

Leif Bøgh-Sørensen og Peter Zeuthen

Konserveringsteknik



Leif Bøgh-Sørensen og Peter Zeuten

Konserveringsteknik 2

Konserveringsteknik bind 2

Leif Bøgh-Sørensen og Peter Zeuthen

1. udgave 2002

E-bogen er udgivet 2013

©Biofolia 2002

Prepress og omslag: SL Grafik (Frederiksberg)

E-bogsproduktion: PHi Business Solutions Ltd. (Chandigarh, India)

ISBN e-bog: 978-87-91319-64-8

ISBN trykt udgave: 978-87-74325-78-9

Biofolia

Rosenørns Allé 9

1970 Frederiksberg C

Tlf. 3815 3880

Fax: 3535 7822

slforlagene@samfundslitteratur.dk

www.biofolia.dk

Alle rettigheder forbeholdes.

Kopiering fra denne bog må kun finde sted på institutioner, der har indgået aftale med COPY-DAN, og kun inden for de i aftalen nævnte rammer.

Undtaget herfra er korte uddrag til anmeldelse.

Forord

Ved konserveringsteknik forstås i denne bog industriel konservering af levnedsmidler. Dog omtales konservering af mejeriprodukter, cerealier og fedtstoffer kun sporadisk.

Undervisningsmateriale til brug for undervisningen i levnedsmiddelkonservering på Den kongelige Veterinær- og Landbohøjskole blev udarbejdet i 1959. I 1965 udkom 3-bindsværket "Industriel levnedsmiddelkonservering" af Poul Erner Andersen, Mogens Jul og Hans Riemann, bistået af Jørgen E. Pedersen.

Senere udarbejdede Leif Bøgh-Sørensen, Jørgen Højmark Jensen og Mogens Jul bogen "Konserveringsteknik" i to bind, udgivet af DSR. Bind 1 udkom i 1978 og bind 2 i 1981. Med Peter Zeuthen som medforfatter er begge senere blevet revideret.

Leif Bøgh-Sørensen og Peter Zeuthen har medvirket til denne reviderede udgave af "Konserveringsteknik 2", kapitlerne 6 til 13. Vi takker Richard Ipsen, som har forestået revisionen af kapitel 6: Tørring.

Som tidligere omfatter bind 2 konserveringsformerne tørring, røgning, saltning, kemisk konservering, fermentering, varmekonservering og strålekonservering, ligesom der i kapitel 13 omtales ændringer i levnedsmidlers næringsværdi ved konservering.

En stor del af "Konserveringsteknik 2" er materiale, som i ajourført form er medtaget fra tidligere udgaver, og vi takker de mange personer, der har bidraget på forskellig vis.

Principperne for levnedsmiddelkonservering ændres ikke, men der sker hele tiden ændringer, bl.a. med hensyn til de faktorer der skal lægges mest vægt på ved industriel konservering. I årene siden ca. 1990 er emner som "nye" patogene bakterier, lovgivning og øget opmærksomhed om levnedsmidlers kvalitet og sikkerhed blevet af endnu større betydning end tidligere.

Opbygningen af bogens kapitler er stort set uændret. Nye processer som fx højtryksbehandling omtales kort i kap.12.

Forslag til rettelser, ændringer eller tilføjelser bedes sendt til undertegnede eller til DSR.

August 2001

Leif Bøgh-Sørensen

Indholdsfortegnelse

Kap. 6. Tørring af levnedsmidler	7	10.2 Fermenterede produkter	201
6.1 Indledning.....	7	10.3 Fermenterede soyaprodukter	205
6.2 Vand i levnedsmidler	7	10.4 Biokonservering	206
6.3 Levnedsmidlers holdbarhed og vandaktiviteten	16	Kap. 11. Varmekonservering	209
6.4 Fjernelse af vand fra levnedsmidler	21	11.1 Definitioner.....	210
6.5 Tørringsanlæg	29	11.2 Mikroorganismer i varmekonserves	213
6.6 Emballering og lagring af tørrede produkter	35	11.3 Grundlaget for varmebehandling.....	217
6.7 Ændringer i levnedsmidler i forbindelse med tørring.....	35	11.4 Beregning af varmebehandling,.....	231
6.8 Tørrede levnedsmidler	37	11.5 Konserveringsformlen	242
Kap. 7. Røgning	45	11.6 F-værdier i praksis.....	252
7.1 Røgning i historisk belysning	45	11.7 Temperaturmåling	263
7.2 Røgens frembringelse	46	11.8 Varmekonserveringens teknologi.....	267
7.3 Røgens kemiske sammensætning og virkning	48	11.9 Undersøgelse af varmekonserves.....	302
7.4 Røgoptagelse.....	58	11.10 De enkelte konserverprodukter.....	309
7.5 Røgningens teknologi	66	Kap. 12. Strålingskonservering	317
7.6 Røgede produkter	78	12.1 De forskellige strålingstyper	318
Kap. 8. Saltning.....	81	12.2 Ioniserende stråling.....	318
8.1 Salt i vandfasen.....	82	12.3 Lovgivning mht. ioniserende stråling....	326
8.2 Hurdle-effekt.....	83	12.4 Påvisning af bestrålede levnedsmidler..	329
8.3 Salt	86	12.5 Anvendelse af stråling	330
8.4 Nitrat og Nitrit	90	12.6 Ultraviolet stråling (UV-stråling)	332
8.5 Andre saltningsingredienser	102	12.7 Mikrobølger	333
8.6 Saltningens teknologi	108	12.8 Radiobølger.....	337
8.7 Saltede produkter	128	12.9 Højtryksbehandling.....	339
8.8 Lovgivning	148	12.10 Andre behandlinger til at dræbe eller fjerne mikroorganismer	342
Kap. 9. Kemisk konservering.....	163	Kap. 13. Tab i næringsværdi	345
9.1 Tilsætningsstoffer.....	163	13.1 Næringsværdi	345
9.2 Sukkerkonservering	167	13.2 Gennemsnitskosten i Danmark	347
9.3 Syrekonservering.....	169	13.3 Næringsstoffers stabilitet	347
9.4 Konserveringsmidler	173	13.4 Ændring af levnedsmiddelforsyningen..	349
9.5 Antioxidanter og synergister	189	13.5 Produktionens indflydelse	352
Kap. 10. Fermentering	197	13.6 Tab ved levnedsmiddelkonservering	352
10.1 Fermentering	197	Index.....	363

