logaritmiske modellen ble tykkelsen modellert av funksjonen

$$l = l_0 \left( 1 + \frac{\ln(RH)}{100} \right) \quad (40)$$

der  $l_0$  er tykkelsen oppgitt i databladet. Figur 47 viser tykkelsen til svellebandet som funksjon av fuktighet.

Tykkelsen som ble brukt i de forskjellige modellene er oppgitt i tabell 9.

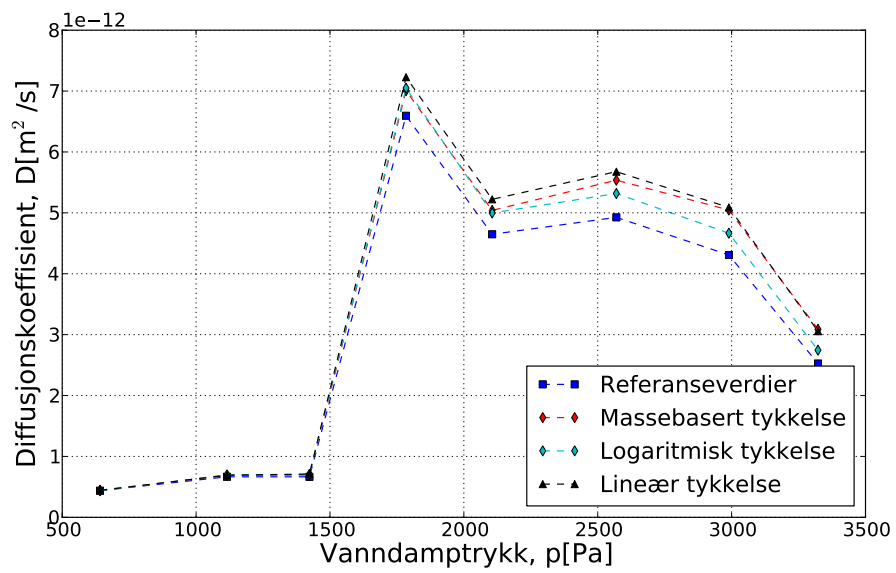
Figur 48 viser at forløpet for diffusjonskoeffisientene ikke endrer seg, selv om en tar hensyn til svellingen til svellebandet. For lave fuktigheter har svellingen liten effekt.



Figur 47: Tykkelse av svulleband brukt til beregning av diffusjonskoeffisient som funksjon av relativ fukt

Tabell 9: Tykkelse til svullebandet

Fuktsteg	Referanse tykkelse [mm]	Masse- endring [mm]	Logaritmisk økning [mm]	Lineær økning [mm]
0-10 %RH	0,2900	0,2926	0,2900	0,2919
10-20 %RH	0,2900	0,2949	0,2966	0,2958
20-30 %RH	0,2900	0,2965	0,2986	0,2997
30-40 %RH	0,2900	0,2989	0,2998	0,3036
40-50 %RH	0,2900	0,3016	0,3007	0,3074
50-60 %RH	0,2900	0,3079	0,3013	0,3113
60-70 %RH	0,2900	0,3143	0,3018	0,3152
70-80 %RH	0,2900	0,3210	0,3023	0,3190



