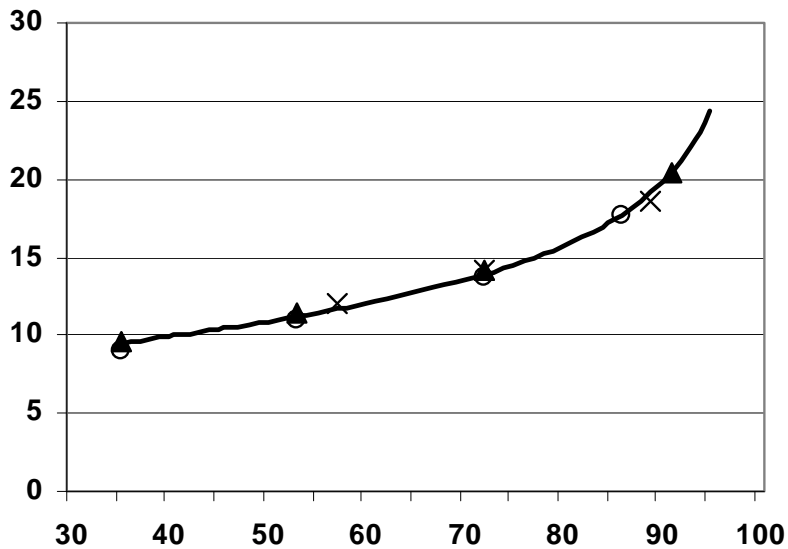


Halm som bränsle - Del 2: Fuktegenskaper

Straw as fuel
- Part 2: Moisture characteristics

Daniel Nilsson
Sven Bernesson



Halm som bränsle - Del 2: Fuktegenskaper

*Straw as fuel
- Part 2: Moisture characteristics*

Daniel Nilsson
Sven Bernesson

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för energi och teknik

Halm som bränsle
Del 2: Fuktegenskaper

Straw as fuel
Part 2: Moisture characteristics

Daniel Nilsson och Sven Bernesson

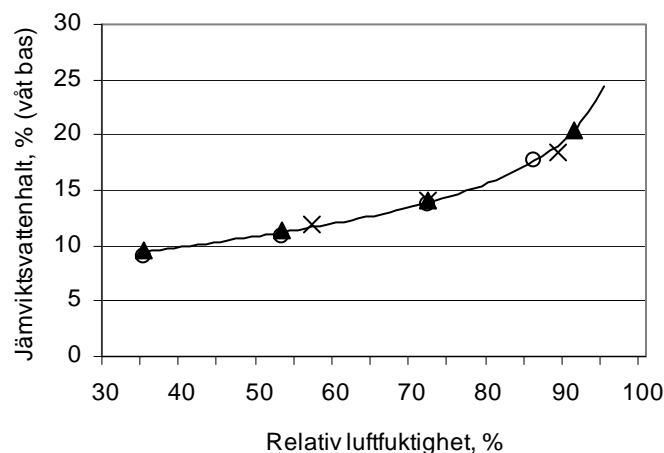
Report 018
ISSN 1654-9406
Uppsala 2009

Nyckelord: biobränsle, halm, fuktegenskaper, jämviktsvattenhalt, fälttorkning, biofuel, straw, moisture characteristics, equilibrium moisture content, in-field drying

SAMMANFATTNING

Syftena med detta projekt var a) att undersöka och modellera jämviktsvattenhalten hos spannmåls- och oljeväxthalm, b) att undersöka och kvantifiera eventuella skillnader i jämviktsvattenhalt mellan olika halmslag, olika sorter och olika tröskningsmetoder (skakar- respektive rotortröskning), c) att undersöka om det finns skillnader i uppfuktningshastighet mellan olika halmslag och tröskningsmetoder, d) att ta reda på hur stor hysteres-effekten är för halm, d v s om det finns skillnader i jämviktsvattenhalt mellan uppfuktning och nedtorkning, e) att ta fram en datormodell med vars hjälp man kan simulera halmens vattenhalt i fält timme för timme, samt f) att ta fram modellparametrar genom att följa vattenhalten i halmsträngar i fält, och även försöka göra en generell bedömning av modellens validitet.

Jämviktsvattenhalterna för halm undersöktes i klimatkammare, då temperaturerna (isotermer-na) $+5^{\circ}\text{C}$, $+15^{\circ}\text{C}$ och $+25^{\circ}\text{C}$ hölls konstanta och den relativa luftfuktigheten (RF) stegvis ökade från 35% till 53%, 72% och 90%. De undersökta proverna innehöll halm från höstvetete, vårvete, rågvete, höstråg, vårkorn, havre, höstraps och vårraps. För höstvetete ingick prover från två olika sorter och från otröskad, gul och grå halm, och för vårvete från två olika sorter och från rotor- och skakartröskad halm. Resultaten visade bl a att vattenhalten för höstvetehalm når 18% vid en relativ luftfuktighet på 85-90% (se figuren nedan). Fem ofta använda ekvationer för modellering av jämviktsvattenhalter (Henderson-, Chung-Pfost-, Halsey-, Oswin- och GAB-ekvationerna) anpassades till mätdata genom icke-linjär regression. Halseys ekvation (den temperaturoberoende varianten) visade sig vara den mest lämpade för flertalet av halmslagen.



Simulerad jämviktsvattenhalt med hjälp av Halseys temperaturoberoende ekvation (heldragen linje), samt uppmätta jämviktsvattenhalter vid $+5^{\circ}\text{C}$ (x), $+15^{\circ}\text{C}$ (o) och $+25^{\circ}\text{C}$ (▲), för höstvetehalm.

Vid en jämförelse mellan de olika halmslagen, kunde det inte påvisas några signifikanta skillnader mellan dem, förutom för havrehalm. Detta halmslag hade en något högre jämviktsvattenhalt än de övriga halmslagen, särskilt vid höga relativa luftfuktigheter. Vid lägre relativa luftfuktigheter hade rapshalm en något högre jämviktsvattenhalt, men denna skillnad var dock inte tillräckligt stor för att ge utslag vid de statistiska analyser som använts i studien. Några signifikanta skillnader kunde inte heller ses mellan gul och grå halm, och mellan rotortröskad och skakartröskad halm.

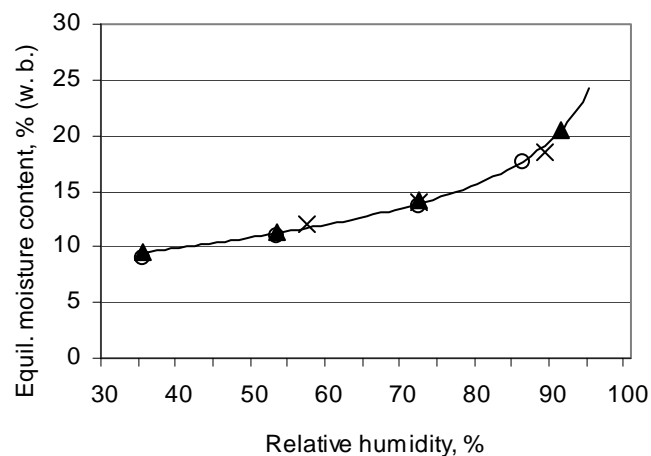
Absorptionshastigheten undersöktes för olika halmprover när RF ändrades från 53% till 72% vid +15°C. Av resultaten framkom att havrehalm hade den största hastigheten initialt, medan vårvete hade den lägsta. Samtliga prover nådde jämviktsvattenhalten efter ca 10 timmar. Klimatkammarförsöken visade också att det finns en viss hysteres vid absorption-desorption av halm. I dessa försök hölls temperaturen vid +15°C, medan RF varierade enligt 53% → 72% → 90% → 72% → 53%. Uppskattningsvis rör det sig om 1-2 procentenheter.

En modell, som tidigare har tillämpats på linhalm, användes för att simulera halmens vattenhalt när den ligger i strängar på fälten. Modellen tar bl a hänsyn till både avdunstning och daggbildning. Den använder nederbörd, globalstrålning, temperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet och molnighet som inparametrar, och beräknar sedan halmens vattenhalt timme för timme. Tre fältförsök gjordes under åren 2007-08 då vattenhalten följdes i strängar med höstvetehalm, och sedan togs modellparametrar fram genom regression. Vid jämförelser mellan uppmätta värden och simulerade, framkom att modellen beskrev halmens torknings- och uppfuktningsförlopp med en acceptabel noggrannhet.

ABSTRACT

The objectives of this project were a) to investigate and model the equilibrium moisture content of straw from cereals and oilseed crops, b) to investigate and quantify possible differences in straw equilibrium moisture content between different crops, varieties and threshing methods (shaker and axial flow combines), c) to investigate the moisture absorption rates in straw from different crops and threshing methods, d) to investigate the hysteresis characteristics of straw, i.e. the difference in moisture content between absorption and desorption conditions, e) to develop a model to simulate the moisture content in straw swathes on an hourly basis, and f) to estimate model parameters by monitoring the moisture content in straw swathes in field trials and to evaluate the general validity of the model.

The equilibrium moisture content was investigated in climate chambers by keeping the isotherms +5°C, +15°C and +25°C constant while the relative humidity was increased stepwise from 35% to 53%, 72% and finally 90%. The samples comprised straw from winter wheat, spring wheat, triticale, rye, barley, oats, winter rape and spring rape. For winter wheat, there were samples from two varieties and from unthreshed, 'yellow' and 'grey' straw. For spring wheat, there were samples from two varieties and straw from shaker and axial flow combines. The results showed, for example, that a moisture content of 18% (wet basis) was reached at a relative humidity of 85-90% for winter wheat (see below). Five commonly used equations for modelling the equilibrium moisture contents (the Henderson, Chung-Pfost, Halsey, Oswin and GAB-equations) were adapted to the experimental data by non-linear regression. The Halsey equation (the version independent of temperature) had the best goodness of fit for most straw types investigated.



Simulated equilibrium moisture content (by means of the Halsey equation; the version independent of temperature) (solid line), and measured values at +5°C (x), 15°C (o) and 25°C (▲), for winter wheat straw.

In a comparison of straw from different crops, no statistically significant differences in the equilibrium moisture content were found, except for oat straw. This type of straw had somewhat higher equilibrium moisture content, especially at high relative humidity. At low relative humidity, straw from rape had a somewhat higher equilibrium moisture content, but this difference was not statistically significant. Furthermore, no statistically significant differences were found between 'yellow' and 'grey' straw, or between straw from shaker and axial flow combines.

The moisture absorption rate was investigated at a temperature of +15°C when the relative humidity was increased from 53% to 72%. The results showed that oats had the highest rate initially, while straw from spring wheat had the lowest. However, all samples reached their equilibrium moisture content within about 10 hours. The climate chamber investigations also showed that straw has some absorption-desorption hysteresis. In these trials, the temperature was kept at +15°C, while the relative humidity was varied according to 53% → 72% → 90% → 72% → 53%. The hysteresis was estimated to be 1-2 percentage points.

A computer model, which has earlier been applied to flax straw, was used to simulate the moisture content in straw swathes under field conditions. The model took into account factors such as evaporation of water and formation of dew. It used precipitation, global radiation, temperature, relative humidity, wind speed and cloudiness as input data to calculate the straw moisture content on an hourly basis. Three field trials were carried out during 2007-08, when the moisture content was monitored in swathes with winter wheat straw. The model parameters were then determined by regression. Comparisons between measured and predicted moisture contents showed that the model simulated the drying and rewetting processes with acceptable accuracy.

FÖRORD

I Sverige har spannmåls- och oljeväxthalm en stor potential som fastbränsle. Halm är ett hygroskopiskt material och dess vattenhalt har stor betydelse för både dess användbarhet och dess kvalitet som bränsle. Vid bärgningen måste exempelvis vattenhalten hållas på en låg nivå för att undvika mögelbildning och ts-förluster, och under lagringen bör halmen skyddas från fukt för att inte dess bränselekvalitet ska försämrats. I denna studie har halmens fuktegenskaper undersökts, bl a när det gäller dess jämviktsvattenhalt och dess torknings- och uppfuktnings-egenskaper i fält.

Denna rapport är den andra av tre som beskriver resultaten i ett forskningsprojekt om bränslehalm ("Kostnader, tillgångar och kvalitet hos bränslehalm") vid Institutionen för energi och teknik, SLU. Den första rapporten heter "Halm som bränsle. Del 1: Tillgångar och skördetidpunkter" (rapport 2009:011, Inst. för energi och teknik, SLU, se även: www.et.slu.se).

Till projektet har en referensgrupp varit knuten, bestående av Per-Anders Hansson, SLU, Gunnar Lundin, JTI, Sven-Göran Green, Lantmännen Energi, och Nils-Erik Bondesson, LRF Sydost. Vi vill tacka dem för deras medverkan. Vi vill även tacka personalen vid Fytotronen i Uppsala för hjälp vid klimatkammarförsöken.

Slutligen vill vi framföra vårt tack till Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF), som har finansierat projektet.

Uppsala, 15 december 2009

Daniel Nilsson och Sven Bernesson

INNEHÅLL

1. INLEDNING	9
1.1. Bakgrund	9
1.2. Syfte	10
2. HALMENS JÄMVIKTSVATTENHALT	12
2.1. Teori	12
2.2. Material och metoder	15
2.2.1. Material	15
2.2.2. Metod - praktiska försök	16
2.2.3. Metod - statistiska analyser	18
2.3. Resultat	19
2.3.1. Regressionsanalys	19
2.3.2. Jämförelser mellan spannmålsslag, tröskningsmetoder, m m	26
2.3.3. Absorptionshastighet	26
2.3.4. Hysteres	28
2.4. Diskussion	29
3. MODELLERING AV TORKNING OCH UPPFUKTNING I FÄLT	33
3.1. Metod	33
3.1.1. Allmänt om fukttransport m m	33
3.1.2. Modellansats	33
3.1.3. Förändringar av mängden bundet vatten	34
3.1.4. Avdunstning och kondensation	35
3.1.5. Förändringar av mängden fritt vatten	36
3.2. Parameterestimering	37
3.2.1. Bestämning av M_0 och M_{\max}	37
3.2.2. Bestämning av a, b och c	37
3.3. Diskussion	43
4. SLUTSATSER	46
REFERENSER	47
BILAGA 1. BERÄKNING AV POT. EVAPOTRANSPIRATIONEN	51

1. INLEDNING

1.1. Bakgrund

I Sverige används halm idag som bränsle i några mindre värmeverk samt i uppskattningsvis några hundra gårdsanläggningar. Antalet gårdsanläggningar har ökat sakta men säkert, samtidigt som det har presenterats planer på storskalig användning av bränslehalm i kraftvärmeverk (Mattsson (red.), 2006; Forsberg m fl, 2007).

En viktig egenskap hos halm är att det är ett hygroskopiskt och biologiskt nedbrytbart material. Vattenhalten har därför stor betydelse för både dess användbarhet och kvalitet som bränsle. Redan vid tröskning är halmens vatteninnehåll relativt låg eftersom växten och dess strå är döende eller dött. Normalt är materialet därför lättorkat och tiden för nedtorkning fram till pressning av balar kan således vara kort. Genom påverkan av nederbörd och dagg kan dock vattenhalten variera kraftigt. Vid pressning till balar bör vattenhalten vara högst 18-19% (Bernesson & Nilsson, 2005), annars finns det risk för tillväxt av mögelsvampar. Mögel i balarna leder till torrsubstansförluster, och det kan också leda till arbetsmiljöproblem vid hanteringen, samt stopp i rivare och transportanordningar. Även om den är liten, så finns det också en viss risk för självantändning om blöt halm pressas eller lagras tillsammans med torr halm.

Restriktionen angående tillräckligt låg vattenhalt vid pressning påverkar bärgningskostnaderna i ganska hög utsträckning (Nilsson, 1999a). I många fall vill lantbrukarna ha tillgång till sina fält tidigt på hösten för att kunna förbereda för nästkommande gröda. Samtidigt kan ogynnsamt väder innebära att denna gränsvattenhalt är svår att nå. För att kunna tillfredsställa leveransbehovet, krävs därför en viss överkapacitet på maskinkedjan för att man ska kunna bärga all halm även under besvärliga år. Denna överkapacitet medför att de fasta kostnaderna stiger.

Mängden nederbörd på halmen, när den ligger på fälten, kan också påverka dess bränslekvalitet. Jämfört med nytröskad gul halm, har s k grå halm, d v s halm som legat ute ett tag och som utsatts för nederbörd, vanligen lägre askhalt, lägre kaliumhalt, lägre klorhalt och ett högre värmevärde p g a utlakning av vattenlösliga ämnen (Hadders, 1994; Nikolaisen, 1998). Enligt Nikolaisen (1998) kan t ex askhalten minska med en fjärdedel och klorhalten med mer än två tredjedelar.

Uppfuktning av halmbalarna under transport och lagring kan få negativa följder för dess användbarhet som bränsle. Visserligen har balad halm en större motståndskraft mot inträngning av nederbörd, men upprepad och långvarig vattenupptagning via nederbörd eller via kapillär uppsugning kan leda till relativt snabb mikrobiell nedbrytning, särskilt vid högre temperaturer. Dessutom kan materialets fysikaliska egenskaper påverkas så att det uppstår svårigheter vid rivning och inmatning i pannan. Vid förbränning av hela balar kan det i vissa fall uppstå fuktvandring i balar med hög vattenhalt. Detta innebär att fukten vandrar inåt i balen så att det bildas en fuktig kärna, vilket leder till en mer ojämn förbränningstemperatur och sämre förbränningsförhållanden.

Jämviktsvattenhalten är en viktig egenskap hos biologiska material såsom halm. Dessa material absorberar fukt när ångtrycket i materialet är lägre än luftens ångtryck (Brooker m fl, 1992). När det inre ångtrycket kommer i jämvikt med luftens ångtryck, har vattenhalten nått jämviktsvattenhalten. Denna vattenhalt är beroende av vilken relativ luftfuktighet och tempe-

ratur den omgivande luften har. Vid höga vattenhalter och höga temperaturer finns det risk för snabb nedbrytning av materialet av olika mikroorganismer, bl a genom mögelbildning.

Inom bl a livsmedelssektorn används ofta begreppet vattenaktivitet, vilken numeriskt är lika med den relativa luftfuktigheten (angivet med decimaltal) vid jämviktsvattenhalten (Jonsson, 2009; Wikipedia, 2009). Vattenaktiviteten beskriver hur stor den relativa luftfuktigheten blir i mikroatmosfären omkring en produkt med ett visst vatteninnehåll. Denna fukt är lätt tillgänglig för olika mikroorganismer, och vattenaktiviteten används därför som ett mått på risken för bl a mögeltillväxt i livsmedel. I studier som fokuserar på torknings- och uppfuktningsförlopp är dock jämviktsvattenhalten ofta ett mer använt begrepp.