6 Tørring af levnedsmidler

6.1 Indledning

Tørring må være den ældste af alle konserveringsmetoder, og tørrede levnedsmidler, specielt fisk, kendes fra de tidligste beretninger. Allerede for mere end 2000 år siden tørrede indianerne i Peru kartofler ved at udsætte dem for nattefrost. Om morgenen, efter at de var frosset, blev kartoflerne knust og tørret i solen. Det tørrede produkt kaldes Chuno og bruges stadig i stor udstrækning.

Kaptajn Cook medbragte en slags inddampet ærtesuppe på sin jordomrejse i 1772, og i 1840 begyndte man i England kunstigt at tørre grøntsager, bl.a. kartofler. De blev kogt, indtil skindet revnede og presset gennem små huller til fine tråde, der blev tørret på dampopvarmede plader. Produktet blev bl.a. anvendt i Krimkrigen.

Tørrede levnedsmidler har været meget anvendt på ekspeditioner og til militærforsyninger. Der var et stort forbrug af tørrede levnedsmidler under 2. Verdenskrig, men det var ret ensformig kost, og i stedet blev der anvendt dåsekonserves i militærrationer. Kvaliteten er i vore dage betragteligt forbedret, og den amerikanske hær anvender en del frysetørrede eller konventionelt tørrede produkter, som regel pakket i en stærk plastpose, så de er nemme at transportere.

Især æg, fisk, frugt og mælk er blevet konserveret ved tørring. Men også supper, kartofler, kød, sukker, instant kaffe og te, gryn, mælk, bageblandinger, morgencerealier, kartoffelchips og pasta er eksempler på tørrede levnedsmidler.

6.2 Vand i levnedsmidler

Vækst af mikroorganismer er en af de hyppigste årsager til levnedsmidlers ødelæggelse. En betingelse for mikrobiel aktivitet er imidlertid, at vand er tilgængeligt for mikroorganismene.

Princippet i mange konserveringsmetoder er derfor at gøre vandet utilgængeligt. Inddampning, koncentrering, tørring eller frysetørring fjerner vand fra levnedsmidlet. Saltning og syltning er baseret på tilsætning af stoffer, der mindsker tilgængeligheden af vand i levnedsmidlet, fordi det osmotiske tryk stiger. Frysning er bl.a. baseret på, at vand bindes i iskrystaller.

Et levnedsmiddels mikrobiologiske holdbarhed er derfor i høj grad afhængig af vandindholdet, samt den form hvori vandet er til stede. Det samme gælder for de fysiske og kemiske ændringer, som kan foregå i et levnedsmiddel under forarbejdning og opbevaring.

6.2.1 Vandbinding

Vand er et polært molekyle og vand på væskeform har en delvis ordnet struktur, hvor hydrogen-bindinger mellem vandmolekyler hele tiden dannes og brydes.

Den traditionelle opfattelse af vand i biologiske materialer er, at det findes på to forskellige former: frit og bundet. Denne opfattelse er noget forenklet, men et vandmolekyle nær ved overfladen af et biologisk makromolekyle har en anden bindingsenergi end molekyleerne i den rene vandfase. Hydroxylgrupper i polysaccharider og carbonyl- og aminogrupper i proteiner kan for eksempel fastholde vand gennem hydrogen- og ion-dipol interaktioner. Vandet er ikke fastholdt permanent til sådan en overflade. Der er en ligevægt mellem bundet og frit vand, men det bundne vand har en mindre mobilitet, en øget viskositet og andre termodynamiske egenskaber end rent vand. Bundet vand vil normalt være utilgængeligt for fx mikroorganismer og kemiske reaktioner, og det kan kun tørres væk under et ekstra energiforbrug, som svarer til, at man bryder den kemiske binding.