Figur 48: Diffusjonskoeffisienter beregnet med alternativ tykkelse

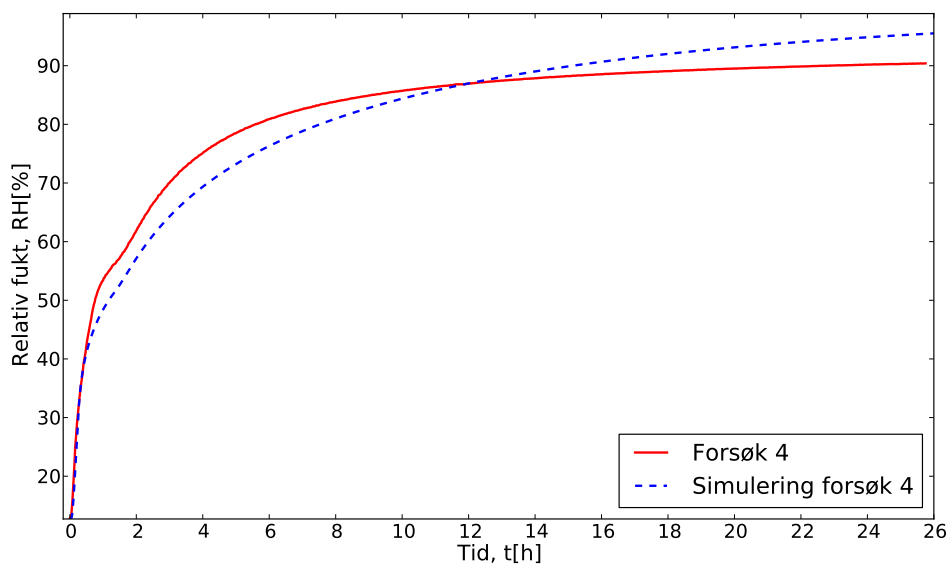


## E Måleresultat fra fuktopptaksforsøk

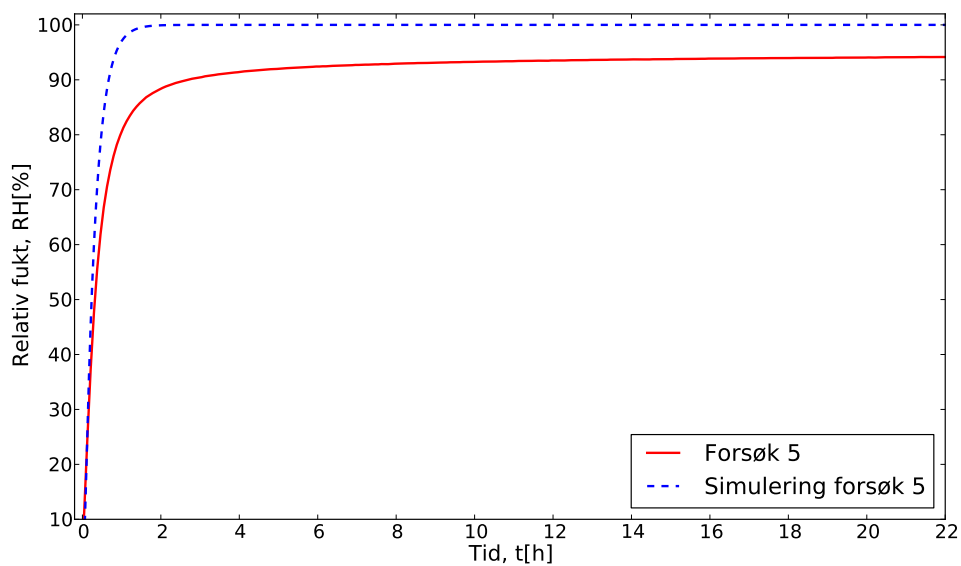
Initialbetingelser for forsøkene som ikke er diskutert tidligere, er gitt i tabell 10. Tørrvekten til svullebandet som ble benyttet i hvert forsøk er også gitt, i tillegg til beregnet høyde og bredde for subdomenet til svullebandet benyttet i numeriske beregninger.

Tabell 10: Oversikt over initialbetingelser

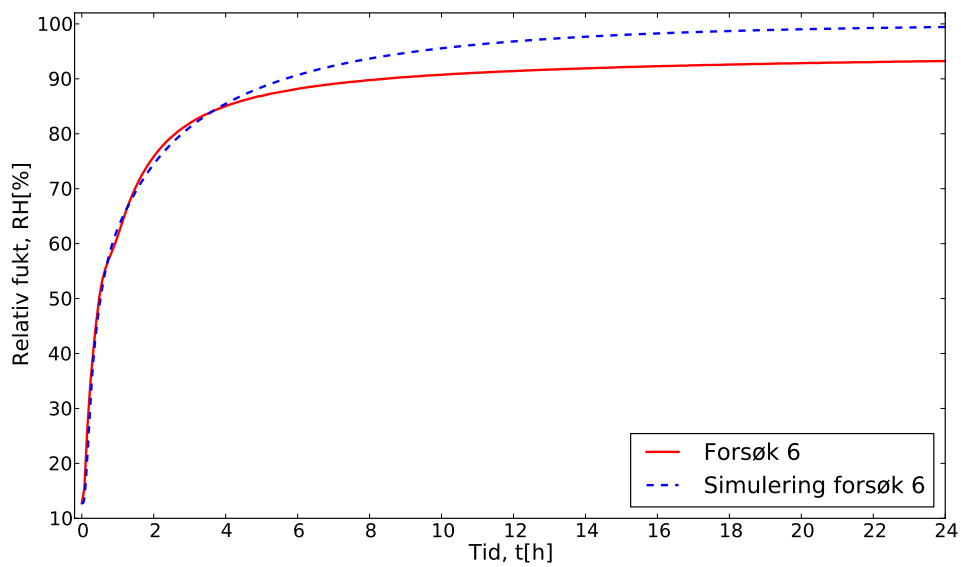
Forsøk nr:	RH [%]	T [°C]	Mengde svulleband [mg]	Bredde subdomene [mm]	Høyde subdomene [mm]
4	12,75	30,36	145,428	21,70	0,32
5	4,28	29,96	-	-	-
6	12,78	29,97	48,108	12,50	0,32
7	16,73	30,03	48,370	12,50	0,32
8	18,56	30,42	139,928	21,70	0,31
9	14,06	30,19	315,132	30,62	0,35
10	15,74	30,12	297,685	30,62	0,33
11	19,39	30,65	430,180	37,50	0,32