ASAE (American Society of Agricultural Engineers) publicerar regelbundet data om jämviktsvattenhalter för olika jordbruksprodukter (ASAE, 2000), och när det gäller spannmåls-halm, finns endast en källa (Duggal & Muir, 1981) där halm har studerats. Duggal och Muir (1981) undersökte jämviktsvattenhalterna vid absorption av fukt i höstvetehalm. Även vid Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI) har jämviktsvattenhalter studerats, i detta fall desorption (d v s avgivande) av fukt i halm från höstvede, korn och havre (Swain, 1985).

Halmens fuktegenskaper vid varierande väderförhållanden i fält är också en viktig faktor att känna till, särskilt vid pressning av balar. Kravet på tillräckligt låga vattenhalter vid pressningen gör att vädret har stor betydelse för när denna operation kan utföras. Vattenhaltens förändringar som funktion av olika väderparametrar har studerats och modellerats ingående för bl a hö (se bl a Brück & van Elderen, 1969; Thompson, 1981; Smith m fl, 1988; Atzema, 1992). Ett krav för att sådana modeller ska kunna vara användbara i ett vidare perspektiv är dock att indata ska vara någorlunda lätt tillgängliga. Nilsson och Karlsson (2005) utvecklade en modell för simulering av vattenhalten i linhalm. Denna modell använder väderdata som relativt enkelt kan erhållas för ett stort antal platser i Sverige.

1.2. Syfte

Denna studie är uppdelad i två delar. Den första delen handlar om halmens fuktegenskaper under stationära väderförhållanden, d v s då luftens temperatur och luftfuktighet antas vara oförändrade. Syftena med den första delstudien var att:

- undersöka och modellera halmens jämviktsvattenhalt, d v s vattenhaltens beroende av luftens temperatur och relativa luftfuktighet
- undersöka och kvantifiera eventuella skillnader i jämviktsvattenhalt mellan olika spannmåls- och oljeväxtslag, mellan olika sorter, samt mellan olika tröskningsmetoder (skakar- respektive rotortröskning)
- undersöka om det finns skillnader i uppfuktningshastighet mellan olika halmslag och tröskningsmetoder
- ta reda på hur stor hysteres-effekten är för halm, d v s om det finns skillnader i jämviktsvattenhalt mellan uppfuktning (absorption) och nedtorkning (desorption).

Den andra delen handlar om halmens fuktegenskaper under dynamiska väderförhållanden, d v s under fältmässiga väderförhållanden med ständiga förändringar av olika väderparametrar. Syftena med denna delstudie var att:

- ta fram en datormodell med vars hjälp man kan simulera halmens vattenhalt i fält timme för timme
- ta fram modellparametrar genom att följa vattenhalten i halmsträngar i fält, och även försöka göra en generell bedömning av modellens validitet.

2. HALMENS JÄMVIKTSVATTENHALT

2.1. Teori

I ett material kan vatten vara kemiskt eller fysikaliskt bundet (Nevander & Elmarsson, 1994). Den bindningstyp som är intressant i denna studie är det fysikaliskt bundna vattnet, oftast benämnt som förångningsbar fukt (det vatten som avgår vid en standardiserad torkningstemperatur, vanligen vid 105°C). Det kemiskt bundna vattnet är däremot så fast bundet till materialets molekyler att det vanligen inte ingår i fukt-begreppet.

Mängden fysikaliskt bundet vatten i ett material kan uttryckas med hjälp av vattenhalten M_{torr} , där *torr* betecknar torr bas;

$$M_{torr} = q_v / q_{ts} \quad (1)$$

Här är q_v mängden förångningsbart vatten och q_{ts} mängden torrsubstans. Denna kvot kallas också ofta fuktkvoten. I dagligt tal uttrycks ofta vattenhalten i våt bas ($M_{våt}$), dvs som

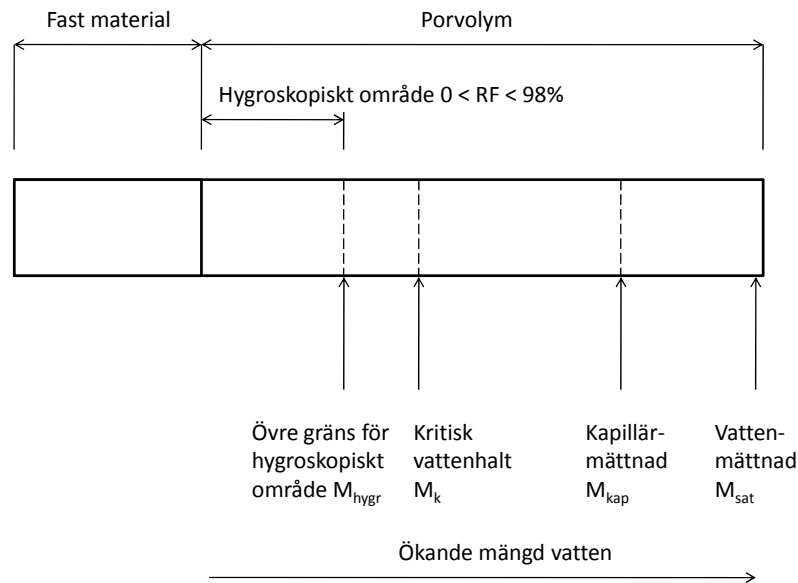
$$M_{våt} = q_v / (q_{ts} + q_v) \quad (2)$$

Ett material består dels av fast material och dels av porer (figur 1). Om materialet från början är helt torrt, tas vatten först upp i det hygroskopiska området från fuktig luft i omgivningen. Tillståndet hos fuktig luft kan beskrivas av temperaturen, trycket och den relativa fuktigheten, där den relativa fuktigheten RF beräknas enligt

$$RF = v / v_s(T) \quad (3)$$

där v är den aktuella ånghalten (eller antalet kg fukt per m³ luft), och $v_s(T)$ mättnadsånghalten vid temperaturen T . Mättnadsånghalten, och därmed också den relativa fuktigheten, är alltså beroende av den rådande temperaturen. Den relativa luftfuktigheten anger således inte hur mycket fukt luften innehåller vid den rådande temperaturen, utan enbart relationen mellan aktuellt fuktinnehåll och mättnadsinnehållet. Temperaturberoendet gör att den absoluta fukt-mängden kan skilja avsevärt mellan olika årstider. Vid -20°C kan t ex 1 m³ luft innehålla ca 1 g vatten, vid 0°C ca 5 g och vid +20°C ca 17 g (SMHI, 2009).

Ju högre den relativa luftfuktigheten är, desto mer vatten tas upp av materialet. En relativ luftfuktighet på 100% är dock i praktiken nästan omöjlig att uppnå i materialets porer med enbart fuktig luft vid konstanta temperaturer (Nevander & Elmarsson, 1994). För att nå 100% behöver materialet stå i kontakt med fritt vatten eller utsättas för temperaturskillnader. Därför säger man ofta att det hygroskopiska området omfattar relativa luftfuktigheter upp till ca 98%. Nästa steg i figur 1 är den kritiska vattenhalten M_k , då det har bildats ett sammanhängande porvattensystem i materialet så att fukttransporten nu sker i vätskefas. Under M_k -gränsen dominerar transport i ångfas. Kapillärmättnad M_{kap} uppnås när materialet har stått i kontakt med fritt vatten under en längre tid. För att uppnå fullständig vattenmättnad M_{sat} måste all luft i porerna drivas ut genom t ex vakuumbehandling (Nevander & Elmarsson, 1994).

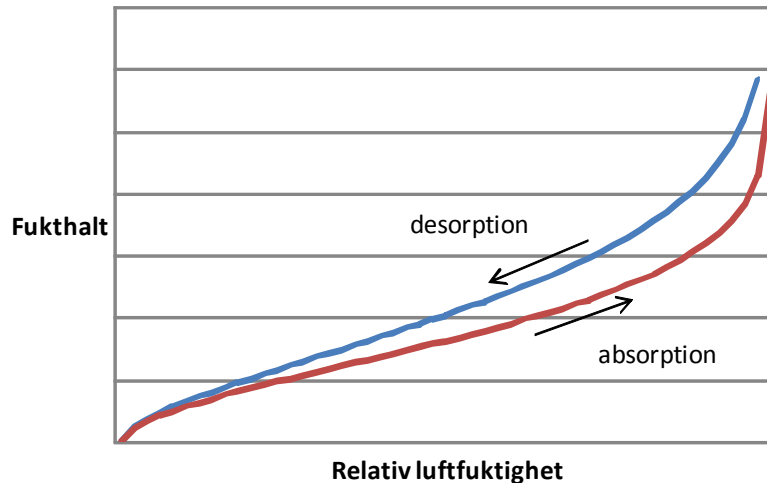


Figur 1. Förhållandet mellan porvolym, hyroskopiskt vatten, kapillärmättnad, etc, för ett material. Källa: efter Nevander & Elmarsson, 1994.

Mängden hyroskopisk fukt i materialets porer påverkas av tillståndet (temperatur, relativ luftfuktighet, tryck) hos fuktig luft i omgivningen. Om materialet tar upp fukt från omgivningen, kallas processen för absorption (uppfuktning), medan det sker en desorption (uttorkning) om fukt avges till omgivningen. Om den upptagna mängden vatten per tidsenhet är lika stor som den avgivna mängden, råder det jämvikt. Den mängd vatten som finns i materialet vid detta tillstånd kallas för jämviktsvattenhalt. Denna vattenhalt varierar för olika material, och det är materialets hyroskopiska egenskaper som bestämmer hur stor jämviktsvattenhalten blir för ett givet tillstånd hos den omgivande luften (Nevander & Elmarsson, 1994).

Begreppet absorption inkluderar både adsorption och kapillärkondensation. Med adsorption menas bindning av vattenmolekyler till fasta materials ytor med hjälp av van der Waals-krafter. Mängden vatten som kan bindas beror bl a av materialets specifika yta, som exempelvis kan uttryckas i m^2/kg . Kapillärkondensation sker då luftens vattenmolekyler fångas in och kondenserar vid konkava vattenytor, s k menisker. Dessa menisker bildas i kapillärer, d v s mycket små avlånga porsystem. Detta beror på att vattenmolekyler som kommer nära en konkav vattenyta attraheras starkare än om de närmar sig en plan yta. Vid en kapillärdiameter på 1 nm behövs en relativ luftfuktighet på minst 10% för att poren ska bli vattenfylld genom kapillärkondensation. Vid en RF på 98%, blir alla porer med diametrar upp till 100 nm (0,0001 mm) vattenfyllda (Nevander & Elmarsson, 1994).

En sorptionskurva kan användas för att beskriva jämviktsvattenhaltens beroende av temperaturen och relativa luftfuktigheten för ett visst material (se figur 2). Olika kurvor erhålls beroende på om materialet är torrt eller vattenmättat från början. I figur 2 syns att kurvan för desorption ligger ovanför absorptionskurvan, vilket beror på den s k hysteres-effekten. En förklaring till hysteres är att vatten vid mättnad finns i porer som inte skulle bli fyllda vid uppfuktning (Nevander & Elmarsson, 1994). Hur stor hysteres-effekten blir för ett visst material beror bl a på porernas form och struktur.



Figur 2. Exempel på sorptionskurvor vid uttorkning – uppfuktning av ett material vid en viss temperatur. Skillnaden mellan kurvorna beror på den sk hysteres-effekten.

Sorptionskurvans utseende bestäms vid konstanta temperaturer, och för varje temperatur erhålls en kurva (isoterm) som gäller specifikt för materialet och temperaturen ifråga. Sorptionskurvans utseende kan indelas i tre intervaller, där det första präglas av en ganska stark lutning. Vid dessa låga relativa luftfuktigheter dominerar adsorption, då ett första lager med vattenmolekyler binds till ytan av starka van der Waals-krafter. I nästa intervall planar kurvan ut när flera molekyllager byggs på, men nu med allt svagare van der Waals-bindningar. I det tredje intervallet stiger isotermen kraftigt igen, beroende på att kapillärkondensationen nu dominerar (Van den Berg & Bruin, 1981; Nevander & Elmarsson, 1994; Rahman, 1995). När $RF \geq 98\%$ stiger kurvan mycket kraftigt, och vid dessa värden är det i praktiken omöjligt att bestämma fukthalten. Sorptionskurvor brukar därför sluta när RF är omkring 98%.

Det finns ett antal olika sätt att bestämma jämviktsvattenhalten för ett visst material. Den vanligaste är gravimetriskt genom vägning före och efter insättning i klimatkammare eller i en behållare med saltlösningar där temperaturen och den relativa fuktigheten hålls konstanta (Speiss & Wolf, 1987). Om luften inte har satts i rörelse, såsom i behållare med saltlösningar, kallas metoden statisk gravimetrisk analys, medan den kallas dynamisk gravimetrisk analys om t ex luftkonditioneringsanläggningar används. Fördelen med den dynamiska metoden är att den är betydligt snabbare (Brooker m fl, 1992; Viswanathan m fl., 2003).

I litteraturen finns åtskilliga ekvationer föreslagna för anpassning av mätdata från jämviktsvattenhaltsförsök för olika jordbruksprodukter. Några av de vanligaste, som också användes av Nilsson m fl (2005) för att beräkna jämviktsvattenhalterna i linhalm, hampa och rörflen, är den modifierade Henderson-ekvationen (i denna studie kallad MHEN) (Jayas & Mazza, 1993; ASAE, 2000),

$$M_t = \left(\frac{\ln(1 - RF)}{-A(T + C)} \right)^{1/B} \quad (4)$$

den modifierade Chung-Pfost-ekvationen (här kallad MC-P) (Jayas & Mazza, 1993; ASAE, 2000),

$$M_t = \frac{\ln(-(T + C) \ln(RF) / A)}{-B} \quad (5)$$

den modifierade Halsey-ekvationen (här kallad MHAL) (Jayas & Mazza, 1993; ASAE, 2000),

$$M_t = \left(\frac{-e^{(A+BT)}}{\ln(RF)} \right)^{1/C} \quad (6)$$

den modifierade Oswin-ekvationen (här kallad MOSW) (Jayas & Mazza, 1993; ASAE, 2000),

$$M_t = \frac{A + BT}{(1/RF - 1)^{1/C}} \quad (7)$$

och den modifierade Guggenheim – Anderson - de Boer-ekvationen (MGAB) (Jayas & Mazza, 1993; ASAE, 2000; Aviara m fl., 2004).

$$M_t = \frac{AB \cdot RF(C/T)}{(1 - B \cdot RF)(1 - B \cdot RF + B \cdot RF(C/T))} \quad (8)$$

Samtliga dessa ekvationer beräknar jämviktsvattenhalten (i torr bas) som funktion av temperaturen T (°C) och den relativa luftfuktigheten RF (decimal), och de har också tre koefficienter (A , B , C) som kan bestämmas genom icke-linjär regression.

Dessa ekvationer har använts i en mängd olika tillämpningar. MHEN-ekvationen (Thompson m fl, 1968) och MC-P-ekvationen (Pfost m fl, 1976) har exempelvis visat sig vara lämpliga för att modellera jämviktsvattenhalten hos stärkelsesrika och fiberrika material (Chen & Morey, 1989). MHEN-ekvationen är t ex lämplig för att prediktera jämviktsvattenhalten för vetehalm enligt Duggal och Muir (1981). MHAL-ekvationen (Iglesias & Chirife, 1976) kan med god noggrannhet användas för att beräkna jämviktsvattenhalten för produkter med högt innehåll av olja och protein (Chen & Morey, 1989), medan MOSW-ekvationen (Chen & Morey, 1989) är lämplig för t ex safflowerfrön (ett slags tistelfrön) (Jayas & Mazza, 1991) och majs och majscolvar (Chen & Morey, 1989). MGAB-ekvationen (van den Berg, 1984; Jayas & Mazza, 1993) har rekommenderats som en standardekvation för livsmedel (Lomauro m fl, 1985). Chen & Jayas (1998) visade dock att denna modell kan vara mindre lämplig för stärkelsesrika produkter.

2.2. Material och metoder

2.2.1. Material

Halmprover togs under skördesäsongen 2007 av spannmålsslagen höstvetete, vårvete, rågvete, råg, vårkorn och havre, samt av oljeväxterna höstraps och vårraps (tabell 1). Av tabellen framgår att försöksleden valdes så att man kan jämföra skillnader mellan olika spannmåls- och oljeväxtslag, mellan olika sorter, mellan gul och grå halm, mellan otröskad och röskad halm, samt mellan olika tröskningsmetoder (skakar- resp rotortröskad halm). Proverna togs från fält som valdes ut mer eller mindre slumpvis, och förhoppningen var att dessa fält skulle ge en representativ bild av de sorter m m som används idag.

Proverna för försöksleden 1B-1D, 2B-2C och 8A togs från fält i Uppsala län, försöksled 4A från Halland medan försöksledsproverna 1A, 2A, 3A, 5A, 6A och 7A kom från Blekinge län. I jämförelsen mellan skakar- och rotortröskad vårvetehalm, var skakartröskorna av typen MF 7278 eller MF 7260 (de kördes bredvid varandra), medan rotortröskan var av typen MF 9895 (0,8 m x 3,55 m lång axialrotor).

Tabell 1. Försöksled vid mätningarna av jämviktstvattenhalten. För varje försöksled har tre upprepningar använts

Försöksled	Spannmåls-slag	Sort	Datum fältprov	Skakar-tröskad	Rotor-tröskad	Otröskad	Gul	Grå
1A	Höstvete	Kris	25/8-07	X			X ¹⁾	X ¹⁾
1B	Höstvete	Olivin	9/8-07			X	X	
1C	Höstvete	Olivin	9/8-07		X		X	
1D	Höstvete	Olivin	14/8-07		X			X
2A	Vårvete	Dragon	20/8-07	X			X	
2B	Vårvete	Dacke	5/9-07	X			X	
2C	Vårvete	Dacke	5/9-07		X		X	
3A	Rågvete	Fidelio	11/8-07	X			X	
4A	Råg	Matador	3/8-07	X ²⁾			X	
5A	Vårkorn	Gustav	25/8-07	X			X	
6A	Havre	Vital	15/8-07	X			X	
7A	Höstraps	Status	26/7-07	X ²⁾			X	
8A	Vårraps	Joplin	5/9-07	X ²⁾			X	

¹⁾ Provet hade börjat bli grått.

²⁾ Dessa prover var inte tröskade, men halmen knycklades ihop för att i någon mån efterlikna effekten av en skakartröska.

2.2.2. Metod - praktiska försök

Försöken genomfördes i en klimatkammare med tre isotermer i absorptionsförsöken: +5°C, +15°C och +25°C (tabell 2). Dessa temperaturer ansågs täcka de praktiska temperaturintervall som kan råda vid bärgning och hantering av halm. För varje temperatur ökades luftfuktigheten i klimatkammaren stegvis från 35% till 90%. Lägre/högre relativa luftfuktigheter var inte möjliga att hålla konstanta under en längre tid, bl a beroende på isbildning och igensättning på klimataggregatet. Av samma skäl var den lägsta relativa luftfuktigheten för +5°C-isotermer 57%.