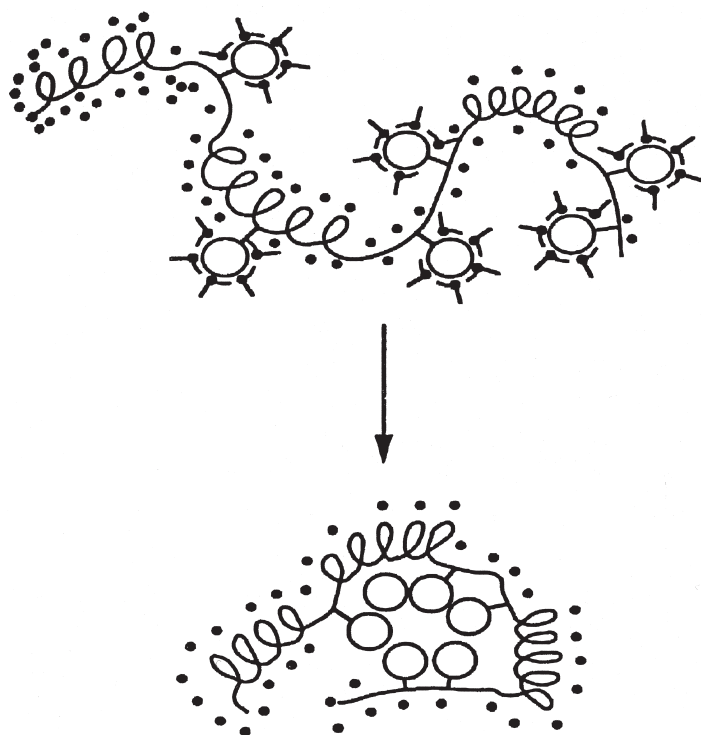
Det kemisk bundne vand i levnedsmidler kan siges at danne et struktureret, dynamisk monolag. En slags indre overflade, der blandt andet kan beskytte levnedsmidlet mod oxidati-

on. Man er derfor sjældent interesseret i at fjerne dette vand - hvad der også er energetisk dyrt.

Omkring de hydrofobe dele af makromolekylerne i levnedsmidler (se figur 6-1) vil vandmolekylerne danne gitterlignende, hydrogenbundne strukturer med andre egenskaber end rent vand. Sådant vand vil være tilgængeligt for en del kemiske reaktioner, men ikke som solvent. Dette vand omgives så af lag med gradvis mindre struktur, jf. fig. 6-1.

En stor del af det strukturerede vand kan ikke fryses ud ved -40°C , og dette kriterium har været anvendt til at adskille 'frit' og 'bundet' vand.

Levnedsmidler indeholder desuden en del kapillært vand, dvs. vand der fysisk bliver fastholdt i revner og hulrum af kapillære kræfter. Et eksempel er vand, der er indesluttet i en



Figur 6-1: Schematisk fremstilling af et globulært protein med hydrofobe interaktioner. De åbne cirkler er hydrofobe grupper, de L-formede enheder rundt om cirklerne er vandmolekyler orienteret i forhold til den hydrofobe overflade, og prikkerne er vandmolekyler associeret til polære grupper. Efter Fennema, 1996.

gelstruktur. Kapillært vand har egenskaber som rent vand, og er tilgængeligt som solvent og for kemiske reaktioner.

Det frie vand i levnedsmidler vil optræde som en normal opløsning. Dette betyder, at frysepunkt og vanddamptryk kan beregnes efter de normale love for opløsninger, når man kender de opløste stoffer og deres koncentration.

Vands mobilitet i et levnedsmiddel afhænger af vandindholdet. Der er nedsat diffusion, når vandindholdet falder, og den nødvendige energi til at fjerne vand stiger eksponentielt med faldende vandindhold.

6.2.2 Vandaktivitet, a_w

Det er et grundlæggende forhold i levnedsmiddelkonservering, at holdbarheden er bestemt af den måde, vandet er bundet på, snarere end af den totale mængde af vand i levnedsmidlet. Der er rent faktisk mere vand i hvidkål (92%) end i mælk (88%).

Begrebet *vandaktivitet* (a_w) blev introduceret i 1950'erne for at beskrive vands tilstand og tilgængelighed i levnedsmidler. Mikrobiel vækst, produktion af toksiner, samt såvel enzymatiske som ikke-enzymatiske reaktioner afhænger af vandaktiviteten og ikke af det totale vandindhold. Mælkepulver har fx næsten ingen holdbarhed ved et vandindhold på 12%, medens kornprodukter er langtidsholdbare ved 14% vand og tørret frugt ved 18% vand.