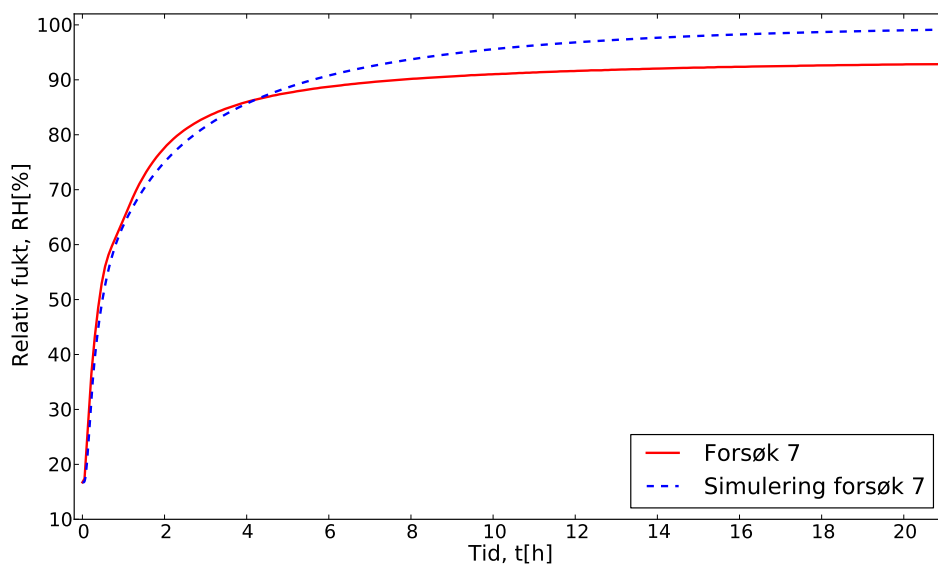
Figur 49: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 4



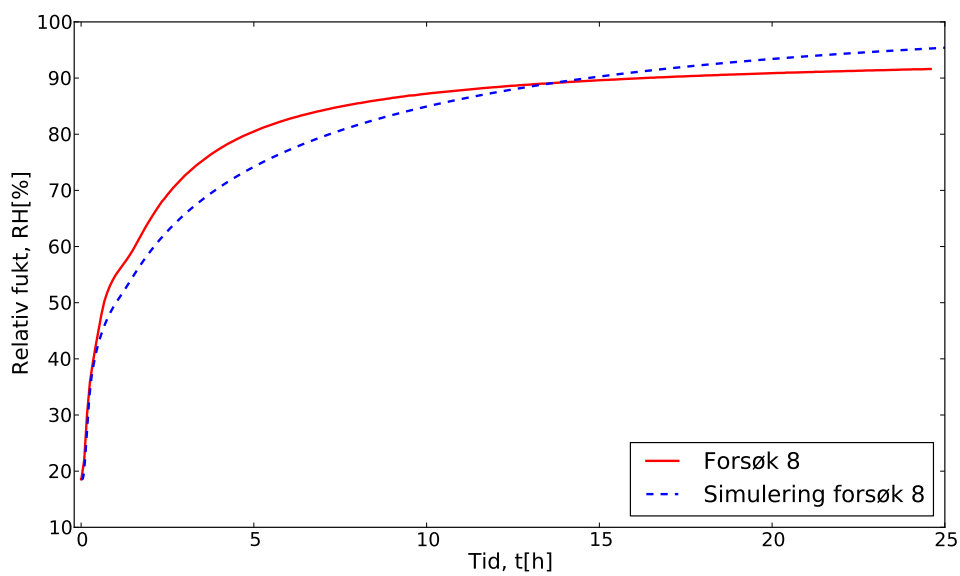
Figur 50: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 5



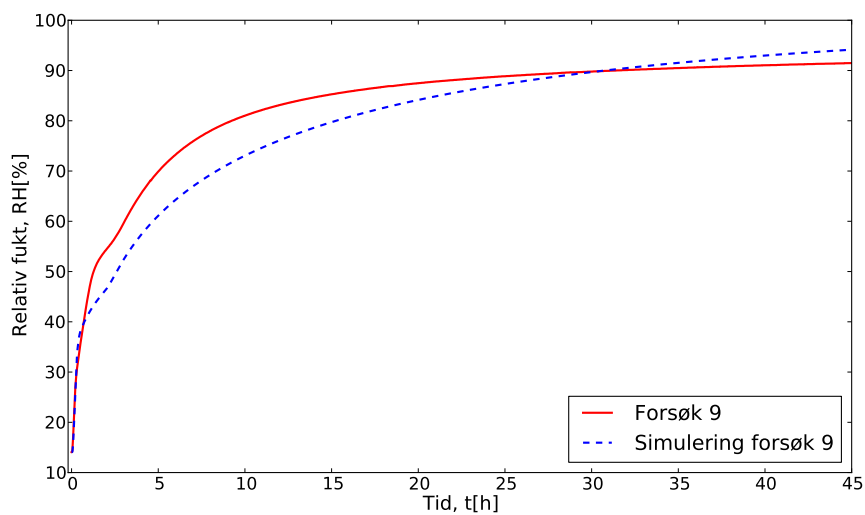
Figur 51: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 6