Tabell 2. Isotermer (+5 °C, +15 °C, +25 °C) och stegvis ökande relativa luftfuktigheter vid absorptionsförsöken

Temperatur	RF ₁	RF ₂	RF ₃	RF ₄
T ₁ = +5°C	-	57%	72%	90%
T ₂ = +15°C	35%	53%	72%	90%
T ₃ = +25°C	35%	53%	72%	90%

Som nämnts tidigare, fanns det tre prover (upprepningar) för varje försöksled. Varje prov bestod av klippta strån som totalt vägde runt 10 g, med en spridning på 5-15 g. Dessa strån placerades i en aluminium-form som var perforerad på sidorna. Före insättning i klimatkammaren torkades proverna i en torkugn (+50°C) under ca en halvtimme för att försäkra sig om

att det var absorption vid den första mätpunkten (T_x, RF_1). Därefter vägdes proverna med jämna mellanrum (nästan varje dygn; oftast två gånger per dygn; vid några tillfällen 5 gånger under en dag med 3-4 timmars mellanrum då upptorkningsförloppet studerades mer detaljerat de första 12 timmarna efter det att förhållandena i klimatkammaren ändrats) tills jämvikt ansågs ha uppnåtts, d v s då skillnaden i vikt var försumbar mellan två konsekutiva vägningar. När jämvikt var uppnådd, ökades den relativa luftfuktigheten ett steg till ett nytt värde ($RF_x \rightarrow RF_{x+1}$), varefter vägningarna fortsatte. (I praktiken visade det sig vara svårt för klimataggregatet att hålla de inställda börvärdena vid luftfuktighetsnivån 90%, och efter kontroll av dess loggfiler, användes RF-värdena 89%, 86% och 91% för temperaturerna +5°C, +15°C respektive +25°C i analyserna, se även i resultatkapitlet nedan).

När jämvikt hade uppnåtts för den högsta luftfuktigheten (RF_4), torkades proverna i torkugn (105°C) under 24 timmar för bestämning av TS-halten enligt ASABE:s standard ASAE S358.2 DEC1988 (R2008) (ASABE, 2008). Försiktighet iaktogs i försöken med tanke på risken för mögelbildning och därmed TS-förluster, bl a genom att begränsa exponeringstiden i klimatkammaren så mycket som möjligt vid höga luftfuktigheter. Med hjälp av vägningarna vid klimatkammaren och TS-bestämningen beräknades sedan vattenhalten för varje mätpunkt.

I klimatkammaren placerades proverna i grupper om fyra på små vagnar ca 1 m ovan golvet (se figur 3). Vid vägningen togs en vagn med prover ut, och det tog ca 1 minut att väga dessa prover, innan nästa vagn hämtades för vägning.

Absorptions hastigheten, d v s hur snabbt halmen tar upp vatten, kan vara en intressant parameter, t ex vid jämförelser av olika bearbetningsmetoder (skakartröska kontra rotortröska) av halmstrået. I försöken undersöktes absorptions hastigheten vid temperaturen +15°C då RF ändrades från 53% till 72%. Denna hastighet beräknades som $\Delta M_{torr}/\Delta t$, där ΔM_{torr} är differensen i vattenhalt (torr bas) mellan två mätningar, och där Δt är tiden mellan mätningarna. Den använda sorten blir således g vatten per kg ts och timme. Efter ändring av klimataggregatet till $RF=72\%$, vägdes proverna strax före ändringen, och sedan 3.40, 6.40, 9.50, 12.40, 24.20 samt 36.20 (timmar.minuter) efter ändringen. Klimatkammaren uppnådde en relativ luftfuktighet på 72% ca 10 min efter ändringen enligt dess loggfil.

För isotermer +15°C gjordes även en desorptionsundersökning, då den uppnådda absorptionsfuktigheten 90% stegvis sänktes till 72% och 53% för vissa prover. Denna undersökning gjordes för att ge en indikation på hur stor hysteres-effekten är för halm.

Klimatkammaren fanns på Fytotronen vid SLU i Uppsala. Den var av fabrikatet Weisstechnik Typ 18'E/+10 JU/5 DU-Pa, tillverkad av Weiss Umwelttechnik GmbH, D-6301 Reiskirchen 3 (Lindenstruth), Tyskland. Klimataggregatet var av märket Jumo Dicon 1001 (Universal Profile Controller), från M.K. Juchheim GmbH & Co, 36035 Fulda, Tyskland. Kalibreringar av klimataggregatet görs regelbundet av personalen på Fytotronen. Vågen som användes i försöken var en Mettler Type PM 2000 FNR 34106 084 04, från Mettler Instrumente AG, CH-8606 Greifensee-Zürich, Schweiz.



Figur 3. Vagnar med prover i en klimatkammare.

2.2.3. Metod - statistiska analyser

Det genomsnittliga värdet av de tre upprepningarna beräknades för varje försöksled. Därefter beräknades konstanterna A , B och C i de fem ekvationerna (4)-(8) med hjälp av statistikprogrammet SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). En procedur för icke-linjär regression (NLIN) användes. NLIN minimerar summan av kvadraten på residualerna i en iterativ process.

Kurvornas anpassning ("goodness of fit") uppskattades med hjälp av medelvärdet av den relativa procentuella avvikelserna ("mean relative percentage deviation") P (%):

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (9)$$

där Y och \hat{Y} är de mätta respektive skattade jämviktsvattenhalterna, och där N är antalet mät-punkter. Vidare gav även måttet E_S ("standard error of estimate", eller medelfelet) en uppfattning om skattningarnas giltighet:

$$E_S = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{d_f}} \quad (10)$$

där d_f är antalet frihetsgrader, d v s antalet observationer minus antalet variabler. Ju lägre P och E_S är, desto bättre är modellen på att prediktera jämviktsvattenhalten.

Chen & Morey (1989) har visat att låga värden på P och E_S inte alltid är tillräckliga kriterier för att påvisa en bra anpassning av en isoterm-ekvation. De föreslår att även residual "plots" används, och därför har residualerna ritats in som funktion av uppmätta jämviktsvattenhalter

(med residual menas skillnaden mellan uppmätt värde och simulerat värde). Dessa diagram har sedan bedömts visuellt, och om man ser tydliga mönster eller trender, bör modellen inte accepteras.

För att beräkna om det fanns några signifikanta skillnader i parameterestimeringen mellan olika försöksled (d v s olika spannmålsslag, olika tröskningsmetoder, m m), infördes tre nya parametrar (Q_A , Q_B , och Q_C) och en kontrollvariabel (D) i den ekvation som hade bäst anpassning (se även en tillämpning av metoden i Nilsson m fl (2005)). Till parametrarna A , B och C adderades termerna Q_AD , Q_BD och Q_CD , där D sattes till 1 för alla observationer som hörde till ett visst försöksled, och till 0 för alla observationer som hörde till det jämförda försöksledet. Om konfidensintervallen (signifikansnivå 95%) vid skattningen av Q_A , Q_B och Q_C inte innehöll 0, antogs det att det fanns en signifikant skillnad i skattningarna av A , B och C . Därmed antogs också att det fanns en skillnad mellan försöksleden. (Då det visade sig att temperaturberoendet var litet, gjordes dessa jämförelser med enbart två parametrar, A och B , se i resultatkapitlet).

2.3. Resultat

2.3.1. Regressionsanalys

Resultaten från regressionsanalysen visas i tabell 3. Anpassningen av Hendersons ekvation konvergerade inte för något av försöksleden, trots att flera olika startvärden provades, och trots att maximala antalet iterationer var 100. Detta beror sannolikt på att det inte fanns några tydliga skillnader för olika isotermer i mätningarna, d v s att jämviktsvattenhalten var oberoende av temperaturen. I dessa försök låg de uppmätta värdena inom ett mycket snävt intervall, och ofta låg +25°C-isotermer t o m ovanför +15°C-isotermer, vilket alltså gav problem med Hendersons ekvation.

Även för GAB-ekvationen konvergerade inte iterationerna för vissa försöksled, sannolikt av samma skäl som för Hendersons ekvation. När det gäller de olika modellerna, hade Halseys och Oswins ekvationer bäst passning i nästan samtliga fall (tabell 3).

Tabell 3. Koefficienter (A , B) och avvikelser (E_S , P) för olika ekvationer och försöksled

Led	Modell	Koefficient			E_S	P
		A	B	C		
1A (höstvet)	MC-P	>10 ⁶	0,162	>10 ⁶	0,716	3,24
	MHAL	6,305	0,004	2,690	0,406	1,95
	MOSW	11,826	0,023	3,170	0,383	1,89
	MGAB	7,334	0,774	>10 ⁶	0,602	2,74
1B (höstvet)	MC-P	>10 ⁶	0,168	>10 ⁶	1,469	6,39
	MHAL	6,281	0,020	2,765	0,387	1,71
	MOSW	10,889	0,097	3,262	0,459	2,19
	MGAB	7,500	0,765	<-10 ⁶	1,366	6,02
1C (höstvet)	MC-P	>10 ⁶	0,159	>10 ⁶	1,037	4,88
	MHAL	5,819	0,009	2,571	0,383	1,66
	MOSW	10,950	0,049	3,028	0,443	2,32
	MGAB	6,943	0,790	<-10 ⁶	0,904	3,33
1D (höstvet)	MC-P	>10 ⁶	0,173	>10 ⁶	0,663	3,52
	MHAL	6,491	0,004	2,790	0,411	1,57
	MOSW	11,560	0,025	3,289	0,381	1,55
	MGAB	7,259	0,762	<-10 ⁶	0,524	2,40
2A (vårvet)	MC-P	>10 ⁶	0,180	>10 ⁶	0,667	3,62
	MHAL	6,909	0,003	2,926	0,522	2,17
	MOSW	11,905	0,018	3,453	0,510	2,29
	MGAB	7,508	0,746	>10 ⁶	0,545	2,69
2B (vårvet)	MC-P	>10 ⁶	0,168	>10 ⁶	0,809	3,93
	MHAL	6,067	0,008	2,671	0,280	1,41
	MOSW	11,000	0,040	3,146	0,268	1,49
2C (vårvet)	MC-P	>10 ⁶	0,171	>10 ⁶	0,669	3,45
	MHAL	5,926	0,004	2,631	0,2707	1,34
	MOSW	10,818	0,023	3,099	0,2713	1,63
3A (rågvete)	MC-P	>10 ⁶	0,171	>10 ⁶	0,580	3,16
	MHAL	6,312	0,002	2,728	0,491	2,03
	MOSW	11,452	0,014	3,211	0,409	1,63
4A (höstråg)	MC-P	>10 ⁶	0,179	>10 ⁶	0,576	2,88
	MHAL	6,626	-0,0016	2,835	0,610	2,73
	MOSW	11,668	-0,0009	3,339	0,5365	2,48
	MGAB	7,201	0,753	3375,5	0,5357	2,55
5A (vårkorn)	MC-P	>10 ⁶	0,156	>10 ⁶	1,122	4,37
	MHAL	6,609	0,012	2,771	0,336	1,35
	MOSW	12,260	0,065	3,269	0,393	1,87
	MGAB	8,057	0,764	<-10 ⁶	1,030	3,78
6A (havre)	MC-P	>10 ⁶	0,120	>10 ⁶	2,376	9,30
	MHAL	4,640	0,020	2,126	0,660	2,90
	MOSW	10,313	0,118	2,492	0,885	4,33
7A (höstraps)	MC-P	>10 ⁶	0,161	>10 ⁶	0,796	2,80
	MHAL	6,755	0,0085	2,826	0,554	2,46
	MOSW	12,299	0,046	3,328	0,399	1,62
8A (vårrops)	MC-P	>10 ⁶	0,136	>10 ⁶	2,566	6,08
	MHAL	6,120	0,017	2,575	0,278	1,87
	MOSW	12,215	0,098	3,030	0,273	2,08

Vid analyserna testades också anpassningen av tidigare varianter av ekvationerna, där temperaturberoendet är utelämnat. För denna variant ser Hendersons ekvation (här kallad HEN) ut enligt följande (Rahman, 1995; Jayas & Mazza, 1993):

$$M_t = \left(\frac{\ln(1 - RF)}{-A} \right)^{1/B} \quad (11)$$

och Chung-Pfosts ekvation (här kallad C-P) (Rahman, 1995; Jayas & Mazza, 1993):

$$M_t = -\frac{1}{B} \ln \left(\frac{-\ln RF}{A} \right) \quad (12)$$

Halseys ekvation (här kallad HAL) (Rahman, 1995; Jayas & Mazza, 1993):

$$M_t = \left(\frac{-A}{\ln RF} \right)^{1/B} \quad (13)$$

Oswins (här kallad OSW) (Rahman, 1995; Jayas & Mazza, 1993):

$$M_t = A \left(\frac{RF}{1 - RF} \right)^B \quad (14)$$

samt Guggenheim – Anderson – de Boers ekvation (här kallad GAB) (Rahman, 1995; Jayas & Mazza, 1993):

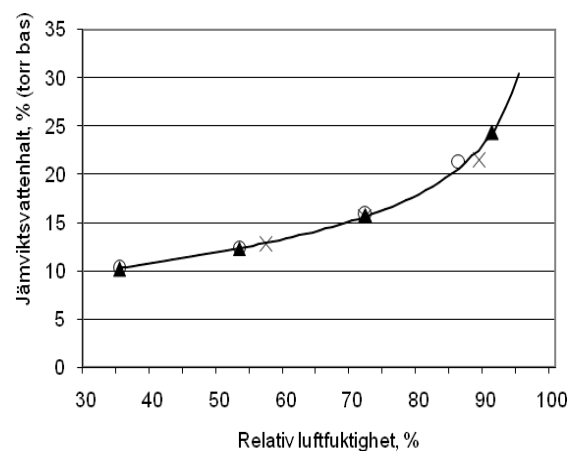
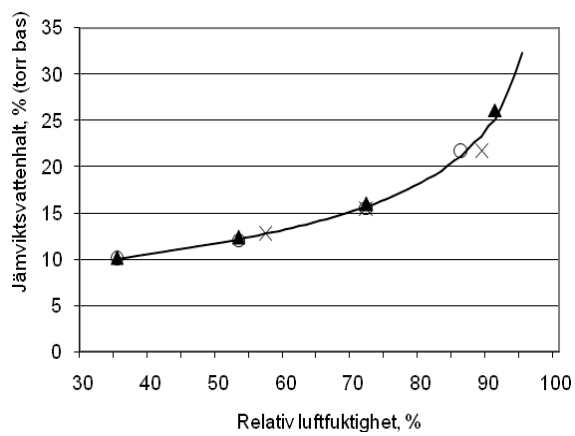
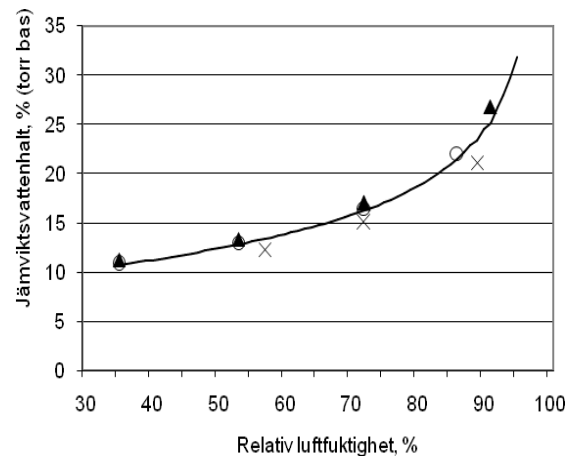
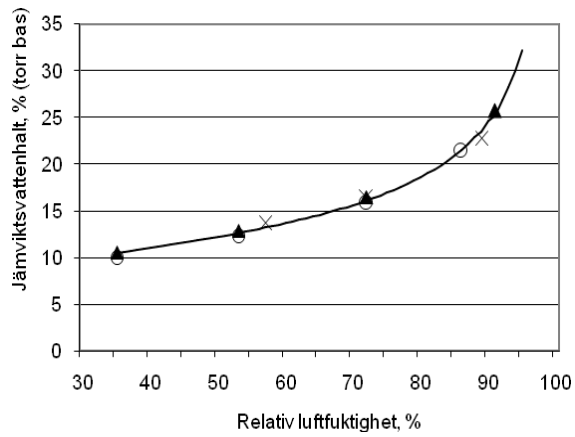
$$M_t = \frac{ABCRF}{(1 - BRF)(1 - BRF + BCRF)} \quad (15)$$

Resultaten från de statistiska analyserna med dessa ekvationer visas i tabell 4. I nästan samtliga fall hade Halseys och Oswins ekvationer bäst passning, och resultaten visas därför endast för dessa. I endast två fall (3A, 4A) klarade GAB att precis få näst lägst E_S , men denna 3-parametersekvation hade å andra sidan problem med att konvergera (värdet på C blev ofta mycket högt). Skillnaden mellan HAL och OSW var liten, men HAL var lägst när det gäller E_S i 10 fall och P i 9 fall av totalt 13. Vid en jämförelse av 2- och 3-parametersmodellerna, d v s HAL och MHAL, samt OSW och MOSW, var passningen generellt bättre för 3-parametersvarianten. Eftersom skillnaden dock var relativt liten, och för att undvika problem med temperaturberoendet och dessutom få en enklare modell med endast två koefficienter, bör 2-parametersvarianterna kunna användas i praktiska tillämpningar.