Vandaktiviteten er defineret som forholdet mellem vanddamptrykket over levnedsmidlet og damptrykket over rent vand ved samme temperatur. Vandaktiviteten er således den relative fugtighed (RH) som er i ligevægt med levnedsmidlet, udtrykt som et tal mellem 0 og 1. Rent vands a_w er pr. definition lig 1. Sænkes vanddamptrykket over et levnedsmiddel - enten ved tilsætning af stoffer, der fastholder vandet, eller ved at fjerne vandet ved tørring - kan vækst af mikroorganismer og kemiske reaktioner hæmmes betydeligt (se afsnit 6.3).

Anbringes et levnedsmiddel i en lukket beholder vil der indstille sig en ligevægt mellem levnedsmidlets og luftens fugtighed. Er den relative fugtighed i luften fx 92%, svarer det til en a_w i levnedsmidlet på 0.92. Den vandmængde (fx i kg vand/kg tørstof), som levnedsmidlet

indeholder, kaldes ligevægtsfugtigheden; en mere korrekt betegnelse ville være ligevægtsvandindholdet.

Vanddampptrykket af det frie vand i et levnedsmiddel i ligevægt med fugtig luft (og således a_w) afhænger bla. af koncentrationen af opløste stoffer. En umættet opløsning har et lavere damptryk end rent vand. Jo højere koncentrationen bliver, jo lavere bliver damptrykket, indtil en mættet opløsning nås. Øges koncentrationen af opløste stoffer i et levnedsmiddel fx ved tilsætning af salt eller sukker, vil ligevægtsdamptrykket (og dermed a_w) falde, samtidig med at det osmotiske tryk stiger. Vandaktiviteten kan dog ikke bringes længere ned end til den værdi, der svarer til den mættede opløsnings damptryk. Når vandfasen er mættet, vil overskud af det opløselige stof blot forblive på fast form. Grænsen for hvor langt a_w kan bringes ned ved tilsætning af et givet stof, afhænger hovedsageligt af stoffets molvægt, dissociation og opløselighed i vand. Nogle eksempler er givet i fig. 6-2.

Vandaktiviteten af ideale (stærkt fortyndede opløsninger) kan beregnes efter Raoult's lov:

$$a_w = P/P_0 = n_2 / (n_1 + n_2)$$

- P = opløsningens damptryk
- P₀ = rent vands damptryk
- n₁ = mol opløst stof
- n₂ = mol vand

For et stof der dissocieres i vandig opløsning, skal man anvende antallet af ioner i opløsning. For NaCl er n₁ således 2 gange antallet af mol. Beregnes a_w for 1 mol NaCl (58.45 g) opløst i 1 kg vand (55.5 mol) efter Raoult's lov fås:

$$a_w = 55.5 / (2 \cdot 1 + 55.5) = 0.965$$

Ved måling er a_w i en sådan opløsning bestemt til 0.967 (ved 25°C), dvs. der er god overensstemmelse med Raoult's lov i dette område; der kan således fås en skønsmæssig vurdering af fx den saltmængde, der skal sættes til et levnedsmiddel for at opnå en given vandaktivitet. Når saltkoncentrationen stiger, bliver afvigelsen fra den ideale tilstand større, og a_w udtrykkes i stedet som

$$a_w = \gamma_w \cdot x_w$$

x_w er den molære fraktion af vand i blandingen ($n_1 / (n_1 + n_2)$), mens γ_w er vands aktivitetkoefficient, der angiver afvigelsen fra det ideale.

Et stof med lille molvægt vil indeholde flere mol pr. gram end et stof med stor molvægt. 1 g fruktose (molvægt 180) vil have en større virkning på a_w end 1 g saccharose (molvægt 342) og 1 g NaCl vil have endnu større virkning på a_w , både på grund af den lille molvægt (58.5) og fordi det dissocieres til ioner.

6.2.3 a_w og det osmotiske tryk

Sammenhængen mellem vandaktivitet og det osmotiske tryk ΔP er givet ved ligningen:

$$\Delta P = -RT \ln(a_w) / V$$

- ΔP = det osmotiske tryk (atm)
- R = gaskonstanten (0.082 l * atm/mol /°K)
- T = den absolutte temperatur (°K)
- V = vands partielle molale volumen (l)