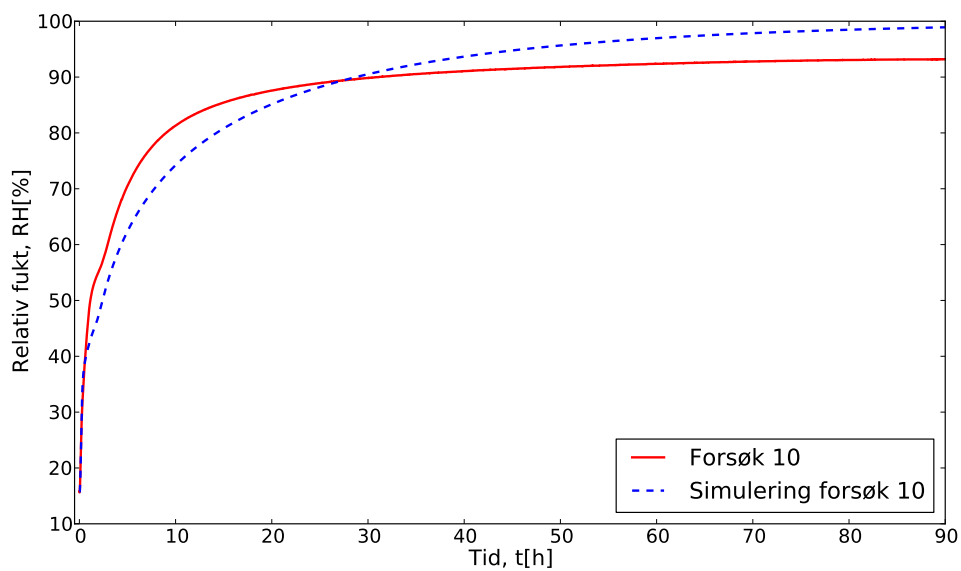
Figur 52: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 7



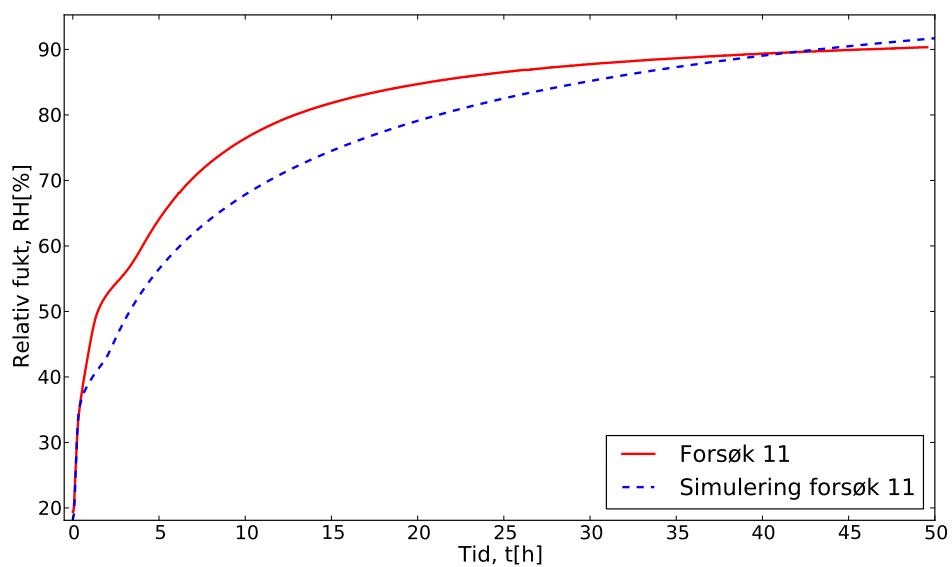
Figur 53: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 8



Figur 54: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 9



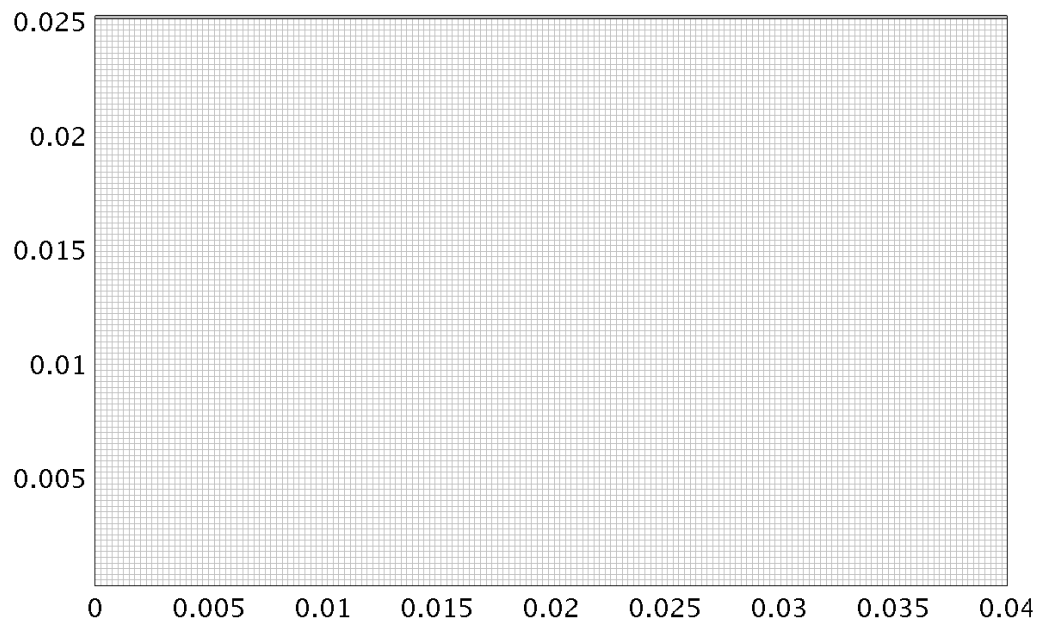
Figur 55: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 10