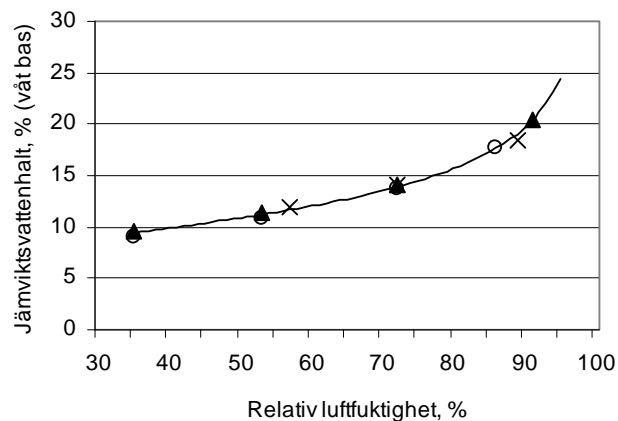
Tabell 4. Koefficienter (A , B) och avvikelser (E_S , P) för HAL och OSW

Led	Modell	A	B	E_S	P
1A (höstvetete)	HAL	582,3	2,690	0,442	2,29
	OSW	12,19	0,315	0,466	2,15
1B (höstvetete)	HAL	740,1	2,768	1,184	5,00
	OSW	12,41	0,305	1,283	5,69
1C (höstvetete)	HAL	391,4	2,572	0,666	2,00
	OSW	11,72	0,330	0,762	3,12
1D (höstvetete)	HAL	709,2	2,792	0,453	1,48
	OSW	11,95	0,304	0,473	2,02
2A (vårvetete)	HAL	1053,5	2,928	0,516	2,06
	OSW	12,20	0,289	0,531	2,62
2B (vårvetete)	HAL	489,0	2,671	0,514	2,17
	OSW	11,63	0,318	0,572	2,65
2C (vårvetete)	HAL	400,1	2,631	0,341	1,44
	OSW	11,18	0,322	0,392	1,71
3A (rågvete)	HAL	569,6	2,728	0,475	1,84
	OSW	11,68	0,311	0,426	1,55
4A (höstråg)	HAL	733,8	2,834	0,581	2,98
	OSW	11,65	0,300	0,506	2,50
5A (vårkorn)	HAL	912,1	2,775	0,803	2,56
	OSW	13,29	0,305	0,896	3,33
6A (havre)	HAL	136,1	2,113	1,720	5,60
	OSW	12,12	0,403	1,886	6,99
7A (höstraps)	HAL	996,0	2,831	0,713	2,44
	OSW	13,02	0,299	0,677	1,78
8A (vårrops)	HAL	592,6	2,574	1,268	4,17
	OSW	13,75	0,329	1,356	4,94

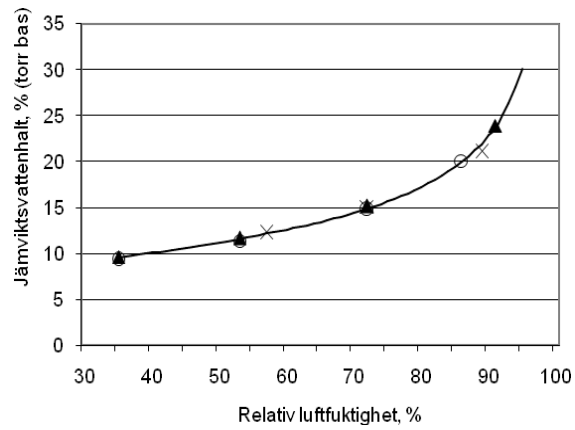
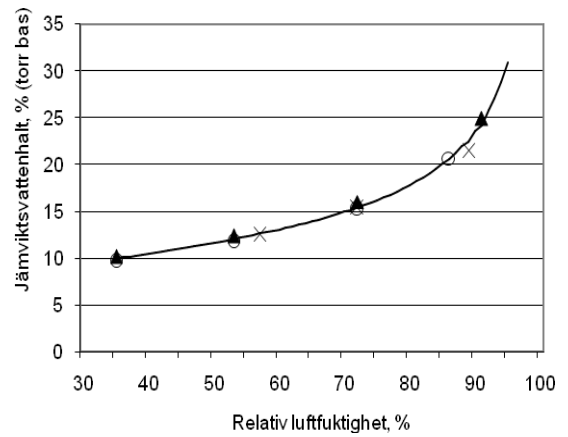
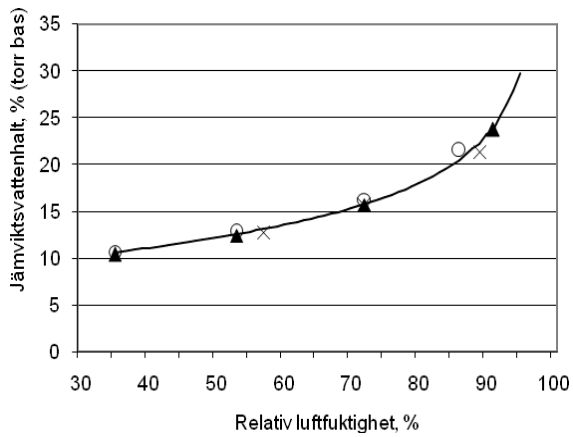
Eftersom HAL generellt hade något bättre passning än OSW, har denna ekvation valts för att visualisera resultaten för samtliga försöksled. I figur 4 visas uppmätta och simulerade värden för försöksleden med höstvetehalm (i figur 5 för höstvetehalm (led 1A) men nu uttryckt i våt bas), i figur 6 för vårvetehalm, och i figur 7 för rågvete-, råg-, vårkorn- havre-, höstraps- och vårrapshalm.



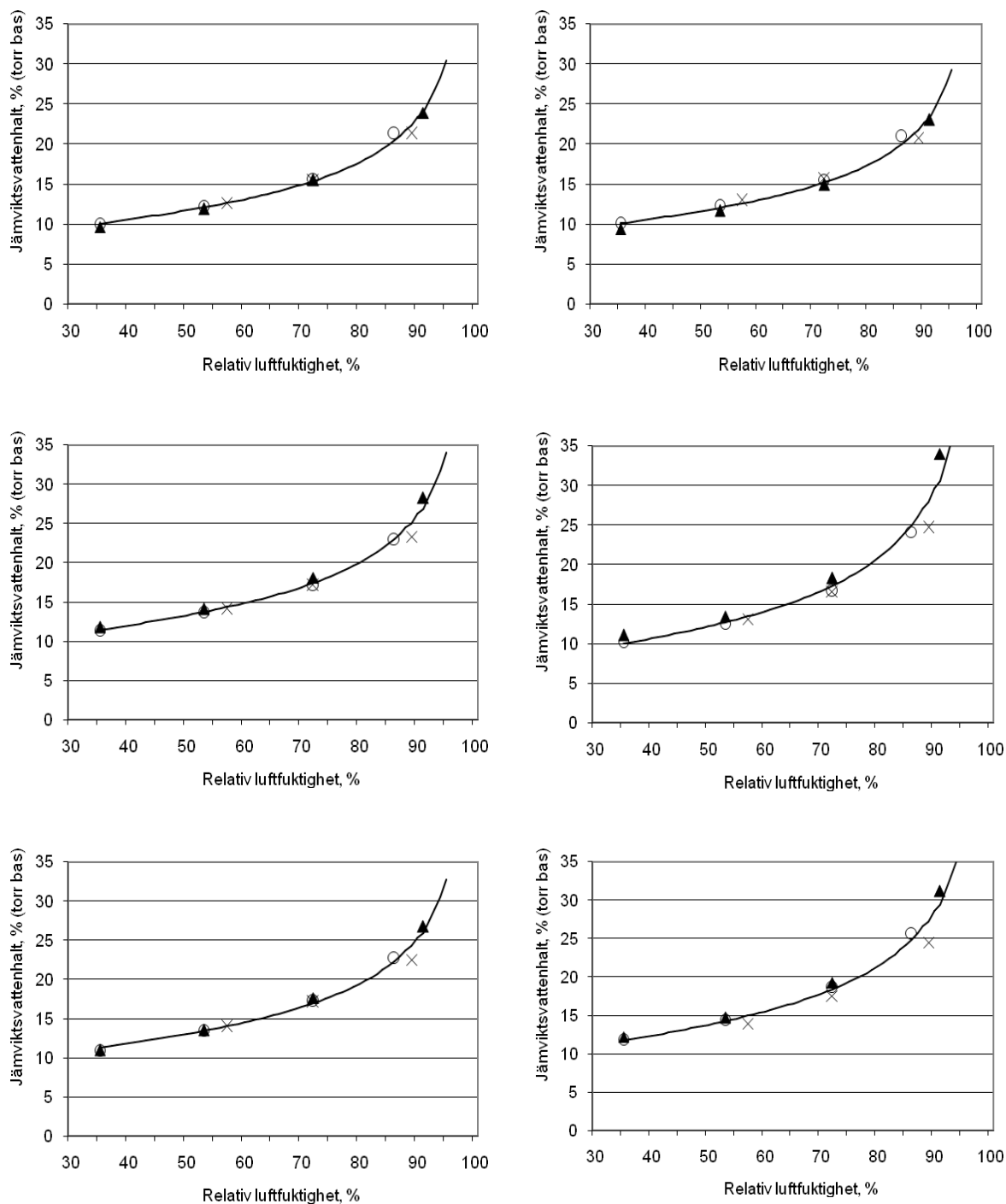
Figur 4. Simulerad (heldragen linje, Halseys 2-parametermodell) och uppmätt (+5°C - X, +15°C - o, +25°C - ▲) jämviktsvattenhalt (% torr bas) för höstvetehalm (led 1A överst t v, 1B överst t h, 1C nederst t v och 1D nederst t h).



Figur 5. Simulerad (heldragen linje, Halseys 2-parametermodell) och uppmätt (+5°C - X, +15°C - o, +25°C - ▲) jämviktsvattenhalt (% våt bas) för höstvetehalm (led 1A).

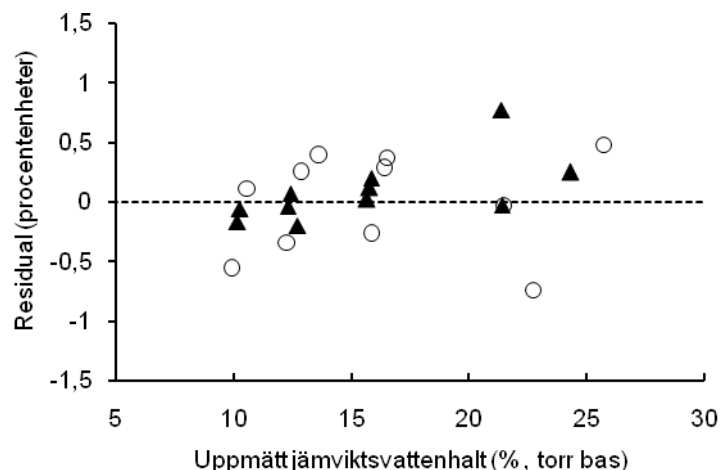


Figur 6. Simulerad (heldragen linje, Halseys 2-parametermodell) och uppmätt (+5°C - X, +15°C - O, +25°C - ▲) jämviktsvattenhalt (% torr bas) för vårvete halm (led 2A överst t v, 2B överst t h och 2C nederst).



Figur 7. Simulerad (heldragen linje, Halseys 2-parametermodell) och uppmätt (+5°C - X, +15°C - o, +25°C - ▲) jämviktsvattenhalt (% (torr bas)) för rågvete (led 3A överst t v), råghalm (led 4A överst t h), vårkorn (led 5A mitten t v), havrehalm (led 6A mitten t h), höstrapshalm (led 7A nederst t v) och vårrapshalm (led 8A nederst t h).

En residual-plot för försöksleden 1A och 1D, vilka kan anses vara representativa för bärgning av bränslehalm, ger inga större indikationer på att Halsey-ekvationen (HAL) bör förkastas (figur 8). I figuren kan en stigande trend för led 1D eventuellt skönjas, men det är å andra sidan endast en punkt som har en nämnvärd avvikelse.



Figur 8. Residual-plot för försöksleden 1A (○) och 1D (▲), där de skattade värdena erhållits med hjälp av Halseys 2-parametersformel (HAL).

2.3.2. Jämförelser mellan spannmålsslag, tröskningsmetoder, m m

Vid samtliga jämförelser användes enbart HAL-ekvationen, eftersom skillnaden gentemot t ex OSW-ekvationen var liten. Dessutom användes HAL istället för MHAL av skäl som angivits i kapitlet ovan.

Vid analysen av olika halmslag, utgjorde led 1A referensen mot vilka övriga halmslag (2A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A och 8A) jämfördes. Resultaten visade att det endast förekom en signifikant skillnad (signifikansnivå 95%) mellan höstvetete och övriga halmslag, nämligen mellan höstvetete och havre (koefficienten B ökade till 3,27). Vid en visuell jämförelse mellan höstvetete (1A) och havre (6A) i figurerna 4 och 7, framgår att skillnaden framförallt finns vid höga värden på RF, där havrehalm har högre jämviktsvattenhalter. I figurerna framgår också att raps-halm har högre jämviktsvattenhalter vid låga RF, men skillnaderna är ändå inte tillräckligt stora för att ge utslag vid parameterestimeringen av HAL.

Vid jämförelsen mellan gul och grå halm användes mätdata för leden 1C och 1D. De statistiska analyserna visade inte på några signifikanta skillnader i parameterestimeringen mellan dessa försöksled. I figur 4 ses också att skillnaden var mycket liten.

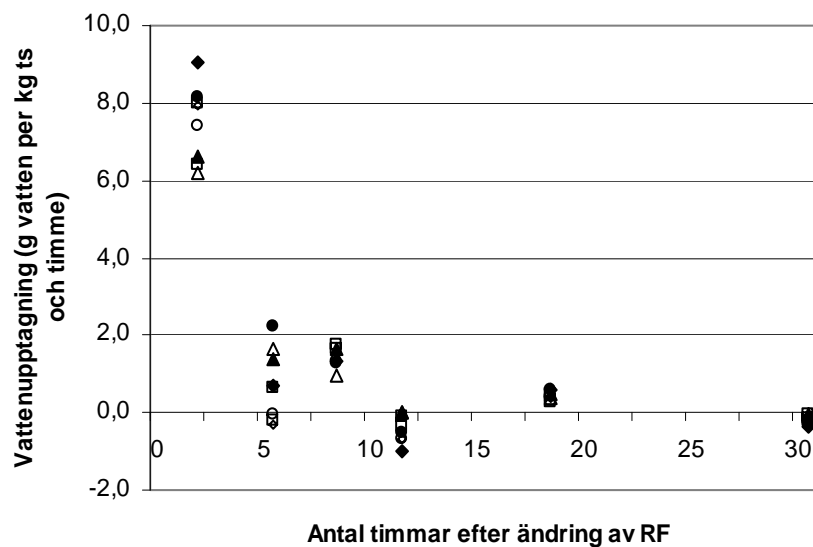
Vid jämförelsen mellan skakar- och rotortröskad halm, kunde några signifikanta skillnader inte heller påvisas (mätdata från leden 2B och 2C), liksom mellan otröskad och (rotor-) tröskad halm (leden 1B-1C). Dessa resultat stöds också av de likartade kurvorna i figurerna 4 och 6.

2.3.3. Absorptionshastighet

Resultaten för olika halmslag visas i figur 9. I dessa försök hade havrehalmen den högsta absorptionshastigheten med 9,1 g vatten per kg ts och timme under det första mätintervallet, som varade 3 timmar och 40 min. Den lägsta absorptionshastigheten under det första intervallet hade rågvete med 6,2 g vatten/kg ts och timme. Mellan dessa var det en ganska jämn spridning av övriga halmslag. Man bör notera att det första mätintervallet var ganska långt

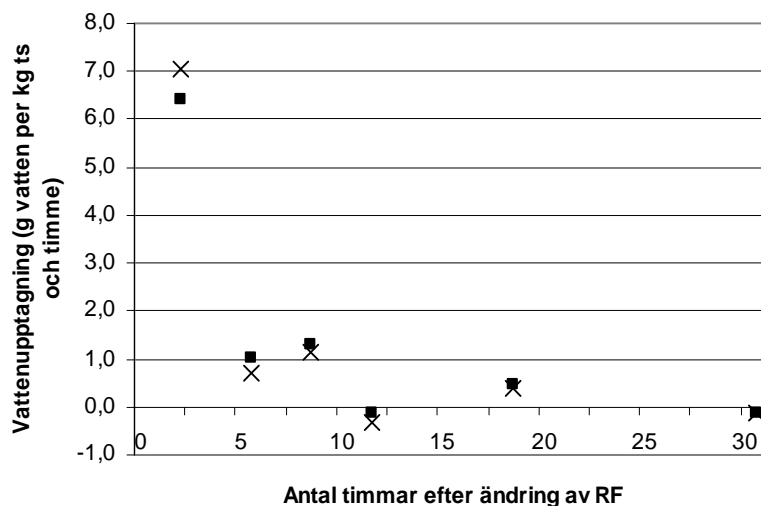
och att dessa värden endast är medeltal för intervallet. Initialt bör hastigheten ha varit betydligt högre än de redovisade värdena.

Av figuren framgår också att samtliga halmslag började närma sig jämviktsvattenhalten efter ca 10 timmar. Pendlingen runt 0-värdet efter ett halvt dygn beror på att klimataggregatet inte höll den relativa luftfuktigheten konstant vid 72,0%, utan svängde från -4 till +2 procentenheter kring det inställda börvärdet.

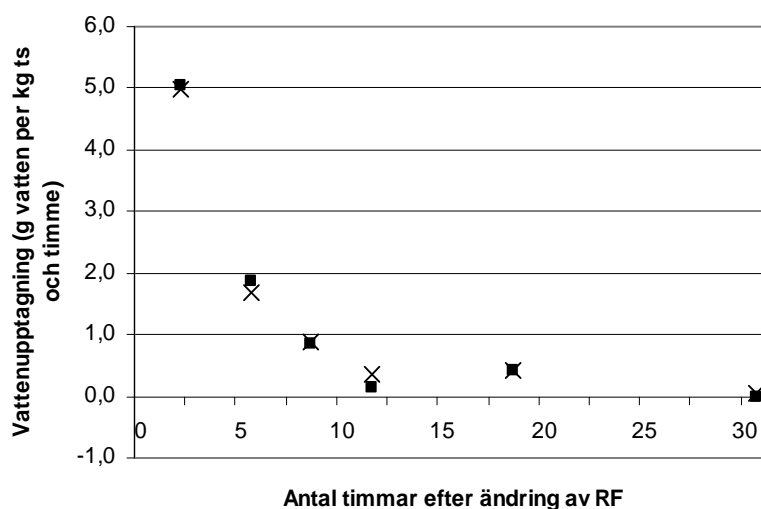


Figur 9. Absorptionshastigheten för halm från höstvetete (□), vårvete (◇), rågvete (Δ), höstråg (○), vårkorn (■), havre (◆), höstraps (▲) samt vårraps (●), då RF ändras från 53% till 72% vid +15°C.

Vid en jämförelse av absorptionshastigheten för gul och grå höstvetehalm (försöksleden 1C och 1D), framkom det att grå halm tog upp fukt snabbare än gul halm (figur 10). Gul halm hade en lägre upptagningsförmåga i början, vilket dock kompenseras med en något högre fuktupptagning i senare skeden. För halm som tröskats med skakar- respektive rotortröska, fanns det inte någon större skillnad i absorptionshastighet (figur 11).



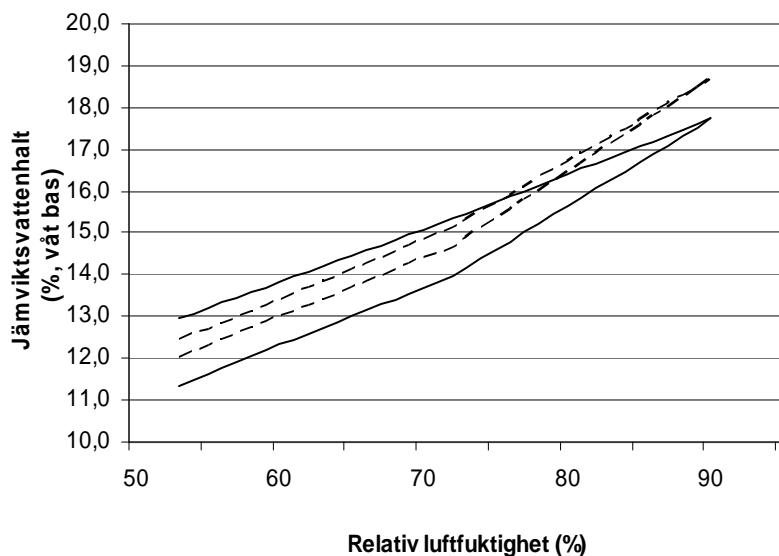
Figur 10. Absorptionshastigheten för gul (■) och grå (X) höstvetehalm, då RF ändras från 53% till 72% vid +15°C.