Det partielle molale volumen af vand i en opløsning er den volumenforøgelse, som man vil få, hvis der tilsættes 1 mol vand til en så stor mængde af opløsningen, at tilsætningen ikke vil få nogen væsentlig indflydelse på opløsningens koncentration. I fortyndede opløsninger kan det partielle molale volumen af vand sættes lig med det molale volumen af rent vand (0.018 l). En opløsning af 1 mol salt i 1 kg vand ved 25°C vil med den nævnte tilnærmelse have et osmotisk tryk på

$$\Delta P = - (0.082 \cdot 298 \cdot \ln 0.967) / 0.018 \sim 46 \text{ atm}$$

6.2.4 a_w og frysepunktet

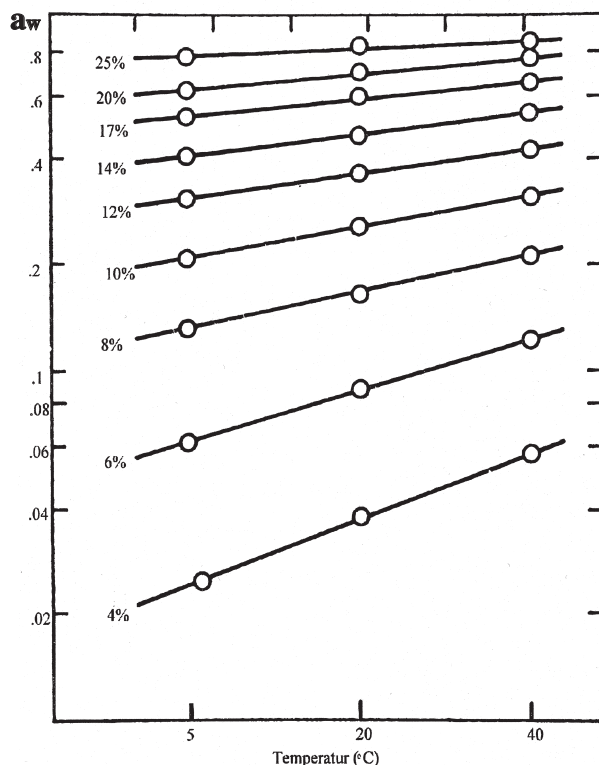
I flydende levnedsmidler kan a_w bestemmes ved at måle sænkningen i frysepunktet, ΔT , i forhold til rent vand. Der er fundet følgende sammenhæng mellem ΔT og vandaktiviteten:

$$-\log(a_w) = \Delta T \cdot 4.2 \cdot 10^{-3} + \Delta T^2 \cdot 2.1 \cdot 10^{-6}$$

Metoden kan anvendes til måling af vandaktivitet i flydende levnedsmidler med høj a_w , men er ikke egnet til faste levnedsmidler, hvor en del af vandet er bundet og ikke kan fungere som opløsningsmiddel.

	Opløselighed g pr. 100 g opløsning	Minimum a_w
Glukose	47	0.915
Saccharose	67	0.86
Invertsukker (50% glucose og 50% fructose)	63	0.82
Salt	27	0.75
37.6% saccharose 62.4% invertsukker	75	0.71

Figur 6-2: Vandaktivitet af forskellige mættede opløsninger ved stuetemperatur.



Figur 6-3: Sammenhængen mellem temperatur og vandaktivitet for kartoffelstivelse med forskellig vandindhold.

6.2.5 Temperaturen indflydelse på vandaktiviteten

Ved høje a_w -værdier har temperaturen kun lille indflydelse. Forholdet mellem damptrykket over levnedsmidlet og damptrykket over rent vand ændrer sig ikke ret meget med temperaturen, idet begge damptryk falder med faldende temperatur. I levnedsmidler med lavere vandindhold og a_w har temperaturen en større indflydelse, jf. fig. 6-3.

Ved frysepunktet udkrystalliseres rent vand som is, hvorved koncentrationen af salte i opløsningen stiger. Hvis temperaturen sænkes yderligere, vil vanddamptrykket over isen vil være lig med vanddamptrykket over opløsningen, da der skal være ligevægt i systemet. Ved temperaturer under 0°C beregnes a_w som forholdet mellem vanddamptrykket over is og vanddamptrykket over underafkølet vand ved samme temperatur, og a_w er mere temperaturfølsom under frysepunktet (se figur 6-4). En opløsning og rent vand har samme vandaktivitet, når temperaturen er under opløsningens frysepunkt. En fersk sild ($a_w = 0.99$ ved 25°C) og en marineret sild ($a_w = 0.91$ ved 25°C) har begge ved -20°C en a_w på 0.823, som er vandaktiviteten af is ved denne temperatur.

6.2.6 Måling af vandaktivitet

Den klassiske metode til måling af vandaktivitet går ud på at bringe afvejede prøver af et levnedsmiddel i ligevægt med forskellige mættede saltopløsninger med kendt damptryk. Stiger prøvens vægt, er dens a_w mindre end det, der svarer til saltopløsningens damptryk. Falder prøvens vægt, er dens a_w større. Ved passende valg af saltopløsninger kan man beregne a_w . Eksempler på a_w for forskellige mættede saltopløsninger er givet i fig. 6-5. Nogle af saltene kan ved henstand optage eller afgive krystalvand, hvorved omslagspunktet mellem vådt og tørt ændres.