Figur 56: Fuktopptakskurve og simulering for forsøk 11

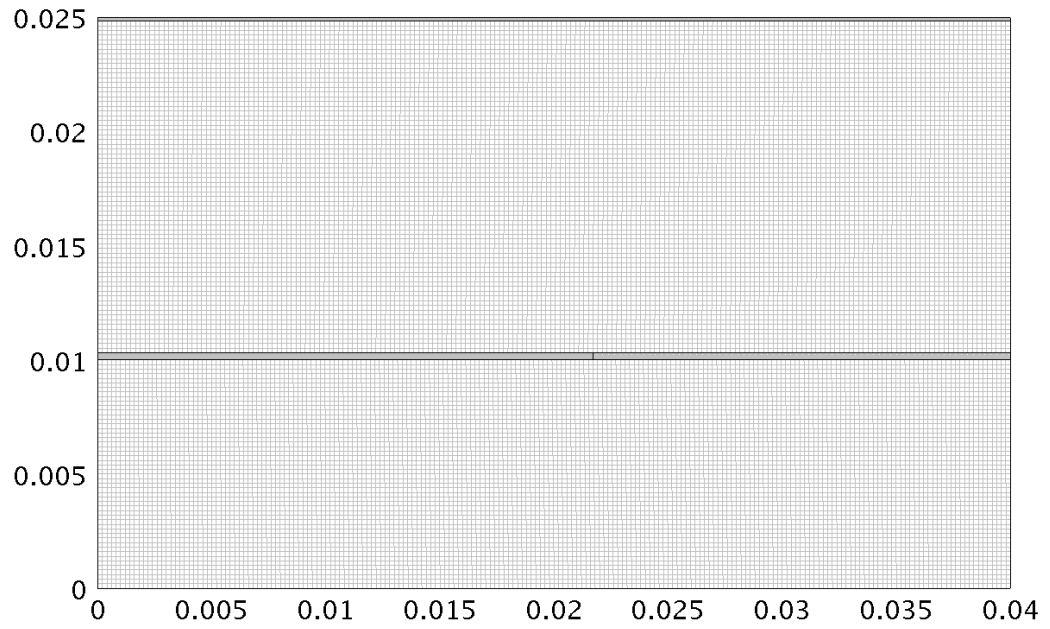
## F Geometrisk modell for numeriske beregninger

### F.1 Geometrisk modell for forsøk 1 og 5



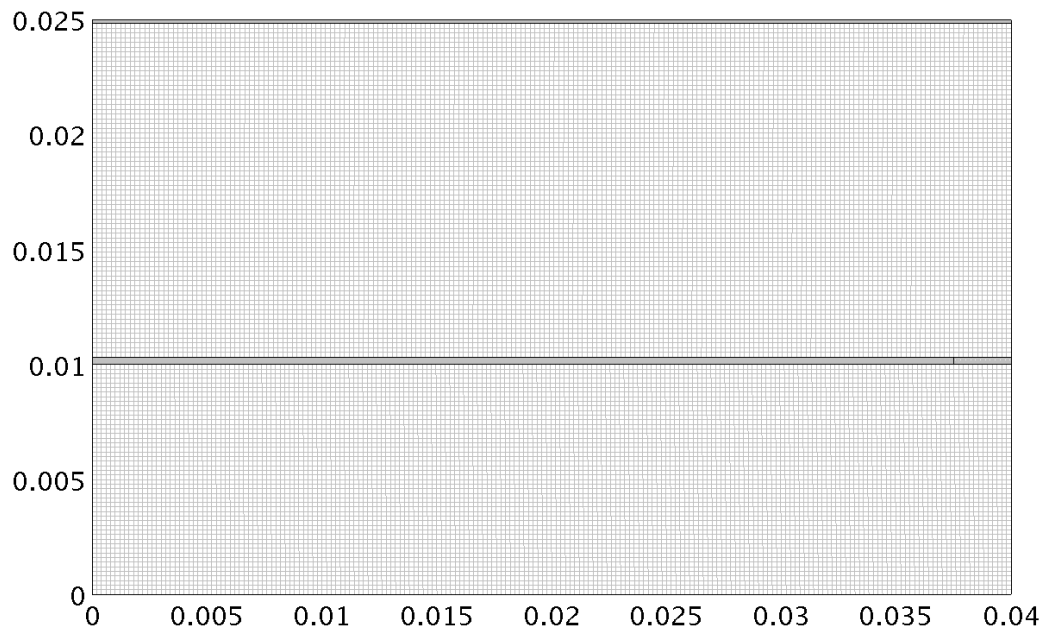
Figur 57: Geometrisk modell for forsøk 1 og 5 med endelige elementer vist