Figur 11. Absorptionshastigheten för skakar- (■) och rotortröskad (X) vårvetehalm, då RF ändras från 53% till 72% vid +15°C.

2.3.4. Hysteres

Av de hysteres-undersökta försöksleden 1C, 1D, 2A, 3A, 5A och 7A, hade led 2A (vårvete) störst hysteres, medan den var minst för vårkornhalm (se figur 12). Skillnaden i jämviktsvattenhalt mellan absorption och desorption vid RF = 53% var i dessa försök 1,59 procentenheter (våt bas) för vårvete (led 2A), 1,25 resp 1,05 för höstvete (leden 1C och 1D), 0,95 för rågvete (led 3A), 0,94 för hösträps (led 7A), och slutligen 0,40 procentenheter för vårkorn (led 5A).



Figur 12. Jämviktsvattenhalten för halm från vårvete (heldragen linje) och vårkorn (streckad linje) vid absorption (nedre linjer) och desorption (övre linjer). Temperaturen hölls vid +15°C, medan RF ändrades från 53% till 73%, 90%, 72% och slutligen till 53%.

2.4. Diskussion

För jordbruksprodukter ligger isotermer för lägre temperaturer normalt ovanför isotermer för högre temperaturer i sorptionsdiagrammet, d v s jämviktsvattenhalten är högre för lägre temperaturer vid en given relativ luftfuktighet (ASAE, 2000). I dessa försök låg dock de uppmätta värdena inom ett mycket snävt intervall, och ofta låg +25°C-isotermer t o m ovanför +15°C-isotermer, vilket ledde till att iterationerna för de temperaturberoende ekvationerna i många fall inte konvergerade. Exempelvis är koefficienten B i Halseys och Oswins ekvationer normalt < 0 om isotermer ligger ”rätt”, d v s om $M(RF, T) > M(RF, T+x)$, men i de flesta fall var $B > 0$. Detta tyder alltså också på att isotermer ibland låg i ”fel” ordning. En genomgång av eventuella felkällor i mätningarna har gjorts, men inget tyder på annat än att temperaturberoendet är mycket litet. Enligt Perry och Green (1997) kan det också vara så att det inte finns något större temperaturberoende för porösa material vid temperaturer mellan 15°C och 50°C.

Resultaten i denna undersökning kan jämföras med en studie av Duggal och Muir (1981). De analyserade jämviktsvattenhalten (absorption) för höstvetehalm vid fyra olika temperaturer (+5°C, +15°C, +25°C, +35°C) och fyra olika relativa luftfuktigheter (35%, 55%, 70%, 90%), vilka åstadkoms med olika saltlösningar. Resultaten visade ganska tydligt att jämviktsvattenhalten var temperaturberoende, även om skillnaderna var små. Författarna anpassade också olika regressionsmodeller till sina mätdata, och det visade sig att Henderson-modellen hade bäst passning. I jämförelse med denna studie, stämmer jämviktsvattenhalten ganska väl överens för de lägre luftfuktigheterna, medan Duggal och Muir (1981) uppmätte något högre vattenhalter vid höga RF.

Vid absorptionsundersökningar kan materialets tidigare vattenhalter ha en viss betydelse för resultaten. Banaszek och Siebenmorgen (1990a; 1990b) visade t ex att låga initiala vattenhalter generellt gav lägre jämviktsvattenhalter för ris. Om halmen har varit nedtorkad till mycket låga vattenhalter innan försöken genomförs, kan detta därför leda till irreversibla materialförändringar som gör att de hygroskopiska egenskaperna ändras. Även ett stort antal

cykler med uppfuktning och torkning kan ha en viss inverkan (Yang & Cenkowski, 1993). I dessa försök torde dock dessa faktorer inte ha haft någon betydelse för resultaten.

När det gäller jämförelserna av jämviktsvattenhalter mellan olika halmslag, framkom det att endast havrehalm hade signifikant skillnad gentemot vete, som användes som referens. Skillnaden fanns framförallt vid höga värden på den relativa luftfuktigheten, där havrehalm hade högre jämviktsvattenhalter. Även Ahokas m fl (1983) har jämfört jämviktsvattenhalter av halm från höstvete, vårvete, råg, vårkorn och havre. De fann att det inte fanns några nämnvärda skillnader mellan halm från vete, råg och vårkorn. Däremot skiljde sig havrehalm något från de övriga.

Enligt danska erfarenheter, kan vete- och råghalm pressas tidigare på morgonen och senare på kvällen med tillräckligt låg vattenhalt jämfört med kornhalm (Hinge, 2009). I denna studie framkom dock inga resultat som tyder på att detta beror på de olika halmslagens absorptionsförmåga eller absorptions hastighet. Eventuellt kan skillnaderna bero på mängden halm i strängarna, då strängar med vete- och råghalm ofta innehåller mer halm per löpmetr jämfört med kornhalmsträngar.

Vid jämförelsen av jämviktsvattenhalterna mellan gul och grå halm, påvisades att det inte fanns någon statistiskt signifikant skillnad. Dessa resultat stöds till viss del av en liknande studie av Swain (1985), där skillnaden i jämviktsvattenhalt mellan olika mognadsgrader hos grödan också var mycket liten. Nilsson m fl (2005) visade dock att det finns signifikanta skillnader i jämviktsvattenhalt mellan rötad och orötad lin/hampa, och eftersom grå halm kan betraktas som ett förstadium till rötat material, är det troligt att ju mer grå halmen blir, desto större blir skillnaderna (rötat material är mer temperaturberoende och har lägre jämviktsvattenhalter vid höga RF). Vid gråfärgningen/rötningen förändras materialets färg genom kolonisation av svampar och bakterier, samtidigt som vattenlösliga ämnen lakas ur medan det relativa innehållet av bl a cellulosa ökar. Dessa förändringar i struktur och kemiskt innehåll leder sammantaget till förändrade hygroskopiska egenskaper.

Även om det inte tycks finnas någon större skillnad i jämviktsvattenhalt mellan gul och grå halm, finns det dock indikationer på att det finns skillnader när det gäller de mögelskador som kan uppkomma vid pressning av gul- respektive grå halm. I Danmark rekommenderas att gul halm pressas vid vattenhalter under 16-17%, och grå halm vid vattenhalter under 15,5% för undvikande av mikroorganismernas ”värmebildning” (Hinge, 2009). Denna skillnad kan eventuellt bero på att grå halm har hunnit få en större kontamination och annorlunda sammansättning av mikroorganismer under tiden den legat på fältet.

Vid jämförelsen av de slutliga jämviktsvattenhalterna mellan skakar- och rotortröskad halm, kunde några statistiskt signifikanta skillnader inte påvisas i denna studie, och inte heller mellan otröskad och (rotor-) tröskad halm. Dessa resultat stöds också av de likartade kurvorna i figur 6 (och i figur 4).

I undersökningarna av absorptions hastigheten utmärkte sig havrehalm genom att ha högst hastighet. Grå halm hade också en hög hastighet initialt jämfört med gul halm, även om skillnaden i slutvattenhalt jämnades ut efterhand. Även om några generella slutsatser inte kan dras från detta enstaka försök, är det ändå troligt att grå halm har en högre absorptions hastighet, bl a enligt diskussionen om linhalm/hampa ovan.

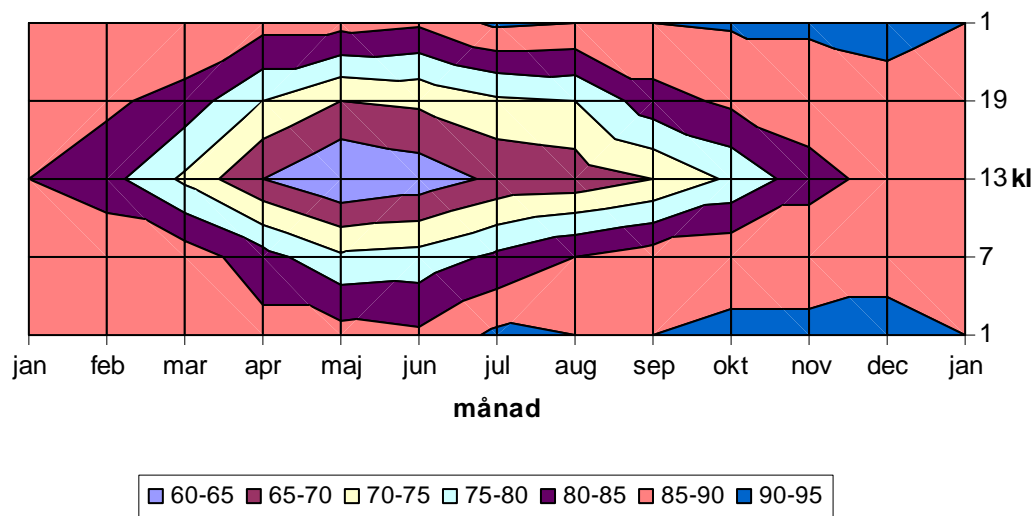
När det gäller absorptionshastigheten för halm från de olika trösktyperna som analyserats i denna studie, kunde det inte påvisas några entydiga skillnader (figur 11). Antingen är det ingen större skillnad i de olika tröskningsmetodernas bearbetningsgrad av halmstrået, eller så spelar bearbetningsgraden ingen större roll för absorptionshastigheten. När det gäller bearbetning av vallgrödor med hjälp av t ex slåtterkross, är syftet att knäcka och repa strået, och därmed motverka klyvöppningarnas stängning för att underlätta fuktdiffusionen. Halm är dock ett döende/dött material när det tröskas, och ytterligare bearbetning av strået kanske inte har någon större betydelse för diffusionshastigheten. Utifrån detta enstaka försök går det dock inte att dra några säkra slutsatser, utan fler undersökningar behövs i så fall.

Hysteres-försöken visade att det finns en viss hysteres vid absorption – desorption av bränsehalm. Detta bör man ha i åtanke vid modellering av halmens fuktighetsförändringar, men för praktiska tillämpningar är skillnaderna i vattenhalt så små att man rimligen kan bortse från dem.

I hysteres-försöken var inte havrehalm medtagen, men en desorptionsundersökning av Swain (1985) tyder på att havrehalm kan skilja sig något från andra halmslag även i detta avseende. Författaren studerade jämviktstvattenhalterna vid desorption av halm från höstvetete, havre och korn. Försöken genomfördes vid temperaturerna +10°C och +20°C vid luftfuktigheterna 35%, 55%, 76% och 92%. Resultaten visade bl a att halmen från höstvetete och korn nådde en vattenhalt på 18% (våt bas) vid en relativ fuktighet på 80% när temperaturen var +10°C, och vid $RF = 83\%$ när $T = +20^\circ\text{C}$. Havrehalm nådde samma jämviktstvattenhalt vid $RF = 77\%$ när $T = 10^\circ\text{C}$, och $RF = 79\%$ när $T = 20^\circ\text{C}$.

En generell slutsats från denna studie är att den vattenhalt som ofta sätts som övre gräns för bränsehalm, 18% (våt bas), nås vid relativa luftfuktigheter runt 90% (se figurerna 4-7). Det kan därför vara av intresse att se hur ofta den relativa luftfuktigheten överstiger detta värde. I figur 13 visas ett exempel på hur den relativa luftfuktigheten varierar under året och under dygnet för Malmö flygplats. Månadsmedelvärdet överstiger 90% några timmar nattetid under framförallt oktober, november och december.

Ur mikrobiologisk synpunkt, motsvarar en vattenhalt på 18% (våt bas) hos halmen en vattenaktivitet på runt 0,90. Många mögelsvampar kan dock tolerera vattenaktiviteter ner till 0,80 (Wikipedia, 2009). Det finns alltså en viss risk för mögelbildning vid vattenhalter ända ned till 15-16% (våt bas) (se figur 5). Willcook och Magan (2001) visade dock att tillväxten av vanliga mögelsvampar på halm (*Alternaria*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus* och *Eurotium*) tar fart när vattenaktiviteten överstiger 0,90, särskilt vid temperaturer runt 25°C och däröver. Dessa resultat bekräftar de rekommendationer man har om att undvika pressning av halm med vattenhalter över 18% (våt bas).



Figur 13. Den relativa luftfuktighetens variation under året och under dygnet för Malmö flygplats (månadsmedelvärden för kl 07, 13 och 19 för åren 1931-1960; värdet för kl 01 har skattats med hjälp av dygnsmedelvärdet och värdena för kl 07, 13 och 19). Källa: Bearbetning av data från Svennberg (red.), 1974.

För balad halm bör ungefär samma vattenhaltsgränser gälla som för obalad halm. Det ökade intresset för att bygga hus av balad halm har lett till att ett flertal undersökningar har gjorts angående halmbalars fuktegenskaper (se t ex Goodhew m fl, 2004; Lawrence m fl, 2009, CMHC, 2009). Normalt ligger de maximala vattenhaltsgränserna vid 14-20% (våt bas). Med utgångspunkt från bl a figureerna 5 och 13, kan man konstatera att så länge ingen extra fukt tillförs som leder till att vattenhalten överstiger jämviktsvattenhalten under lagringen, exempelvis genom nederbörd, kondens och kapillär upptransport av fritt vatten, så är risken för fuktskador i lagret liten. Större mängder nederbörd på balarna före inlagringen kan dock kraftigt påverka halmens användbarhet som bränsle; enligt Hinge (2009) kan vattnet exempelvis tränga in 15-20 cm i fyrkantbalar med kornhalm och 5 cm i fyrkantbalar med vetehalm. Observera också att fukttransport från marken kan göra stor skada vid lagringen, och därför bör balarna stå på betonggolvet eller på andra kapillärbrytande och fuktsäkra material för att säkerställa deras bränslekvalitet.

3. MODELLERING AV TORKNING OCH UPPFUKTNING I FÄLT

3.1. Metod

3.1.1. Allmänt om fukttransport m m

Vid verkliga fältmässiga förhållanden sker hela tiden dynamiska förändringar i mikroklimatet som gör att det uppstår potentialskillnader i tryck, temperatur, fukthalt, etc. Dessa potentialskillnader utgör en drivkraft för transport av fukt, både inom och utanför ett visst material, i detta fall halm. Eftersom man strävar efter att halmen ska ha en så låg bärgningsvattenhalt att den blir lagringsduglig och får en hög bränslekvälitet, är det önskvärt att känna till de fältmässiga mekanismer som påverkar vattenhaltsförändringarna.

Fukt kan transporteras som ånga eller som vätska. Drivkraften för en transport eller ett flöde av fukt bestäms av den potentialändring i ångtryck, ånghalt, temperatur m m som finns i flödesriktningen. I ångfas sker transporten genom diffusion, konvektion eller effusion/termo-diffusion, medan transporter i vätskefas sker genom påverkan av tyngdkraften, vattenöverttryck, vindtryck och kapillära krafter (Nevander & Elmarsson, 1994). Både diffusion av vattenmolekyler, d v s att molekylerna rör sig i en viss riktning för att utjämna koncentrationsskillnader, och konvektion, d v s då en yttre kraft (t ex vind) påverkar rörelserna, är inblandade i torkningen av en halmsträng. Transporter av fritt vatten i vätskefas sker i detta fall ofta genom påverkan av tyngdkraften (nederbörd som rör sig genom strängen) eller kapillära krafter (nederbörd som ”sugs” upp av materialet).

När en gröda klipps eller slås av, upphör transpirationen efter ett tag eftersom förbindelsen mellan stjälk/strå och rot blir bruten. Växtens klyvöppningar (stomata) stänger ganska snabbt efter att förbindelsen brutits, och torkningsprocessens hastighet beror sedan bl a på resistansen hos epidermis (växtens skyddande ytterlager) och mikroklimatet runt stjälken/strået. Den drivande kraften för torkningen är skillnaden i partialtryck mellan växten och den omgivande luften (Atzema, 1992). När växtens ångtryck är i jämvikt med luftens ångtryck, har den nått sin jämviktstvattenhalt (Brooker m fl, 1992). Vattenhalten kan därefter öka genom att fritt vatten tillkommer genom nederbörd eller daggbildning, och sedan minska genom att det fria vattnet avgår genom avdunstning.

Olika typer av modeller har utvecklats för att simulera fälttorkning av stråformiga material, främst för hö. Dessa modeller bygger antingen på halv-empiriska diffusionsekvationer, eller på energibalanssekvationer där hänsyn tas till energi- och massflöden i materialet (Jenkins m fl, 1984). De flesta diffusionsmodeller utgår från Lewis (1921) halv-empiriska formel för torkning i tunna skikt, och tar bl a hänsyn till materialets jämviktstvattenhalt (Stewart & Livers, 1978; Savoie m fl, 1982; Pitt, 1984; Jenkins m fl, 1985; Jayas m fl, 1991). Energibalansmodeller inkluderar ofta Penman-Monteiths formel (Monteith, 1965) för beräkning av evapotranspirationen. Denna modelltyp är oftast betydligt mer komplex och kräver också mer indata, vilka kan vara svåra att få tag på (Brück & van Elderen, 1969; Thompson, 1981; Smith m fl, 1988; Atzema, 1992).

3.1.2. Modellansats

Nilsson och Karlsson (2005) utvecklade en modell som beskriver vattenhalten i linhalm som funktion av bl a olika väderparametrar. Modellen bygger på en kombination av bl a Atzemas (1992) idé om att dela upp mängden vatten i materialet i bundet och fritt vatten och att an-

vända Penman- Monteiths formel för att beräkna avdunstning och kondensation, med idén om att använda diffusionsekvationer för att ta hänsyn till materialets jämviktsvattenhalt vid torkningen.

Utgångspunkten i modellen är att den totala vikten per m² av en halmsträng (q_{tot}) kan skrivas (Nilsson & Karlsson, 2005)

$$q_{tot} = q_{ts} + q_v, \text{ där} \quad (16)$$

$$q_v = q_b + q_f \quad (17)$$

där q_{ts} är torrsubstansvikten (kg/m²), q_v är totala mängden vatten i halmen (kg/m²), q_b är mängden bundet vatten (kg/m²) och q_f mängden fritt vatten (kg/m²). Mängden torrsubstans q_{ts} kan anses vara konstant, även om det kan bli vissa förluster i praktiken p g a att en del material hamnar på marken, p g a biologisk nedbrytning, m m. Om q_v och q_{ts} är kända, kan alltså halmens vattenhalt, uttryckt antingen i torr bas $M_{torr} = q_v/q_{ts}$ eller i våt bas $M_{våt} = q_v/(q_v + q_{ts})$, beräknas.