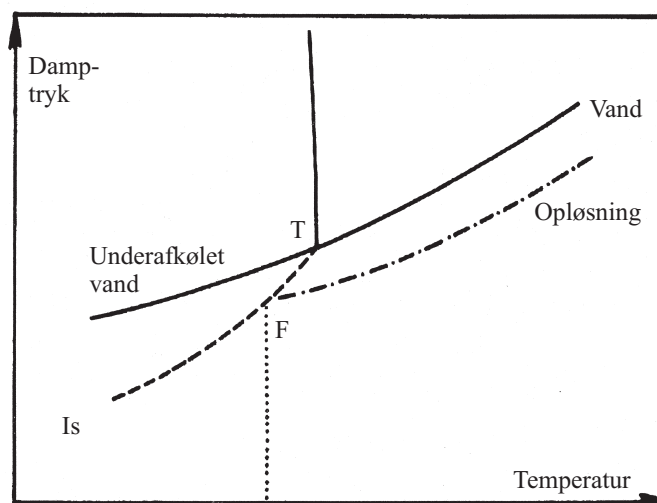
Der findes en del kommercielle hygrometre på markedet. De fleste anvender en sensor dækket af et hygroskopisk salt eller en polymer gel, og måler ændringen i ledningsevne eller elektrisk kapacitet, når sensoren optager vand fra levnedsmidlet.

Vandaktivitet kan også bestemmes ved hjælp af måling af dugpunktet. Dugpunktet af

luften i ligevægt med prøven bestemmes, og sammenholdt med luftens temperatur kan den relative fugtighed bestemmes. Metoden er mest nøjagtig, når der er en rimelig forskel på luftens temperatur og dens dugpunkt (ikke ved høje a_w).

Damptrykket over prøven og over rent vand ved samme temperatur kan måles direkte af et damptryksmanometer, og dermed kan a_w beregnes.

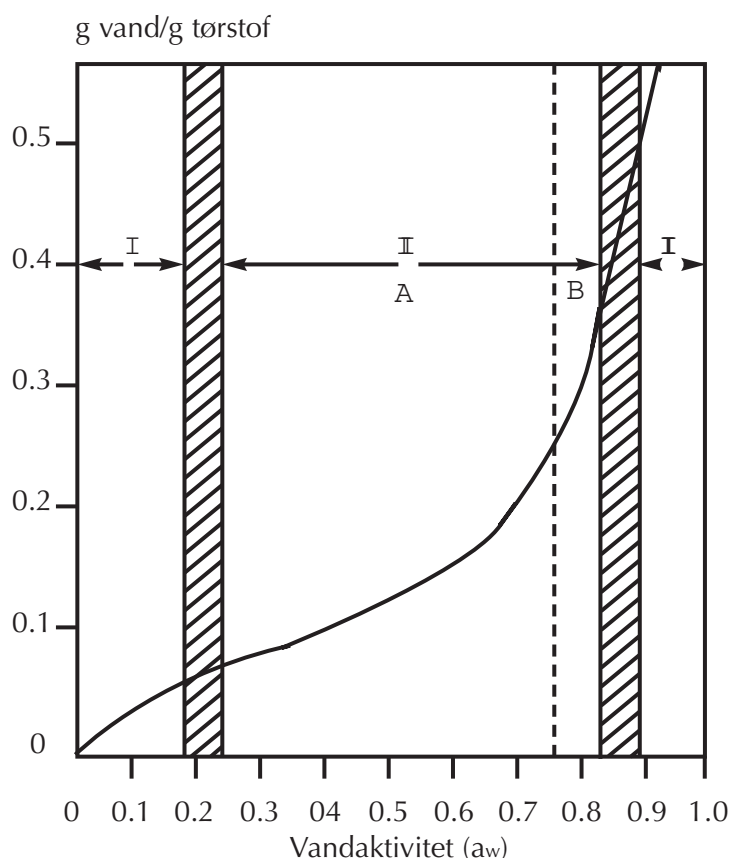
Man kan bringe en prøve af et levnedsmiddel i ligevægt med et stof, hvis sorptionsisoterm, (se afsnit 6.2.7) er kendt. Ofte bruges mikrokrySTALLINSK cellulose, kartoffelmel eller Na-caseinat. Vandindholdet i referenceprøven bestemmes ved vejning, og vandaktiviteten aflæses ud fra sorptionsisotermen, idet den ved



Figur 6-4: Vands tilstandsdiagram (skematisk). F angiver opløsningens frysepunkt, T er tripelpunkt.