## F.2 Geometrisk modell for forsøk 2 og 8



Figur 58: Geometrisk modell for forsøk 2 og 8 med endelige elementer vist

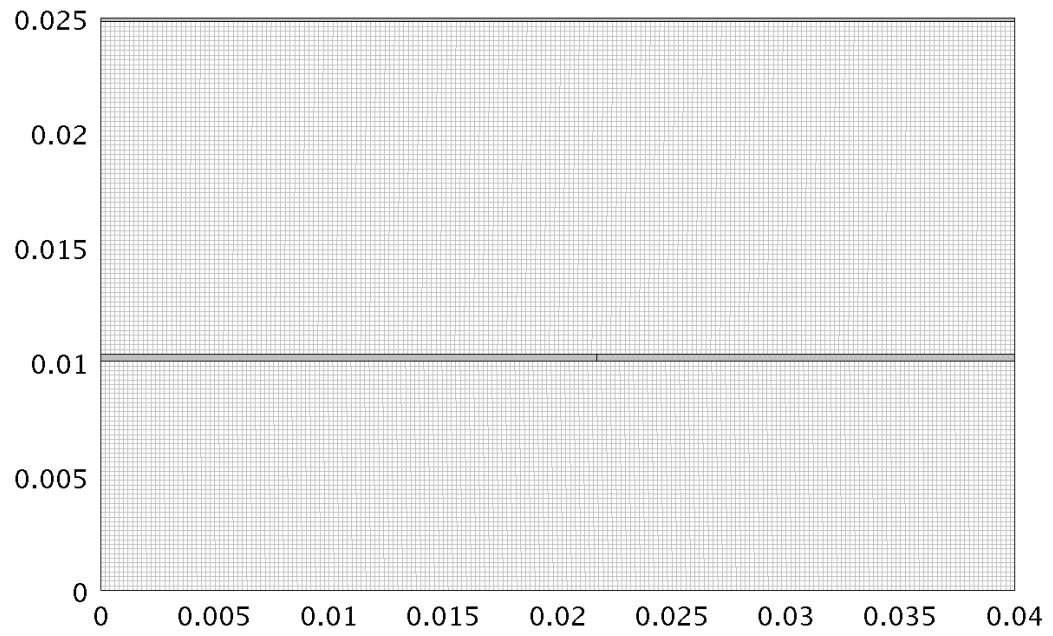
### F.3 Geometrisk modell for forsøk 3 og 11