3.1.3. Förändringar av mängden bundet vatten

Förändringarna i mängden bundet vatten antas ske i två faser. I den första fasen strax efter tröskningen minskar mängden bundet vatten i halmen tills den närmar sig jämviktsvattenhalten. I den andra fasen följer mängden (hygroskopiskt) bundet vatten, med en viss eftersläpning, efter variationerna i den beräknade jämviktsvattenhalten.

För den första fasen kan en mängd olika semi-empiriska ekvationer användas för att beskriva vattenhaltsförändringarna (Jenkins m fl, 1984; Jayas m fl, 1991; Jain & Pathare, 2004). Oftast bygger dessa ekvationer på teorin för torkning av tunna skikt i analogi med t ex Newton's lag för kylning. I denna studie används Lewis (1921) diffusionsekvation för torkning i tunna skikt:

$$dM/dt = -k(M - M_{eq}) \quad (18)$$

där M är vattenhalten (d v s fuktkvoten) i torr bas (%), t är tiden i timmar (tim), k är torkningskonstanten, och M_{eq} är jämviktsvattenhalten (%), torr bas). Ekvationen säger att torkningshastigheten beror av torkningskonstanten k och skillnaden mellan den aktuella vattenhalten och jämviktsvattenhalten. Om ovanstående ekvation integreras över ett visst tidsintervall, fås

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = e^{-kt} \quad (19)$$

där M_0 är den initiala vattenhalten i % (t.b.) och M_t den aktuella vattenhalten vid tiden t uttryckt i % (t.b.). Om det enbart är bundet vatten i materialet, och i så fall att

$$(M_t =) M_b = q_b / q_{ts} \quad (20)$$

$$M_{eq} = q_{eq} / q_{ts} \quad (21)$$

och att torkningskonstanten k kan antas vara proportionell mot den potentiella evapotranspirationen E ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ tim}$) enligt

$$k = aE \quad (22)$$

erhålls

$$q_{b,2} = q_{eq} + (q_{b,1} - q_{eq})e^{-aE(t_2-t_1)} \quad (23)$$

där q_{eq} är mängden vatten vid jämvikt (kg/m^2), a en empirisk konstant, och $q_{b,2} - q_{b,1}$ är förändringen av bundet vatten under tidsintervallet t_2-t_1 , vilket här sattes till 1 timme. Under denna första torkningsfas modelleras alltså mängden bundet vatten stegvis med en timmes intervall utifrån den beräknade jämviktsvattenhalten, den potentiella avdunstningen och en empirisk konstant. Övergången från fas ett till fas två antas ske när mängden bundet vatten har kommit tillräckligt nära mängden vatten vid jämvikt, vilket här antogs ske det dygn (kl 13) när $q_b \leq 1,2q_{eq}$.

I modellen sattes värdet på a till 0 när dagg började bildas, och detta värde kvarstod tills all dagg var avdunstad. Vid regn ökar mängden nederbördsvatten q_n i materialet, och därför sattes $a = 0$ så länge som $q_n/q_{ts} > 0,15$. Anledningen till att värdet på a inte kvarstod tills $q_n = 0$ var att det är rimligt att anta att torkningen av q_b och q_n kan ske parallellt när q_n är litet. Gränsen på 0,15 användes av Nilsson & Karlsson (2005) för torkning av lindhalm, och bör rimligen även kunna användas för spannmålshalm.

Under den andra fasen följer mängden bundet vatten mängden vatten vid jämvikt med en viss eftersläpning, d v s värdet av q_b beräknades som medelvärdet av q_{eq} vid tidpunkterna t , $t-1$, och $t-2$, med ett tidssteg om en timme. Ett maxvärde för q_b på $0,25q_{ts}$ sattes dock, bl a beroende på trögheten att följa q_{eq} vid höga värden (Nilsson & Karlsson, 2005).

Mängden vatten vid jämvikt beräknades med hjälp av Halsey's (temperaturoberoende) ekvation (13) enligt resultaten i kapitel 2 ovan ($M_{eq} = q_{eq}/q_{ts}$):

$$\frac{q_{eq}}{q_{ts}} = \left(\frac{-A}{\ln RF} \right)^{1/B} \quad (24)$$

där A och B är empiriska konstanter, och RF den relativa luftfuktigheten (uttryckt som ett tal mellan 0 och 1). Eftersom höstvetete normalt är den viktigaste halmgrödan, användes följande värden på A och B : 582,3 respektive 2,69, i enlighet med resultaten i tabell 4. Eventuella avvikelser som kan uppkomma p g a andra halmgrödor eller p g a hysteres bortsågs från i denna studie. I modellen beräknades q_{eq} med hjälp av väderdata (RF) observerade var tredje timme, som sedan omvandlades till timvärden med hjälp av linjär interpolation. Vid höga värden på RF blir jämviktsvattenhalten alltmer osäker (Nevander & Elmarsson, 1994), och ett maximalt värde på q_{eq}/q_{ts} sattes därför till 0,30 (se figurerna 4, 6 och 7).

3.1.4. Avdunstning och kondensation

Vatten avdunstar och kondenserar, uttryckt i kg per m^2 och timme, enligt (Monteith, 1965):

$$E = 3600 \frac{(R_n - G)\Delta + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{L_v (\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a))} \quad (25)$$

där R_n är nettostrålningen (W/m^2), G är markvärmeflödet (W/m^2), Δ är lutningen på kurvan mätnadsångtryck *versus* temperatur (Pa/K), ρ är luftens densitet (kg/m^3), c_p är det specifika värmnet vid konstant lufttryck (J/kgK), e_s är mätnadsångtrycket (Pa), e_a är det aktuella ångtrycket (Pa), r_a är den areodynamiska resistansen (s/m), L_v är förångningsvärmnet (J/kg), γ psykrometerkonstanten (Pa/K), r_c är grödresistansen (s/m), och där tidsomvandlingskonstanten 3600 är antalet sekunder per timme. I bilaga 1 redovisas hur de olika storheterna i ekvation 25 beräknas.

Om $E > 0$ antas vatten avdunsta från halmen, och om $E < 0$ kondenserar det till dagg. I denna studie representerar E den potentiella evapotranspirationen med $r_c = 0$, vilket innebär avdunstning från en ständigt våt yta. De använda väderparametrarna för att beräkna E observerades var tredje timme, och linjär interpolation görs därför av E för att få timvärden.

3.1.5. Förändringar av mängden fritt vatten

Mängden fritt vatten q_f antas vara beroende av mängden dagg q_d och av mängden nederbörd q_n som fångas upp av halmen (s k interception). Vid en viss tidpunkt t gäller alltså att

$$q_f(t) = q_d(t) + q_n(t) \quad (26)$$

där $q_d(t) \geq 0$ och $q_n(t) \geq 0$. Ändringen av q_d antas vara beroende av E enligt

$$\Delta q_d = -Et \quad (27)$$

då det blir daggutfällning (kondensation) om $E < 0$ och daggavdunstning om $E > 0$.

När nederbörd har observerats vid en viss tidpunkt, antas det i modellen att den absorberade mängden vatten Δq_n (kg/m^2) ökar till ett slutvärde på

$$\Delta q_n = I_c(t)(1 - e^{-bP/I_c(t)}) \quad (28)$$

där $I_c(t)$ är den maximala interceptionskapaciteten (kg/m^2), P den uppmätta nederbördsmängden i mm (eller kg/m^2), och b en empiriskt bestämd konstant. Denna exponentiella funktion bygger på den ekvation som framtagits av Couturier och Ripley (1973) för interception i präriegräs. Den maximala interceptionskapaciteten $I_c(t)$ beräknas enligt

$$I_c(t) = q_{ts}(M_{max} - M(t)) \quad (29)$$

där M_{max} är den maximala vattenhalten i halmen och $M(t)$ den aktuella vattenhalten. M_{max} bestäms empiriskt och antas vara något mindre än M_{kap} (se figur 1).

Ett antal olika samband kan användas för att beskriva upptorkningen av nederbörden. För torkning av linhalm fungerade nedanstående ekvation bra (Nilsson & Karlsson, 2005), och den har även använts här;

$$\Delta q_n = Et(1 - e^{-cq_n}) \quad (30)$$

där konstanten c bestäms empiriskt, och där $E \geq 0$ och tidssteget $t = 1$ timme. Anledningen till att använda en ekvation av denna typ är att torkningsresistansen ökar när mängden fritt vatten minskar, särskilt i senare skeden när större delen av det fria vattnet har avdunstat. Därför antas torkningshastigheten vara beroende av den aktuella vattenmängden enligt formel 30.

3.2. Parameterestimering

3.2.1. Bestämning av M_0 och M_{max}

Den initiala vattenhalten, d v s vattenhalten strax efter tröskning, kan variera ganska kraftigt beroende på väderlek, gröda, etc. Nilsson (1999b) refererar till en undersökning där den initiala vattenhalten mättes för 19 fält med höstvet (4 fält i Uppland och 15 i Skåne). När fälten delades upp i två kategorier, en där grödan hade fått vara regnfri i två dygn eller mindre, och en där grödan hade varit regnfri under tre dygn eller mer, kunde initialvattenhalten beskrivas med hjälp av en triangulär sannolikhetsfördelning

$$M_0 \in TRIA(min, mode, max) \quad (31)$$

där min , $mode$ och max -värdena för respektive kategori var 19, 30, 56 respektive 14, 28, 51 (uttryckt i våt bas). För exempelvis den andra kategorin, var alltså den lägsta vattenhalten i den refererade undersökningen 19%, den vanligaste 30% och den högsta 51%. Vid kännedom om de verkliga initialvattenhalterna används dock naturligtvis dessa, t ex vid estimeringen av a , b och c nedan.

Den maximala vattenhalt (M_{max}) som halmen kan hålla i fält under praktiska förhållanden uppskattades till 350% (t.b.) eller ca 77,5% uttryckt i våt bas. Detta var det högsta värde som uppmättes i fältförsöken i denna studie, och även i en undersökning av Nilsson (1999b). Teoretiskt är mätnadsvattenhalten för gräsartade växter något högre, exempelvis 87% (v.b.) för vallgräs enligt Brück och van Elderen (1969), men dessa nivåer nås sällan i praktiken.

3.2.2. Bestämning av a , b och c

För att bestämma parametrarna a , b och c , användes regressionsanalys av data från tre olika fältförsök, då vattenhalterna mättes i halmsträngar i fält.

Fältförsök 1.

Vattenhalten följdes i en sträng med höstvetehalm (sort Olivin) utanför Uppsala under hösten 2007 från den 9 augusti kl 16.00 till den 15 augusti kl 14.00. Vid varje provtagningstillfälle togs tre prover från skilda delar av strängen, vilka torkades i en varmluftsugn i ca 103°C under 24 timmar. Därefter beräknades vattenhalten utifrån medelvärdet av de tre proverna.

Tröskans skärvidd på det aktuella fältet var 9,12 m, med en uppskattad effektiv tröskningsbredd på 8,7 m (figur 14). Stubbhöjden varierade mellan 23-30 cm, med ett uppskattat medelvärde på runt 27 cm. Stränghöjden H var 0,45 m i genomsnitt och strängens täckningsgrad F_c 16% (se bilaga 1). Kärnskoroden var 6 600 kg/ha och halmskoroden ca 3 500 kg/ha. I den sträng där proverna togs var den genomsnittliga halmvikten 3,4 kg/m (vattenhalt 10%, torr bas) och strängbredden 1,4 m, vilket ger att q_{ts} var drygt 2 kg/m².



Figur 14. Halmsträngar på det fält utanför Uppsala där proverna togs under hösten 2007.

Under försöken mättes nederbörden i nära anslutning till strängen, medan uppgifter om temperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet, globalstrålning och molnighet har erhållits från SMHI för deras väderstation i Uppsala. Vid provtagningarna gjordes observationer av bl a aktuell molnighet, vind och dagbildning, och dessa visade sig stämma ganska väl överens med SMHI:s värden respektive de simulerade värdena.

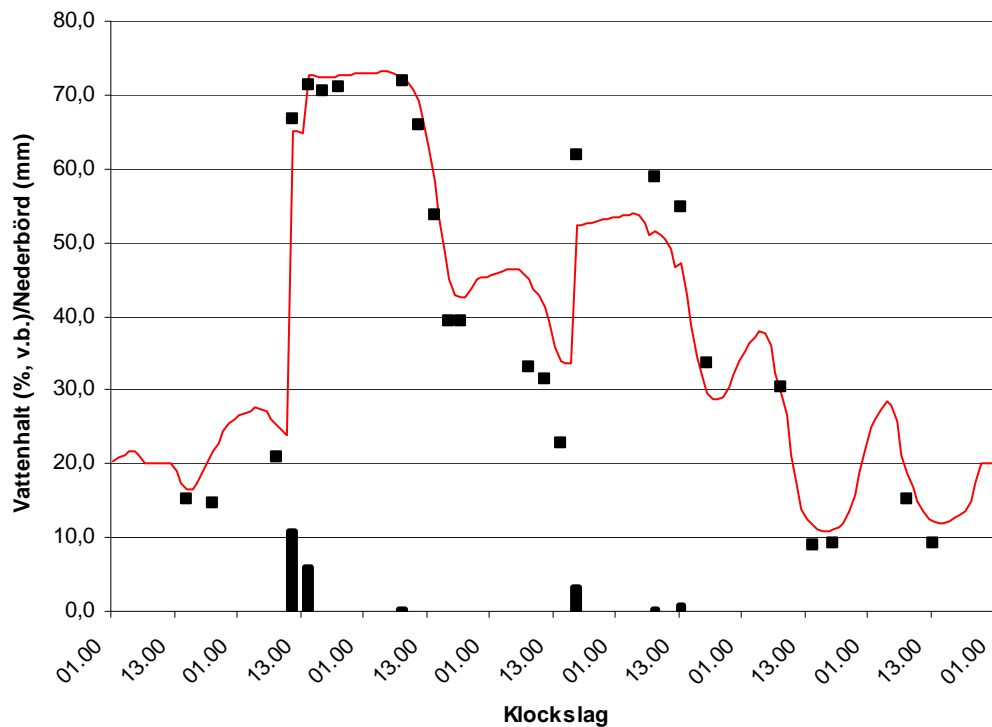
I figur 15 visas uppmätta vattenhalter och nederbördsmängder, samt simulerad vattenhalt efter estimering av modellparametrarna b och c . Värdet på a gick inte att bestämma, eftersom vattenhalten redan vid första provtagningen var nära M_{eq} , och därför var förändringarna av q_b redan i fas två. Kurvan för den simulerade vattenhalten gäller för $b = 0,40$ och $c = 0,80$, vilka bestämdes genom maximering av determinationskoefficienten R^2 när b och c varierades enligt figur 16. (Tester gjordes för att försöka utesluta andra maximipunkter. På grund av modellens komplexitet gjordes ingen optimering med dator. Endast mätvärden från morgon, middag och kväll användes för att "balansera" indata).

Determinationskoefficienten är ett mått på kurvans anpassning till de uppmätta värdena och den beräknas enligt

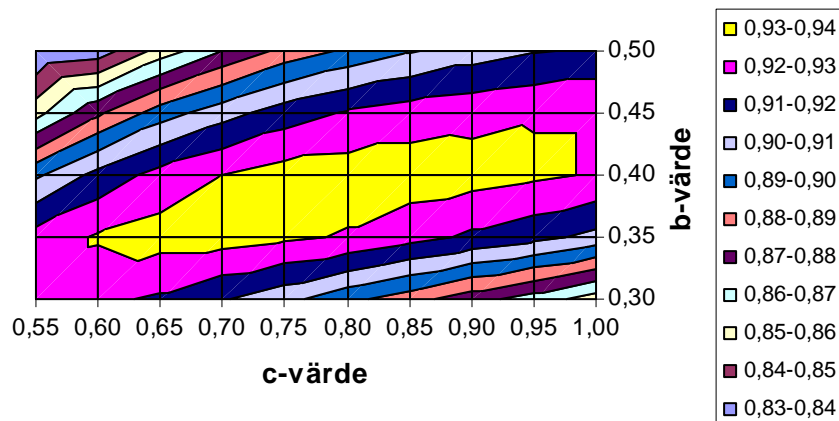
$$R^2 = \frac{\Sigma(\hat{y} - \bar{y})^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} \quad (32)$$

där \hat{y} , \bar{y} och y_i är skattade, medelvärde respektive uppmätta värden av y . Av figur 16 framgår att R^2 var relativt okänsligt för förändringar av värdet på c . Det högsta värdet på R^2 var 0,935, med $b = 0,40$ och $c = 0,80$.

I figur 15 syns att modellen beskriver uppfuktning- och torkningsförloppen ganska bra. I figuren ses dock att modellen överskattar mängden dagg natten mellan den första och andra provtagningsdagen, samt under natten mellan den tredje och fjärde dagen. I fält noterades ”lite dagg” vid provtagningarna under de följande morgnarna. Alternativt kan gränsvärdet för q_b då det följer q_{eq} vara något för högt satt ($0,25q_{ts}$). I figuren syns också att det uppmättes högre värden än vad som modellen predikerade under den fjärde och femte dagen (med tanke på det regn som kom under det fjärde dygnet).



Figur 15. Uppmätta vattenhalter (punkter) och nederbörds mängder (staplar) från fältförsöken i Uppsala under hösten 2007, samt simulerad vattenhalt (heldragen linje) med de estimerade värdena på b och c .



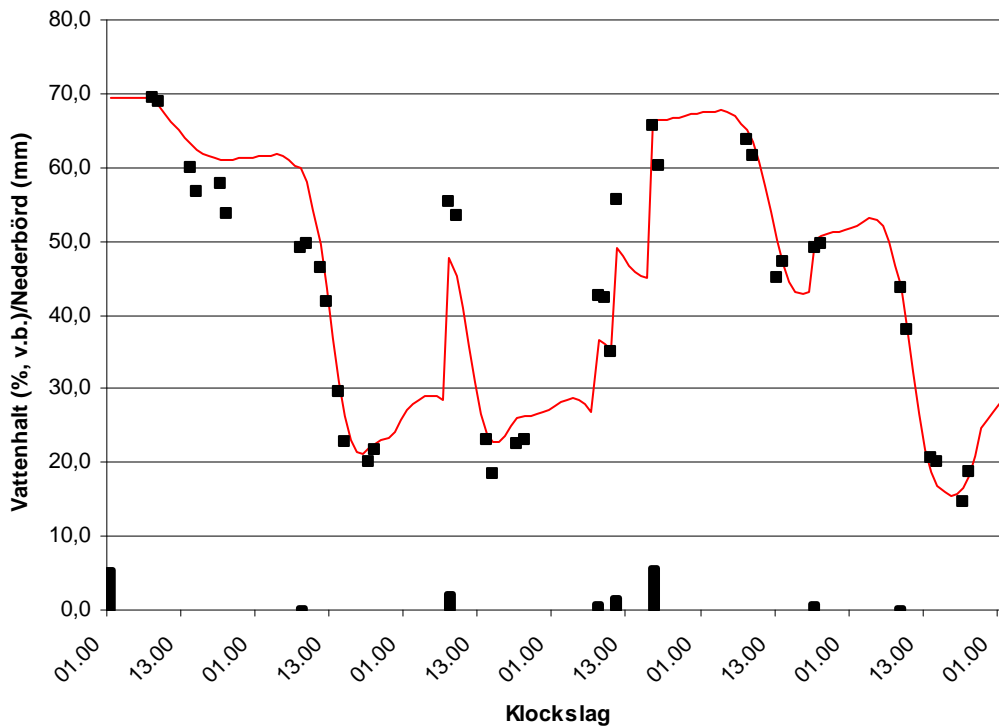
Figur 16. I mitten syns området med maximalt värde på $R^2 (>0,93)$.