Salt	Vandaktiviteten af mættede opløsninger			Omtrentlig opløselighed i varmt vand (g pr. 100 ml)
	20°C	25°C	30°C	
NaOH	0.0698	0.0695	0.0687	350
LiCl, H ₂ O	0.1114	0.1115	0.1116	100
KAc	0.231	0.226	0.220	500
MgCl ₂ , 6H ₂ O	0.3303	0.3273	0.3238	300
NaI	0.3918	0.3775	0.3625	250
K ₂ CO ₃	0.440	0.438	0.436	150
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.5447	0.5286	0.5133	55
Na ₂ Cr ₂ O ₇ , 2H ₂ O	0.548	0.535	0.520	510
NaBr, 2H ₂ O	0.587	0.5770	0.563	120
CaCl ₂	0.684	0.686	0.685	150
KJ	0.6986	0.6876	0.6785	200
NaNO ₃	0.7513	0.7379	0.7275	180
NaCl	0.7542	0.7532	0.7521	40
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.803	0.7997	0.796	100
KBr	0.8177	0.8071	-	100
KCl	0.8513	0.8432	0.8353	50
Na ₂ SO ₄	0.869	0.8595	0.864	40
K ₂ CrO ₄	0.866	0.864	0.863	80
BaCl ₂	0.9069	0.9026	-	50
KNO ₃	0.932	0.920	0.907	200
NH ₄ H ₂ PO ₄	0.922	0.927	0.911	170
K ₂ SO ₄	0.972	0.969	0.966	20
K ₂ Cr ₂ O ₇	0.9793	0.9800	0.9706	100

Figur 6-5: Eksempler på a_w for mættede saltopløsninger.



Figur 6-6: Sorptionsisoterm (skematisk). Zone I svarer til BET-monolaget, zone II til det primært hydrogenbundne vand som ikke udfryses ved -40°C , og zone III til vand som er tilgængeligt som solvent.

ligevægt er ens for prøve og reference.

Vandaktivitet kan desuden måles ved at måle frysepunktsænkningen (se afsnit 6.2.4), det osmotiske tryk (se afsnit 6.2.3) eller kogepunktstigningen.

6.2.7 Sorptionsisotemer

En sorptionsisoterm viser sammenhængen mellem et levnedsmiddels totale vandindhold og den tilsvarende vandaktivitet ved en konstant temperatur.

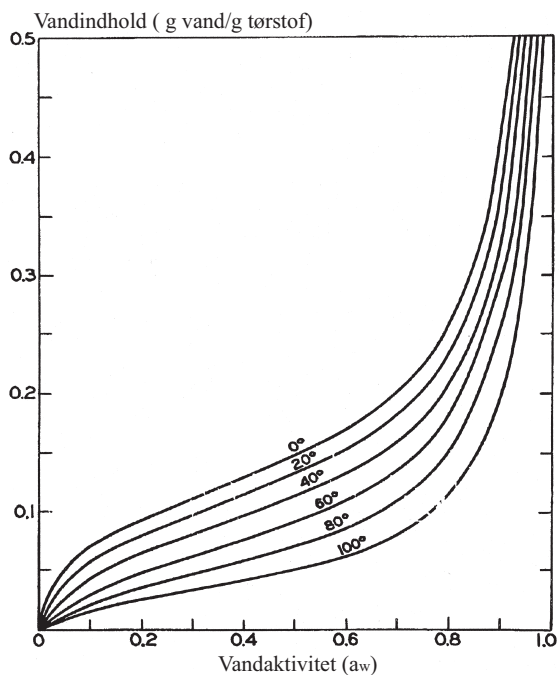
Sorptionsprocessen er ikke fuldt ud reversibel: adsorptionsisotemer anvendes ved undersøgelse af hygroskopiske materialer, desorptionsisotemer bruges fx ved undersøgelse af tørringsprocesser. Idealiserede adsorptionsisotemer er vist i figur 6-6.

Den første del af isotermerne, hvor a_w er tæt ved 1.0 over et langt interval af vandindhold,

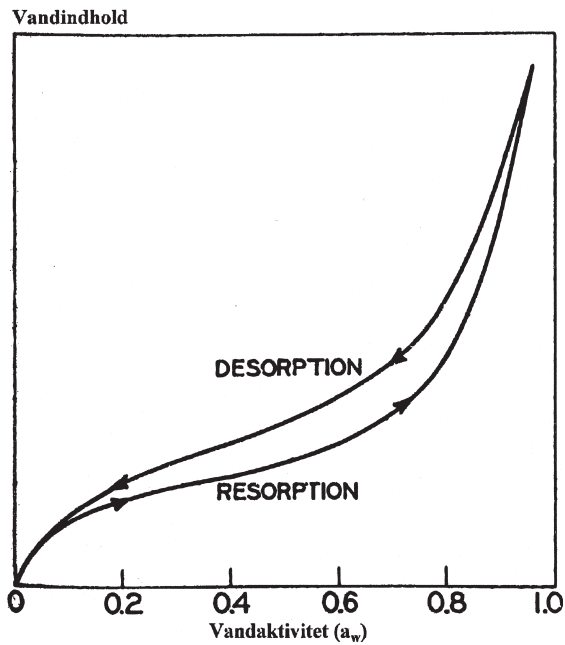
svarer til levnedsmidler som frugt, grøntsager, kød, fisk, supper og drikkevarer. Den sidste del af kurven, hvor a_w er under 0.6, svarer til de fleste tørre levnedsmidler (kornprodukter, pulverkaffe, mælkepulver mv.). Den mellemste del af kurven svarer til middeltørre levnedsmidler (intermediate moisture foods) som syltetøj, spegepølse og tørret frugt.

