

Ett webbaserat beslutsstödsystem för integrerad skadebekämpning i svensk äppelodling

Slutrapport i SLF projekt enligt ansökan H1356173

A web-based decision-support system for integrated pest management in Swedish apple production

Tomas Thierfelder, institutionen för energi och teknik, SLU Ultuna (SLU-ET) i december 2017

1. Inledning

Föreliggande projekt avsåg att implementera, driftsätta och skapa långsiktig förvaltning av ett webbaserat beslutsstödsystem för bekämpning av skadegörare i svensk äppelodling. Systemet skulle kunna erbjuda stöd i den precision som krävs för bekämpning med moderna selektiva preparat, där tidpunkt och val av bekämpningsmedel har stor betydelse för skördeutfallet. Systemet planerades att kunna operera under lokala svenska förutsättningar, och var avsett att hantera sju vecklararter (bl.a. äppelvecklaren) och en stekelart (äppelstekel) samtidigt. Målsättningen var att optimera effekten av bekämpning samtidigt som den totala mängden bekämpningsmedel minimeras. Dessutom avsåg projektet att studera hur beslutsstödsystemet bemöts av odlarna så att dess funktionalitet kunde justeras och vidareutvecklas i samarbete med dessa.

I projektansökan sammanfattades de frågeställningar som projektet avsåg att adressera i de fyra punkterna 1) förvaltarskapet av webbaserade tjänster, 2) Färdigställande och driftsättning av ett webbaserat beslutsstödsystem för bekämpning av skadegörare i svensk äppelodling, 3) anslutning av nya äppelodlingar till det driftsatta systemet, och 4) studiet av systemeffekter, dvs. av hur användandet av beslutsstödsystemet påverkar den svenska äppelproduktionen. Den totala budget som beräknades för detta arbete uppgick till 2,195,000 SEK, varav 1,295,800 SEK söktes från SLF och merparten av resterande belopp avsågs att tillföras projektet via motfinansiering från branschorganisationen Äppelriket. Av denna beräknade budget erhöles totalt 400,000 SEK i anslag från SLF, vilket bedömdes som ett allt för ringa bidrag för att det sökta projektet skulle kunna genomdrivas fullt ut. Eftersom färdigställandet av källkod och identifiering av algoritmer med nödvändighet föregår implementering och utvärdering av det färdiga systemet, så har anslaget i första hand använts för det färdigställande arbete som beskrivs i punkt 2 ovan. Detta uteslutande av implementering och driftsättning har förhindrat Äppelriket att motfinansiera så som planerat, och därmed har det föreslagna projektet lämnats med en total finansiering om 400,000 SEK, vilket alltså skall jämföras med den planerade budgeten om 2,195,000 SEK (18%).

Punkt 2 ovan beskrivs såhär i ansökan:

2. Parallellt med att förvaltningen sätts på plats vill vi färdigställa och driftsätta ett webbaserat beslutsstödsystem för bekämpning av skadegörare i svensk äppelodling. Här ligger de algoritmer och programkoder som hittills har utvecklats inom ramen för Äppelvecklarprojektet färdiga att tas i bruk.

Denna punkt 2 avsåg bl.a. att lösa följande uppgifter (enligt ansökan):

- Färdigställande av programkod
 - Delar av existerande systemdesign återstår att implementera i programkod
- Implementering av algoritmer i färdigställd programkod
 - De algoritmer som styr prognostiseringen baseras på statistisk analys av fältdata.

Befintliga projektmedel har använts inom de två huvudsakliga områdena i) identifiering av algoritmer, och ii) utveckling av en systemprototyp.