Fältförsök 2.

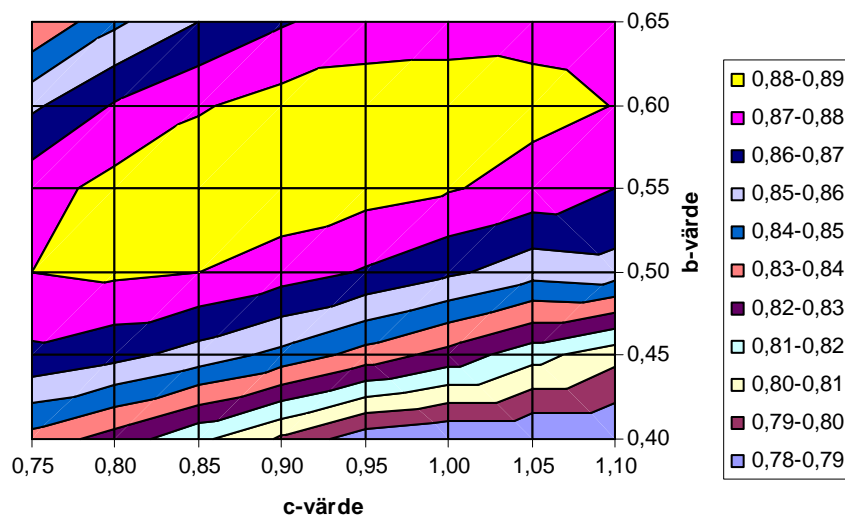
Även under hösten 2008 följdes vattenhalten på ett fält med höstvete (sort Olivin) utanför Uppsala. Prover togs från den 18 augusti klockan 9.00 till den 23 augusti klockan 20.00. Procedurerna för provtagning och analyser var samma som beskrivits ovan för 2007 (2008 togs dock prover från två strängar, och ett medelvärde beräknades). Även samma tröska användes, med samma strängbredd och marktäckningsandel, m m. Kärnskornden och halmskornden var 6 500 kg/ha respektive 3 000 kg/ha. För halmsträngarna beräknades värdet på q_{ts} till 2 kg/m².

Initialvärdet sattes här lika med den först uppmätta vattenhalten. Skiftet tröskades den 17/8, och ett regn föll sedan på halmen (5,5 mm) under natten innan första provtagningen gjordes på morgonen den 18/8. Även i detta försök kunde inte värdet på a bestämmas, eftersom q_b var okänt p g a det regniga vädret. Här antogs därför att förändringarna av q_b skedde enligt rutiner för fas två.

I figur 17 visas uppmätta värden för vattenhalten och nederbörden, samt resultatet från modelleringen med de parametervärden på b (0,55) och c (0,85) som gav högst värde på R^2 (0,89). Av figur 18 framgår dock att värden på t ex 0,50 respektive 0,80 också ger bra passning ($R^2 > 0,88$).



Figur 17. Uppmätta vattenhalter (punkter) och nederbördsmängder (staplar) från fältförsöken i Uppsala under hösten 2008, samt simulerad vattenhalt (heldragen linje) med de estimerade värdena på b och c .



Figur 18. I mitten syns området med maximalt värde på $R^2 (>0,88)$.

Med de framtagna parametrarna beskriver modellen förloppet ganska väl (figur 17). Mellan den första och den andra provtagningsdagen var dock de uppmätta vattenhalterna något lägre än vad som beräknades med hjälp av modellen.

Fältförsök 3.

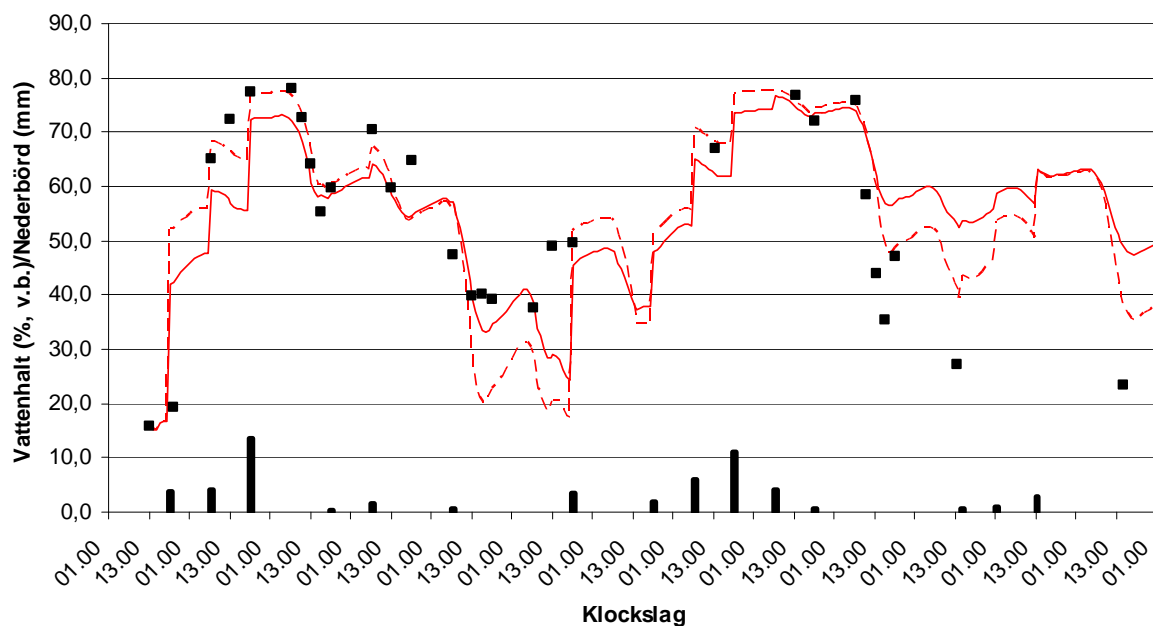
Under hösten 2008 följdes vattenhalten i en sträng med höstvetehalm (sort Tulsa) utanför Ronneby i Blekinge. Den första provtagningen skedde strax efter tröskning den 16 augusti klockan 13.00, och den sista den 28 augusti klockan 15.00. Enligt lantbrukaren var kärnskörden 8 500 kg/ha. Halm:kärna-kvoten uppmättes till 0,39 (kg ts/kg ts), stubbhöjden var 23 cm i genomsnitt, tröskans effektiva arbetsbredd 6,40 m och strängbredden 1,20 m. Värdena på H , F_c och q_{ts} beräknades till 0,40 m, 0,19 respektive 1,6 kg ts/m².

Procedurerna för provtagning, analyser m m var samma som beskrivits ovan för fältförsöken 1 och 2. Väderdata erhöles från SMHI för väderstationen i Kallinge, vilken ligger drygt 2 km från fältet. Även för detta försök blev vädret fuktigt och regnigt, vilken gjorde att värdet på a inte kunde bestämmas då q_n redan från början fick en dominerande roll.

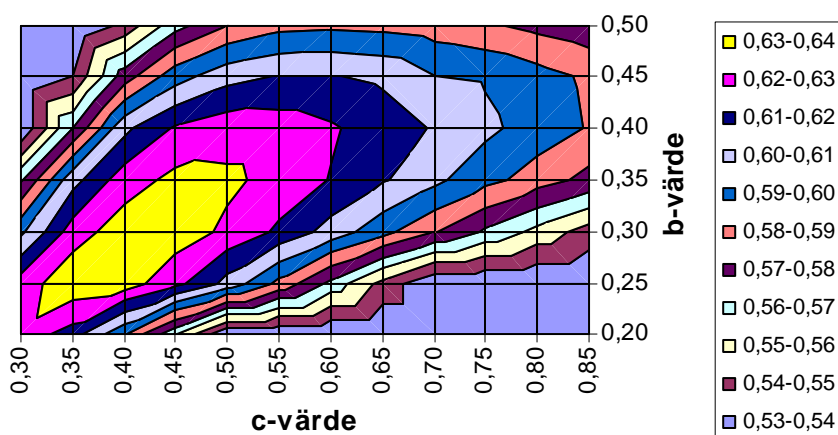
I figur 19 visas uppmätta värden för vattenhalten och nederbörden, samt resultatet från modelleringen med de parametervärden på b (0,25) och c (0,35) som gav högst värde på R^2 (0,64). Jämfört med de båda första försöken, var R^2 alltså betydligt lägre. I figuren finns också en streckad kurva inlagd som visar resultatet när b och c väljs utifrån de parametervärden som erhöles från fältförsöken 1 och 2 ($b = 0,45$, $c = 0,85$ och $R^2 = 0,59$).

Det var framförallt under två perioder som det fanns större avvikelser mellan uppmätta och simulerade vattenhalter (figur 19). Under de femte och sjätte provtagningsdagarna (20-21 augusti) var de uppmätta värdena högre än de simulerade, och från den elfte till den trettonde provtagningsdagen, d v s 26-28 augusti, var de uppmätta värdena lägre. Under den första perioden var det ganska klart och soligt väder, och den beräknade potentiella evapotranspirationen E var för dessa dygn 3,9 respektive 2,3 mm. Dock var den relativa luftfuktigheten ganska hög, och i kombination med att markfukten kan ha spelat en stor roll p g a regnen de senaste dygnen, sjönk vattenhalten inte så mycket som modellen beräknade.

Under de tre dygnen 26-28 augusti var det molnigt och mycket hög luftfuktighet. Molnigheten var i genomsnitt 6,6 oktas, och RF i genomsnitt så hög som 96%. Dessutom kom det regn på 0,5 mm plus 1,0 mm plus 3,0 mm. Däremot var det relativt blåsigt, särskilt under den 28 augusti, med observerade (medel-)värden på runt 7 m/s. Även om halmen ännu inte var pressningsbar vid den sista provtagningen, kändes den ganska torr, vilket bekräftas av vattenhaltsanalysen som visade 23,4% (våt bas). Troligen hade vinden en större inverkan på nedtorkningen än vad modellen förutsåg.



Figur 19. Uppmätta vattenhalter (punkter) och nederbörds mängder (staplar) från fältförsöken utanför Ronneby under hösten 2008, simulerad vattenhalt (heldragen linje) med de värden på b (0,25) och c (0,35) som gav högst R^2 (0,64), samt simulerad vattenhalt med $b=0,45$ och $c=0,85$ (streckad linje).



Figur 20. Inom det ljusa området hade R^2 högst värde ($>0,63$).

3.3. Diskussion

I denna studie användes en simuleringsmodell för att beskriva halmens vattenhalt när den ligger på fältet. Torkning och uppfuktning av halm i fält är dock mycket komplicerade processer som beror av ett stort antal faktorer. En mängd olika förenklingar och antaganden måste där-

för göras om modellen ska bli användbar och mängden indata kunna begränsas. Det finns dock många fördelar med att försöka ta fram robusta och tillförlitliga modeller för att simulera halmens vattenhalt. Dessa skulle inte bara kunna användas i strategiskt syfte för att utforma kostnadseffektiva maskinsystem för bärgningen, utan det är också tänkbart att använda dem i operativt syfte för att få reda på halmens vattenhalt i realtid och även för att bedöma dess bränslekvalitet genom att man kan få reda hur mycket vattenhalten har varierat i strängen (t ex är halmen ”gul” eller ”grå?”).

I denna studie beräknades värdena på b och c med hjälp av maximering av R^2 -värdet. Ett annat sätt att bestämma a , b och c är att logaritmera ekvationerna 23, 28 och 30 och sedan bryta ut respektive parameter (Nilsson & Karlsson, 2005). Dessa bestäms sedan genom att studera förändringarna i vattenhalt under korta tidsintervall. På så sätt kan man troligen få en större noggrannhet, och även ett bättre mått på spridningen runt det lämpliga parametervärdet. Det regniga vädret under samtliga fältförsök innebar dock att q_n fick en dominerande roll och detta försvårade ett sådant angreppssätt. För att få bättre värden på parametrarna, skulle därför fler fältförsök behövas under mer varierande väderleksförhållanden.

Värdet på a kunde inte bestämmas på det fuktiga vädret och de låga initialvattenhalterna under försöken. Den använda modellen utvecklades för simulering av vattenhalten i linhalm, vilken slås av vid tidig gulmognad då mängden (bundet) vatten ofta är betydligt högre än i spannmålshalm (Nilsson & Karlsson, 2005). I de allra flesta fall kommer modelleringen av det bundna vattnet i spannmåls- och oljeväxthalm direkt in i fas två, då det enbart följer jämviktstvattenhalten med en viss eftersläpning, och då har värdet på a ingen betydelse. För linhalm var värdet på a 0,2 enligt Nilsson och Karlsson (2005). För spannmålshalm bör värdet vara högre, bl a eftersom epidermis sannolikt är mer genomsläppligt då strået är döende/dött. Nilsson (1999b) kom fram till att torkningskonstanten k var $1,2E$ i en tidigare enklare modellvariant för höstvetehalm. Även om modellerna inte är helt jämförbara, är det dock rimligt att anta att värdet på a ligger kring 1, tills nya fältförsök kan verifiera eller förkasta detta antagande.

Bildningen av dagg är en viktig faktor vid halmbärgning, eftersom den sätter gränsen för när arbetet upphör på kvällen och när det påbörjas på morgonen. Daggbildning är dock en komplicerad process som kan vara svår att modellera (Monteith, 1957; Luo & Goudriaan, 2000; Madeira m fl, 2002). Ångan som daggens bildas av kommer dels från marken och dels från den omgivande luften. Vid den förstnämnda processen, som kallas guttation eller destillation, avdunstar vatten från markytan och överförs huvudsakligen genom laminär strömning till den något kallare vegetationen där ångan kondenserar. Guttation förutsätter alltså låga vindhastigheter ($<0,5$ m/s på 2 m höjd), och de avsatta daggmängderna blir oftast mindre än 0,1 mm (Mattsson, 1979). Vid vindhastigheter upp till 3 m/s tillförs de nedkylda bladen ånga från varmare luftskikt ovanför vegetationen genom turbulent strömning, och vid denna typ av daggbildning är de kondenserade mängderna 0,1-0,3 mm under en sommarnatt. Om vindhastigheten överstiger 3 m/s på 2 m höjd, kan det istället bli avdunstning då de nedåtriktade turbulenta luftströmmarna blir så kraftiga att den tillförda värmen gör att daggpunkten inte underskrids vid bladytorna. Andra faktorer som påverkar daggbildningen, förutom luftströmmarna, är materialets värmeledningsförmåga, exponeringen mot natthimlen, molnmängden, luftens vatteninnehåll ovanför de marknära skikten, m m (Mattsson, 1979).

I denna studie simulerades daggbildningen för de tre fältförsöken under totalt 23 nätter. Enligt modellen blev det daggutfällning under samtliga nätter, med ett genomsnitt på 0,21 mm (min 0,10 mm, max 0,35 mm). I genomsnitt började daggbildningen kl 21 (svensk sommartid),

med tidigaste tidpunkten kl 17 och senaste kl 01, och upphörde kl 06 i genomsnitt, med tidigaste tidpunkten kl 05 och senaste kl 07. De dagar det inte regnade, var daggen upptorkad, i genomsnitt, kl 09 (svensk sommartid). Jämfört med praktiska erfarenheter, stämmer dessa genomsnittsvärden ganska bra, men hur väl modellen stämde med verkligheten för enskilda nätter är en annan fråga som inte har undersökts i detta projekt. En stor osäkerhet i sammanhanget är t ex nettostrålningen och markvärmeflödet i modeller med så hög tidsupplösning som denna har. Normalt brukar ekvation 25 användas i modeller på dygns- eller månadsbasis, även om det numera också förekommer modeller på timbasis (Allen, 2009).

Ett sätt att förbättra modellen är att dela upp halmsträngen i minst två fiktiva skikt där gränserna mellan skikten bestäms av deras vattenhalt (Thompson, 1981; Atzema, 1992). På så sätt kan man ta större hänsyn till att det endast är det översta skiktet som direkt påverkas av instrålningen, och endast det undre som direkt påverkas av markfukten. Om man inkluderar markfukten i modellen, kan också större noggrannhet fås, särskilt vid våta förhållanden. Ett annat sätt att förbättra modellen är att ta fram grödresistanser (r_c i ekvation 25) vid olika vattenhalter för olika strängtjocklekar (Atzema, 1992) för att på så sätt bli ta större hänsyn till variationer i strängens tjocklek. Parameterestimeringarna i denna studie gjordes för strängtjocklekar i intervallet 1,6-2,0 kg ts/m², medan det i praktiken förekommer strängar med både mindre och mer halm beroende på gröda, avkastning och tröskans arbetsbredd. ”Verkliga” värden på r_c är också ett sätt att få mer ”verkliga” värden på E (observera att i modellen representerade E den potentiella evapotranspirationen från en våt yta). Ytterligare ett alternativ för att förbättra modellen kan vara att använda FAO:s standardiserade Penman-Monteith ekvationer för referens-evapotranspirationen för exempelvis gräsytor, se t ex Allen (2009).

I modellen togs ingen hänsyn till om halmsträngarna vänds för att påskynda torkningen eller om olika trösktyper används. Inverkan av vändningar är möjliga att inkludera i modellen (se t ex Atzema, 1992), men då behövs ett antal praktiska försök. I många fall undviker man dock att vända halmsträngarna eftersom de blir mer kompakta, vilket både kan förlänga torkningstiden och ibland försvåra själva pressningen. Vid storskalig bärgning av bränslehalm i Danmark rekommenderas exempelvis att man väntar med eventuell vändning/strängläggning tills vattenhalten har sjunkit till ca 20%, istället för räfsning direkt efter regn (Hinge, 2009). Vid vändning/strängläggning ökar dessutom risken för inblandning av föroreningar i halmen (sten, sand, träbitar, järnföremål, m m).

En annan faktor som påverkar torkningsförloppet är eventuella svampbehandlingar i grödan. Jørgensen och Olesen (2002) visade t ex att bekämpning med strobilurin, som t ex finns i ”Amistar”, kan ha en fördröjande effekt när det gäller halmens upptorkningsförlopp efter tröskningen. Tröskningsmetoden kan också påverka torkningsförloppet. Många har t ex observerat att strängar med skakartröskad halm torkar upp snabbare än rotortröskad halm. Klimatkammarförsöken i kapitel 2 tyder på att dessa skillnader inte har med själva stråets egenskaper att göra. Istället kan det vara så att skakartröskade halmsträngar blir mer ”fluffiga”, medan rotortröskade halmsträngar blir mer kompakta då halmstråna ofta är sönderdelade i kortare fraktioner (och eventuellt är mer likformigt orienterade). Det tycks dock vara stor skillnad i halmens bearbetningsgrad mellan olika rotortröskor, vilket gör att det är svårt att generellt beskriva halmens torknings- och uppfuktningsegenskaper specifikt för ”rotortröskor”.