Som det ses af figur 6-7 har temperaturen indflydelse. Ved højere temperatur vil kurven have uændret form, men vandaktiviteten vil være højere for et givet vandindhold. Således kan en stigning i lagringstemperatur øge vandaktiviteten og bringe den ind i et problematisk område. Temperaturændringer har størst indflydelse på vandaktiviteten ved lave vandindhold, jf. fig. 6-3.

Som nævnt er sorptionsisotemer ikke reversible. Hvis et tørret levnedsmiddel genoptager vand, vil dets vandaktivitet i et område være adskilligt større end vandaktiviteten i det samme levnedsmiddel, der er blevet tørret til det samme vandindhold. Fænomenet kaldes *hysteres* og er illustreret i figur 6-8. Det kan forklares ved virkningen af vand i kapillarer i lev-



Figur 6-7: Desorptionsisotemer for kartofler ved forskellige temperaturer.



Figur 6-8: Sorptionsisoterm der udviser hysteres.

nedsmidlet. Den såkaldte blækflaske-teori angiver, at kapillarerne har smalle halse og ikke fyldes helt ved adsorption før ved ret høj vandaktivitet. Ved desorption bliver de tømte langsomt gennem den smalle hals, hvorfor adsorptionskurven ligger under desorptionskurven.

I 1938 opstillede Brunauer, Emmett og Teller en model for den nedre del af sorptionskurven, hvor vandmolekylerne antages at findes i ét eller ganske få lag. Under forenkede forudsætninger kan en generel ligning for denne såkaldte BET-isoterm opstilles. Den gælder kun for $0.1 < a_w < 0.5$.

$$a_w/(V^*(1-a_w)) = 1/(C*V_m) + (C-1)*a_w/(C*V_m)$$

V = adsorberet vandmængde i monolaget i g/g tørstof

V_m = adsorberet vandmængde når monolaget er fyldt op, i g/g tørstof

C = $e^{Q/RT}$

Q = adsorptionsvarmen for molekyler i monolaget

V_m , vandmængden i det mættede monolag, kan beregnes ved eksperimentelt at afsætte $a_w/(V^*(1-a_w))$ som funktion af a_w .

Hældningskoefficienten for den rette linie, der derved fremkommer, se figur 6-9, er $(C-1)/(C*V_m)$ og stykket der afskæres på ordinaten er $1/(C*V_m)$. C og V_m kan således bestemmes, og når V_m kendes, kan monolagets overflade, S_0 , beregnes. Hvis et vandmolekyles areal, A , sættes til 10.6 \AA^2 fås:

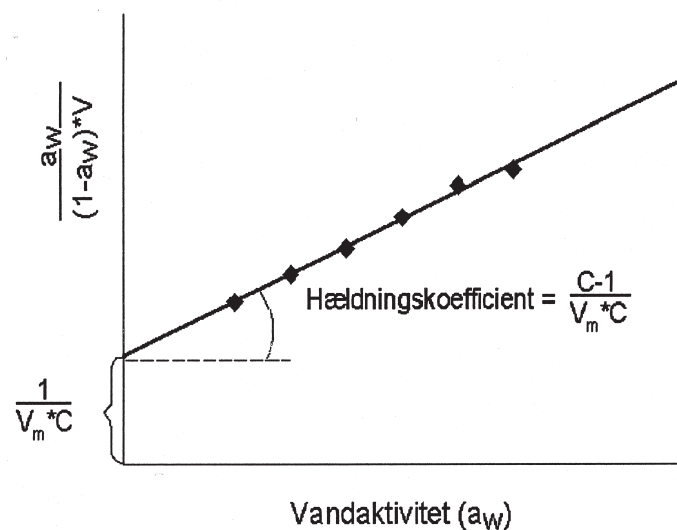
$$S_0 = A*V_m*N_0/M = V_m*3.5*10^3 \text{ m}^2/\text{g tørstof}$$

M = molvægt af H_2O = 18 g/mol

N_0 = Avogadros tal = $6*10^{23}$ molekyler /mol

For de fleste levnedsmidler er der fundet en »indre vandoverflade« på 100-250 m^2/g . Udføres samme type forsøg med kvælstof i stedet for vand, finder man overflader på kun 0.2-2 m^2/g . Forskellen forklares ved, at vandmolekyler, i modsætning til N_2 molekyler, ved hjælp af stærke hydrogenbindinger er i stand til at øge mobiliteten af de polymerer, der indgår i levnedsmidlet, jf. afsnit 6.2.4.

Hvis BET teorien er korrekt, skal sorptionsvarmen, Q , være konstant til monolaget er fyldt op, og så falde pludseligt. Sorptionsvarmen er faktisk højest ved lavt vandindhold, og falder så gradvist, hvilket tyder på, at vand ved højere vandindhold findes fastholdt som kapillært vand.



Figur 6-9: Beregning af vandmængden i monolaget efter BET-isotermen ved hjælp af samhoørende værdier for a_w og vandindhold