Figur 59: Geometrisk modell for forsøk 3 og 11 med endelige elementer vist

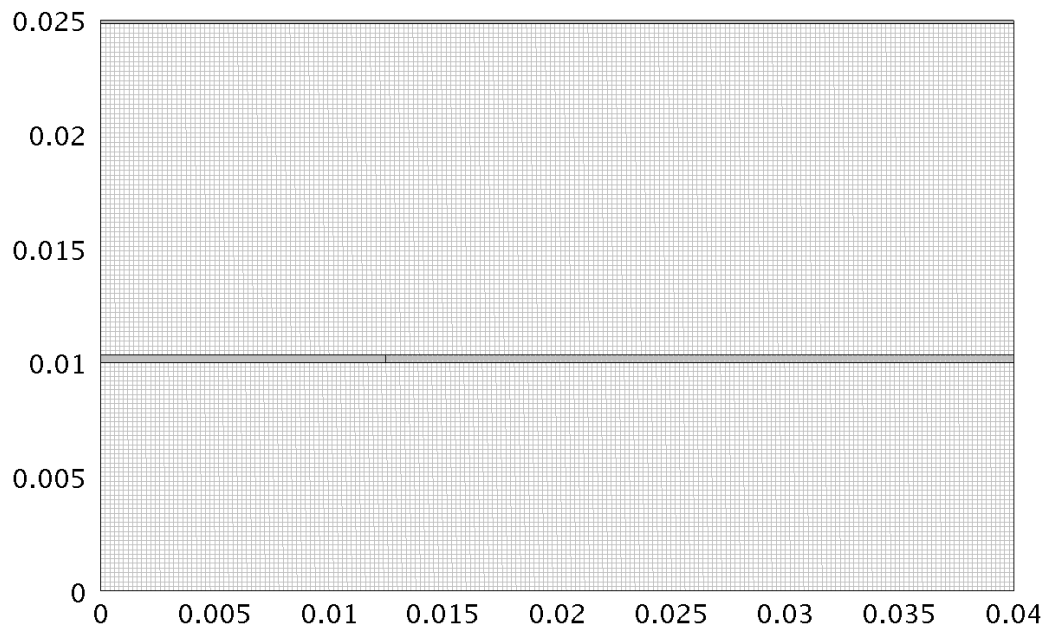


### F.4 Geometrisk modell for forsøk 4



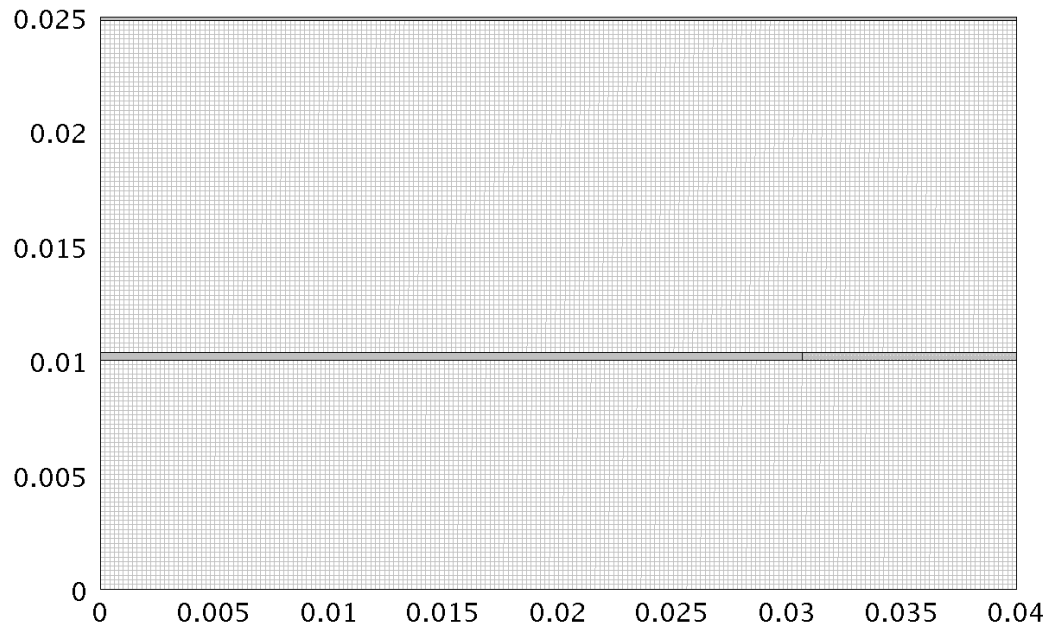
Figur 60: Geometrisk modell for forsøk 4, med endelige elementer vist

### F.5 Geometrisk modell for forsøk 6 og 7



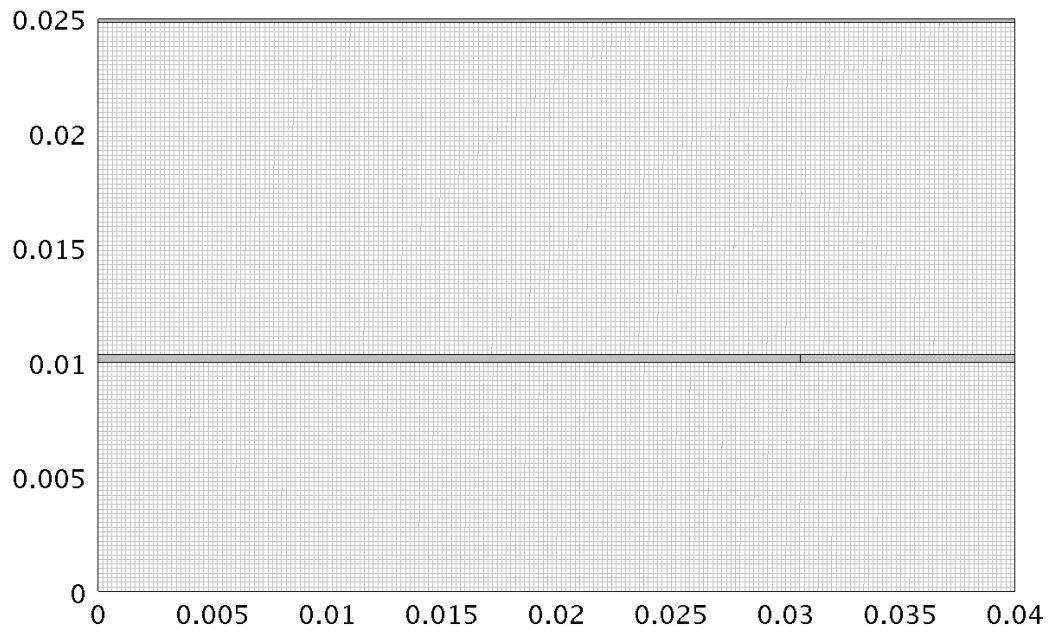
Figur 61: Geometrisk modell for forsøk 6 og 7, med endelige elementer vist

### F.6 Geometrisk modell for forsøk 9



Figur 62: Geometrisk modell for forsøk 9 med endelige elementer vist

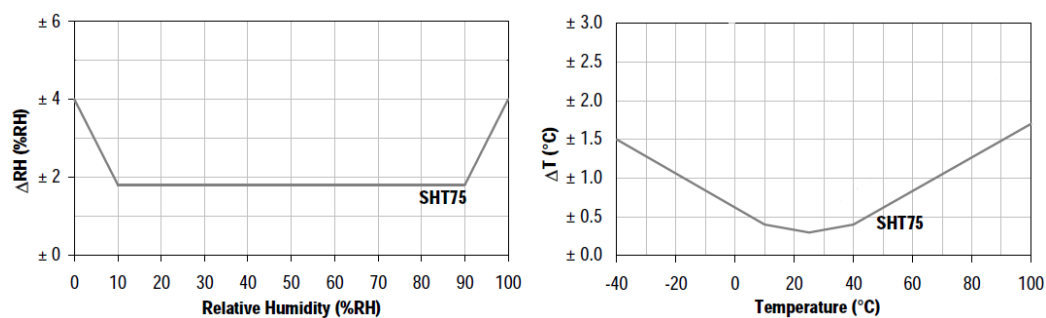
### F.7 Geometrisk modell for forsøk 10



Figur 63: Geometrisk modell for forsøk 10 med endelige elementer vist

## G Potensiell målefeil i fuktsensorene

Sensorene som ble brukt i kuppelen i karakteriseringsmålingene og i testcellen i fuktopptaksmålingene er av typen Sensirion SHT75 CMOSens kapasitiv fuktsensor. Sensoren består av en fuktsensor og en temperatursensor som er montert sammen. Den potensielle målefeilen til fukt og temperaturmålinger med sensoren er vist i figur 64, oppgitt fra produsent[24]. Den potensielle



Figur 64: Potensiell usikkerhet i målinger med fukt og temperatursensor

målefeilen for fuktsensoren er ca 1,8 %RH for fukt i intervallet 20-80 %RH. For fuktigheter i intervallet 10-20 %RH stiger usikkerheten mot 2 %RH. Usikkerheten til temperatursensoren er ca 0,4 °C grader ved 30 °C.