4. SLUTSATSER

Följande slutsatser drogs i detta projekt:

- Jämviktsvattenhalterna för spannmåls- och oljeväxthalm undersöktes i klimatkammar, då temperaturerna (isotermerna) $+5^{\circ}\text{C}$, $+15^{\circ}\text{C}$ och $+25^{\circ}\text{C}$ hölls konstanta och den relativa luftfuktigheten stegvis ökade från 35% till 53%, 72% och till 90%. Resultaten visade bl a att vattenhalten för höstveten når 18% vid en relativ luftfuktighet på 85-90%. Fem ofta använda ekvationer för modellering av jämviktsvattenhalter (Henderson-, Chung-Pfost-, Halsey-, Oswin- och GAB-ekvationerna) anpassades till mätdata genom icke-linjär regression. Halseys ekvation (den temperaturoberoende varianten) visade sig vara den mest lämpade för flertalet av halmslagen.
- Vid en jämförelse av jämviktsvattenhalten mellan olika halmslag, kunde det inte påvisas några statistiskt signifikanta skillnader mellan dem, förutom för havrehalm. Detta halmslag hade en något högre jämviktsvattenhalt än de övriga halmslagen, särskilt vid höga relativa luftfuktigheter. Vid lägre relativa luftfuktigheter hade rapshalm en något högre jämviktsvattenhalt, men denna skillnad var dock inte tillräckligt stor för att ge utslag vid de statistiska analyserna. Några statistiskt signifikanta skillnader kunde inte heller ses mellan två undersökta sorter för både höst- och vårvete, mellan otröskad, gul och grå halm, och mellan rottröskad och skakartröskad halm.
- Absorptionshastigheten undersöktes för olika halmprover när RF ändrades från 53% till 72% vid $+15^{\circ}\text{C}$. Av resultaten framkom att havrehalm hade den största hastigheten initialt, medan vårvete hade den lägsta. Samtliga prover nådde jämviktsvattenhalten efter ca 10 timmar.
- Klimatkammarförsöken visade också att det finns en viss hysteres vid absorption-desorption av halm. I dessa försök hölls temperaturen vid $+15^{\circ}\text{C}$, medan RF varierade enligt $53\% \rightarrow 72\% \rightarrow 90\% \rightarrow 72\% \rightarrow 53\%$. Uppskattningsvis rör det sig om 1-2 procentenheter.
- En modell, som tidigare har tillämpats på linhalm, användes för att simulera halmens vattenhalt när den ligger i strängar på fälten. Modellen tar bl a hänsyn till både avdunstning och daggbildning. Den använder nederbörd, globalstrålning, temperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet och molnighet som inparametrar, och beräknar sedan halmens vattenhalt timme för timme.
- Modellparametrar togs fram genom regression av data från tre fältförsök under åren 2007-08, då vattenhalten följdes i strängar med höstveten. Vid jämförelser mellan uppmätta och simulerade värden, bedömdes att modellen beskrev halmens torknings- och uppfuktningförlopp med en acceptabel noggrannhet.

REFERENSER

- Abtew, W., Gregory, J. M., Borelli, J. 1989. Wind profile: Estimation of displacement height and aerodynamic roughness. *Transactions of the ASAE*, 32(2), 521-527.
- Ahokas, J., Ståhlberg, P., Maaskola, I. 1983. *Olki Polttoaineena (Straw as Fuel)*. Tutkimus-
selostus No 30, Valkola, Finland. Citerad av: Swain, G. 1985. *Desorption equilibrium
moisture content (EMC) of straw*. JTI-rapport 63. Jordbrukstekniska Institutet (JTI),
Uppsala.
- ASABE. 2008. *Moisture measurement - forages*. ASABE Standard ASAE S358.2 Dec1988
(R2008), ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers, St Jo-
seph, MI, USA.
- ASAE. 2000. *Moisture relationships of plant-based agricultural products*. ASAE D245.5
Oct95. ASAE Standards 2000. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph,
MI, USA.
- Atzema, A. J. 1992. A model for the drying of grass with realtime weather data. *Journal of
Agricultural Engineering Research*, 53, 231-247.
- Aviara, N. A., Ajibola, O. O., Oni, S. A. 2004. Sorption equilibrium and thermodynamic
characteristics of soya bean. *Biosystems Engineering*, 87(2), 179-190.
- Banaszek, M. M., Siebenmorgen, T. J. 1990a. Moisture adsorption rates of rough rice. *Trans-
actions of the ASAE*, 33(4), 1257-1262.
- Banaszek, M. M., Siebenmorgen, T. J. 1990b. Adsorption equilibrium moisture contents of
long-grain rough rice. *Transactions of the ASAE*, 33(1), 247-252
- Bernesson S., Nilsson D. 2005. *Halm som energikälla. Översikt av existerande kunskap*. Rap-
port – miljö, teknik och lantbruk 2005:07, Institutionen för biometri och teknik, SLU,
Uppsala.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W. 1992. *Drying and storage of grains and
oilseeds*. Avi, van Nostrand Reinhold, New York.
- Brück, I. G. M., van Elderen, E. 1969. Field drying of hay and wheat. *Journal of Agricultural
Engineering Research*, 14, 105-116.
- Burman, R., Pochop, L. O. 1994. *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. De-
velopments in Atmospheric Science 22. Elsevier. Amsterdam.
- Chen, C., Morey, R. V. 1989. Comparison of four EMC/ERH equations. *Transactions of the
ASAE*, 32(3), 983-990.
- Chen, C., Jayas, D. S. 1998. Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural
products. *Transactions of the ASAE*, 41(6), 1755-1760.
- Couturier, D. E., Ripley, E. A. 1973. Rainfall interception in mixed grass prairie. *Canadian
Journal of Plant Science*, 53, 659-663.
- Duggal, A. K., Muir, W. E. 1981. Adsorption equilibrium moisture content of wheat straw.
Journal of Agricultural Engineering Research, 26(4), 315-320.
- Eckersten, H., Jansson, P.-E., Karlsson, S., Lindroth, A., Persson, B., Perttu, K., Blombäck,
K., Karlberg, L., Persson, G. 1998. *Biogeofysik – en introduktion*. Avdelningsmedde-
lande 98:9. Institutionen för markvetenskap, SLU, Uppsala.
- Forsberg, M., Baky, A., Westlin, H., Ljungberg, D., Ytterberg, P. 2007. *Jordbruket som leve-
rantör av åkerbränsle till storskaliga värmeverk – fallstudie Värtan*. Rapporter lantbruk
och industri 361. Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI), Uppsala.
- Goodhew, S., Griffiths, R., Woolley, T. 2004. An investigation of the moisture content in the
walls of a straw-bale building. *Building and Environment*, 39, 1443-1451.
- Hadders, G. 1994. *Förändringar under skördeperioden av bränsleegenskaperna hos halm*.
JTI-rapport nr 186. Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI), Uppsala.

- Hinge, J. 2009. *Utarbetande av ett program för ökad förbränning av halm i Sverige, baserat på danska erfarenheter*. Värmeforsk projekt nr E06-641. Värmeforsk, Stockholm (rapporten finns också att ladda ned från www.varmeforsk.se).
- Holtslag, A. A. M., van Ulden, A. P. 1983. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(4), 517-529.
- Iglesias, H. A., Chirife, J. 1976. Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. *Journal of Food Technology*, 11, 109-116.
- Jain, D., Pathare, P. B. 2004. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*, 89(3), 289-296.
- Jayas, D. S., Mazza, G. 1991. Equilibrium moisture characteristics of safflower seeds. *Transactions of the ASAE*, 34(5), 2099-2103.
- Jayas, D. S., Cenkowski, S., Pabis, S., Muir, W. 1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9(3), 551-588.
- Jayas, D. S., Mazza, G. 1993. Comparison of five, three-parameter equations for the description of adsorption data of oats. *Transactions of the ASAE*, 36(1), 119-125.
- Jenkins, B. M., Ebeling, J. M., Rumsey, T. R. 1984. Modeling approaches to simulating the field drying of biomass. *ASAE paper no 84-3066*. St Joseph, USA.
- Jenkins, B. M., Ebeling, J. M., Rumsey, T. R., Malagoli, M. 1985. Empirical simulation of the field drying of biomass. *ASAE paper no 85-3077*. St Joseph, USA.
- Jørgensen, L. N., Olesen, J. E. 2002. Fungicide treatment affect yield and moisture content of grain and straw in winter wheat. *Crop Protection*, 21, 1023-1032.
- Lawrence, M., Heath, A., Walker, P. 2009. Determining moisture levels in straw bale construction. *Construction and Building Materials*, 23, 2763-2768.
- Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of solid materials. *Industrial Engineering Chemistry*, 13, 427-432. Citerad av: Jenkins, B. M., Ebeling, J. M., Rumsey, T. R. 1984. Modeling approaches to simulating the field drying of biomass. *ASAE paper 84-3066*. St. Joseph, USA.
- Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., Labuza, T. P. 1985. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations, Part I and Part II. *Lebensmittel –Wissenschaft und Technologie*, 18, 111-124.
- Luo, W., Goudriaan, J. 2000. Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 303-313.
- Madeira, A. C., Kim, K. S., Taylor, S. E., Gleason, M. L. 2002. A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 55-631.
- Mattsson, J. O. 1979. *Introduktion till mikro- och lokalklimatologin*. Liber Läromedel, Malmö.
- Mattsson, J. E. (red.). 2006. *Affärsutveckling – närodlade stråbränslen till kraftvärmeverk*. Rapport 2006:8. Institutionen för landskaps- och trädgårdsteknik, Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp.
- Monteith, J. L. 1957. Dew. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 83, 322-341.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Proceedings Symposium of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Monteith, J. L., Unsworth, M. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Arnold. London.
- Nevander, L. E., Elmarsson, B. 1994. *Fukthandbok, praktik och teori*. Svensk Byggtjänst och författarna, Stockholm.
- Nikolaisen (red.), L. 1998. *Straw for energy production. Technology, environment, economy*. The Centre for Biomass Technology, Denmark.

- Nilsson D. 1999a. *Analysis and simulation of systems for delivery of fuel straw to district heating plants*. Dissertation. Agraria 205. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Nilsson, D. 1999b. SHAM – a simulation model for designing straw fuel delivery systems, Part 1: model description. *Biomass and Bioenergy*, 16, 25-38.
- Nilsson, D., Svennerstedt, B., Wretfors, C. 2005. Adsorption equilibrium moisture contents of flax straw, hemp stalks and reed canary grass. *Biosystems Engineering*, 91(1), 35-43.
- Nilsson, D., Karlsson, S. 2005. A model for the field drying and wetting processes of cut flax straw. *Biosystems Engineering*, 92(1), 25-35.
- Perry, R. H., Green, D. W. 1997. *Perry's chemical engineer's Handbook*. 7th ed. McGraw Hill. Citerad av: Lawrence, M., Heath, A., Walker, P. 2009. Determining moisture levels in straw bale construction. *Construction and Building Materials*, 23, 2763-2768.
- Pfost, H. B., Maurer, S. G., Chung, D. S., Milliken, G. A. 1976. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. *ASAE Paper No. 76-3520*. St. Joseph, Michigan.
- Pitt, R. E. 1984. Forage drying in relation to pan evaporation. *Transactions of the ASAE*, 27, 1933-1937.
- Rahman, S. 1995. *Food Properties Handbook*. CRC Press, New York.
- Rodskjer, N. *Penmans formel för beräkning av den potentiella evapotranspirationen*. Institutionen för växtproduktionsekologi, SLU, Uppsala (ej publicerad PM).
- Savoie, P., Brook, R. C., Rotz, G. A. 1982. Empirical model for field drying of alfalfa. *ASAE paper no 82-1528*. St Joseph, USA.
- Smith, E. A., Duncan, E. J., McGechan, M. B., Haughey, D. P. 1988. A model for the field drying of grass in windrows. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 41, 251-274.
- Speiss, W., Wolf, W. 1987. *Critical evaluation of methods to determine moisture sorption isotherms*. In: Rockland, L. B., Beuchat, L. R. (eds.). 1987. *Water activity: Theory and applications to food*. Marcel Dekker, New York.
- Stewart, D. W., Liewers, K. W. 1978. A simulation model for the drying and rewetting processes of wheat. *Canadian Agricultural Engineering*, 20, 53-59.
- Svennberg (red.), S. 1974. *VVS handboken*. Förlags AB VVS. Stockholm.
- Swain, G. 1985. *Desorption equilibrium moisture content (EMC) of straw*. JTI-rapport 63. Jordbrukstekniska Institutet (JTI), Uppsala.
- Thompson, T. L., Peart, R. M., Foster, G. H. 1968. Mathematical simulation of corn drying. A new model. *Transactions of the ASAE*, 11(4), 582-586.
- Thompson, N. 1981. Modeling the field drying of hay. *Journal of Agricultural Science*, 97, 241-260.
- Van den Berg, C., Bruin, S. 1981. *Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects*. In: Rockland, L. B., Stewart, G. (eds.). 1981. *Water Activity: Influences on Food Quality*. pp 1-61. Academic Press Inc., New York.
- Van den Berg, C. 1984. *Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption*. In: McKenna, B. M. (ed.). 1984. *Engineering and Foods*. pp 119-131. Elsevier Science Publishers, New York.
- Viswanathan, R., Jayas, D. S., Hulasare, R. B. 2003. Sorption isotherms of tomato slices and onion shreds. *Biosystems Engineering*, 86(4), 465-472.
- Willcook, J., Magan, N. 2001. Impact of environmental factors on fungal respiration and dry matter losses in wheat straw. *Journal of Stored Products Research*, 37, 35-45.
- Yang, W. H., Cenkowski, S. 1993. Effect of successive adsorption-desorption cycles and drying temperature on hygroscopic equilibrium of canola. *Canadian Agricultural Engineering*, 35(2), 119-126.

Internetreferenser

- Allen, R. G. 2009. <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/> (2009-12-08). *REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations*. University of Idaho, USA.
- CMHC. 2009. <http://www.cmhc-schl.gc.ca/en/corp/li/horetore/rerelisu/upload/Straw-bale-housing.pdf> (2009-12-10). *CMHC Research Report Listings by Subject*. Canada Mortgage and Housing Corporation.
- Jonsson, N. 2009. http://chaos.bibul.slu.se/sll/sjv/utan_serietitel_sjv/UST98-05/UST98-05D.HTM (2009-11-09). *Vattenaktivitet*. VäxtEko.
- SMHI. 2009. <http://www.smhi.se/cmp/jsp/polopoly.jsp?d=9293&a=26881&l=sv> (2009-07-31). *Relativ luftfuktighet, vad är det?* Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI).
- Wikipedia. 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/Water_activity (2009-11-09). *Water activity*. Wikipedia, the free encyclopedia.

BILAGA 1. BERÄKNING AV POT. EVAPOTRANSPIRATIONEN

Vatten avdunstar och kondenserar, uttryckt i kg per m² och timme, enligt (Monteith, 1965):

$$E = 3600 \frac{(R_n - G)\Delta + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{L_v (\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a))} \quad (1-1)$$

där E är den potentiella evapotranspirationen (kg/m²tim eller mm/m²tim), R_n är nettostrålningen (W/m²), G är markvärmeflödet (W/m²), Δ är lutningen på kurvan mätnadsångtryck *versus* temperatur (Pa/K), ρ är luftens densitet (kg/m³), c_p är det specifika värmnet vid konstant lufttryck (J/kgK), e_s är mätnadsångtrycket (Pa), e_a är det aktuella ångtrycket (Pa), r_a är den areodynamiska resistansen (s/m), L_v är förångningsvärmnet (J/kg), γ psykometerkonstanten (Pa/K), r_c är grödresistansen (s/m), och där tidsomvandlingskonstanten 3600 är antalet sekunder per timme. Om $E > 0$ avdunstar vattnet och om $E < 0$ kondenserar det. I denna studie representerar E den potentiella evapotranspirationen med $r_c = 0$. Jämfört med beräkningar av referens-evapotranspirationen för exempelvis gräsytor (se t ex Allen (2009)) blir alltså evapotranspirationen något högre med denna modell.

Nettostrålningen beräknas med hjälp av (Holtslag & van Ulden, 1983):

$$R_n = \frac{(1 - \alpha)R_g + c_1 T^6 - \sigma T^4 + c_2 N}{1 + c_3} \quad (1-2)$$

där α är albedo (0,23), R_g är globalstrålningen (W/m²), T är temperaturen (K), σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴), N är molnigheten uttryckt i oktas (åttondelar), och där c_1 ($5,31 \cdot 10^{-13}$ W/m²K⁶), c_2 (60 W/m²) och c_3 (0,12) är konstanter.

Det antogs i modellen att markvärmeflödet G under svenska augustiförhållanden är 5% av R_n under dagtid när $R_n \geq 0$ (Rodskej, opublicerat). Nattvärdena för G varierar bl a med markytans fuktighet (Thompson, 1981; Eckersten m fl, 1998). I modellen antogs att $G = 0,30R_n$ när $R_n < 0$.

Ekvationer för beräkning av Δ , e_s , e_a , och γ presenteras av Burman och Pochop (1994):

$$\Delta = \frac{2503}{(T + 237,3)^2} e^{17,27T/(T+237,3)} \quad (1-3)$$

$$e_s = 0,6108 e^{17,27T/(237,3+T)} \quad (1-4)$$

$$e_a = RF e_s \quad (1-5)$$

$$\gamma = 0,001568(101,3 - 0,01055z) \quad (1-6)$$

där T är omgivningstemperaturen (°C), RF den relativa luftfuktigheten (decimal) och z höjden över havet (m) (här antogs 10 m).

Den aerodynamiska konstanten r_a beräknas enligt (Monteith & Unsworth, 1990)

$$r_a = \frac{(\ln((z-d)/z_0))^2}{\kappa^2 u(z)} \quad (1-7)$$

där $u(z)$ är vindhastigheten (m/s) uppmätt vid höjden z , d är nollplansförskjutningen (m), z_0 är skrovlighetslängden (m) och κ von Karmans konstant ($\kappa = 0,41$). Nollplansförskjutningen d kan beräknas enligt (Abtew m fl, 1989):

$$d = 0,85F_c H \quad (1-8)$$

och skrovlighetslängden z_0 (Abtew m fl, 1989):

$$Z_0 = 0,13(H-d) \quad (1-9)$$

där F_c är andelen av den totala ytan som täcks av råhetelementet (strängen), och där H är den genomsnittliga höjden av elementet (m).

De använda väderparametrarna för att beräkna E observerades var tredje timme, och linjär interpolation gjordes därför av E för att få timvärden.

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.et.slu.se

SLU
Department of Energy and Technology
Box 7032
S-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000