## H Metningskonsentrasjon

### H.0.1 Metningskonsentrasjon

Metningskonsentrasjonen er gitt som  $C = \frac{\text{masse vann}}{\text{masse polymer}}$ . Siden massen til polymeren vil være konstant gjennom karakteriseringen, vil likevektsmassen være konsentrasjonen multiplisert med tørrvekten til polymeren. Likevektsmassen vil derfor ha samme kurveform som metningskonsentrasjonen.

Metningskonsentrasjonen er funnet fra likning (13) når svellebandet er i likevekt med omgivelsene og er plottet som funksjon av vanndamptrykket i figur 65. For absorpsjonsmålingene er tilpassingen til målte data god. For desorpsjonsmålingene ser metningskonsentrasjonen ut til å ligge på et høyere nivå enn absorpsjonsmålingene ved lave vanndamptrykk. Dette kan tyde på at ikke alt vannet desorberer fra svellebandet.

Metningskonsentrasjonen ser ut til å øke lineært til ca 30 % RH før den går over mot en eksponentiell økning.

Svellebandet absorberte totalt 33 % av tørrvekten ved 77 %RH. Svellerbandet har kapasitet til å absorbere over hundre ganger sin egen vekt med vann og har derfor fremdeles ledig kapasitet. Det er mulig svellerbandet trenger vann i flytende form for å utnytte kapasiteten maksimalt.

Metningskonsentrasjonen til svellerbandet fra karakteriseringen er tilpasset til en kurve på formen

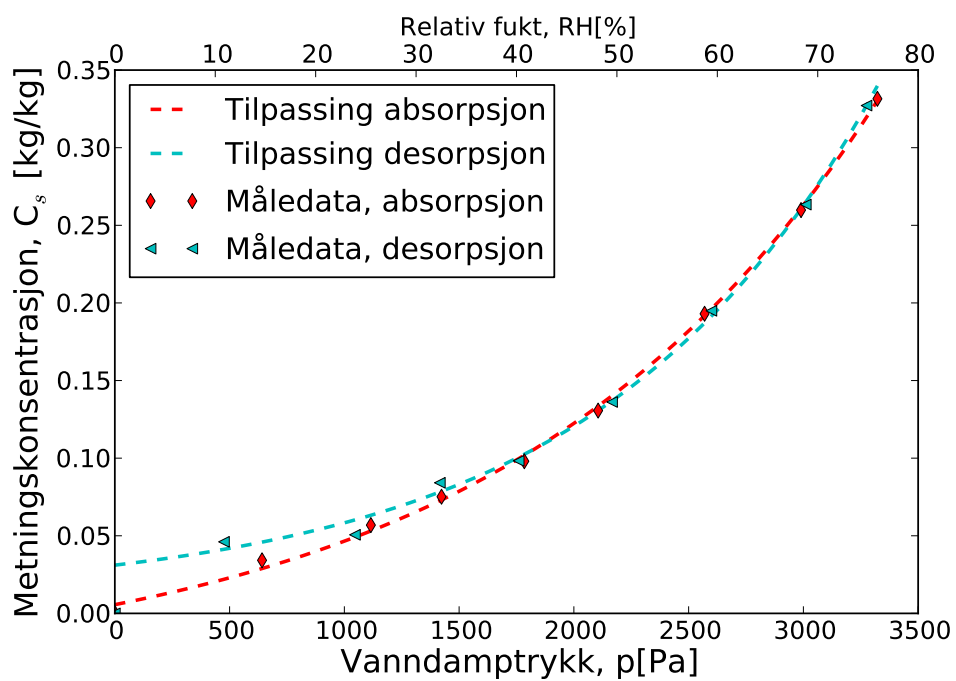
$$C = a + b \cdot (1 + c)^p \quad (41)$$

der  $a$ ,  $b$  og  $c$  er konstanter,  $C$  er konsentrasjonen og  $p$  er vanndamptrykket.

Målt metningskonsentrasjon som funksjon av vanndamptrykk er vist i figur 65, med tilpassing. Koeffisienter for tilpassingen er gitt i tabell 11

Tabell 11: Koeffisienter tilpassing til metningskonsentrasjon

Koeffisient	$a$	$b$	$c$
Absorpsjon	$-4,23 \cdot 10^{-2}$	$4,79 \cdot 10^{-2}$	$6,18 \cdot 10^{-4}$
Desorpsjon	$9,83 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$8,26 \cdot 10^{-4}$



Figur 65: Metningskonsentrasjon som funksjon av vandamptrykk