2. Resultat

2.1. Identifiering av algoritmer

Med algoritmer avses de statistiska samband som använder externa variabler för att prediktera de parametrar som reglerar skadeinsekternas populationsdynamik. För att "identifiera algoritmer" krävs därför en empirisk fältverksamhet där allt från väder till populationsdynamik observeras och registreras på ett sätt som kan användas i en populationsdynamisk modell. Denna modell styrs med hjälp av en minimalistisk uppsättning parametrar, och via empiriska

observationer kan statistiska samband uppställas som kopplar dessa parametrar till externa variabler så som väder och bekämpningsstrategi. Om denna populationsmodell implementeras i programvara på så sätt att relevanta regler-variabler strömmas in från väderstationer och/eller strömmade vädertjänster, och så att odlarna själva kan förse programvaran med odlingsspecifika uppgifter som bekämpningsstrategi, så kan den förväntade populationsdynamiken simuleras och användas som beslutsstöd vid integrerad skadebekämpning. Eftersom lokalt installerade väderstationer och strömmade vädertjänster har hög geografisk upplösning, kan beslutsstödsystemet utrustas med separata algoritmer per odling och skadeart. Systemet arbetar därför med odlingsspecifika konton, där alltså individuella odlare bedriver sin verksamhet med kontospecifik information.

För att kunna genomföra den ovan nämnda simuleringen krävs två separata grupper av information, där den första beskriver tidpunkten då de första adulta flygande skadeindividerna uppträder i odlingen (tidpunkt för första svärmning), och där den andra beskriver populationsmodellens tillstånd med en matris av parametervärden (se Boltzmann-modeller nedan). Den tidsenhet som normalt används inom entomologisk populationsdynamik räknas i graddagar, dvs. kumuleringen av dygnsmedeltemperaturer över ett valfritt intervall kalenderdagar. Startpunkten för kumuleringen kallas BioFix, och den så kallade graddagsmodellen kan utrustas med övre och nedre gränser för vilka dygnsmedeltemperaturer som skall inkluderas i temperatursumman. Graddagsmodellen är artspecifik, dvs. BioFix och gränstemperaturerna är artspecifika och bestämmer med vilken takt skadeinsekten utvecklas mot svärmande adult. Tidpunkten för första svärmflykt kallar vi FAE (First Annual Emergence), vilket betyder att tidsintervallet för kumulering av temperaturer börjar med BioFix och avslutas med FAE. Med utgångspunkt i FAE kan tidpunkten för första förväntade äggläggningen och första förväntade förekomsten av larver skattas med hjälp av i litteraturen förekommande graddagsmodeller. Genom att kontinuerligt referera graddagskumuleringen till kalenderskalan kan temperatursumman när som helst uttryckas i kalendertid.

2.1.1. Tidpunkt för första svärmflykt

Den empiriska studie som krävs för att bestämma statistiska samband mellan FAE och de omvärldsvariabler som antas reglera tidpunkten för första flygning (FAE) har omfattat sju skadearter observerade i elva kommersiella äppelodlingar under en period om fyra konsekutiva år 2008 t.o.m. 2011). Varje odling har besökts en gång i veckan under vegetationsperiod, vilket betyder att veckovisa observationer måste relateras till dygnsvisa temperatursummor. Exakt hur detta har gjorts redovisas i den litteratur som hänvisas till nedan, här följer en kortfattad sammanfattning av de empiriskt observerade variabler som har hanterats i vårt relativt omfattande statistiska arbete:

Experimentella variabler

Species: De sju vecklararterna (Tortricidae) *A. orana*, *A. podana*, *A. rosana*, *C. pomonella*, *H. nubiferana*, *P. heparana*, och *S. ocellana*. *A. orana* har förekommit relativt sparsamt i svenska äppelodlingar under vår experimentella tidsperiod.

Orchards: Elva sydsvenska (skånska) kommersiella äppelodlingar belägna i trakten av Bjärred, Brösarp, Båstad, Helsingborg, Lund, Malmö, Södra Mellby, Vik, Vånga, Österslöv, och Östra Sönnarslöv. Odlingarna ligger på så stort avstånd att det förefaller orimligt att de delar skadepopulationer. Detta viktiga antagande betyder att populationsegenskaper ärvs inom, men inte emellan odlingar.

Year: Dom sju vecklararterna har observerats på elva odlingar under de fyra konsekutiva åren 2008, 2009, 2010, och 2011.

Species×Orchards×Year: Med elva odlingar observerade genom fyra konsekutiva år har 44 säsongsekvivalenter, bestående av bekämpningsstrategi visavi populationsdynamik, observerats på sju olika skadearter. Detta resulterar i totalt 308 artspecifika säsongsekvivalenter, som var och en har parameteriserats med avseende på:

Externa variabler

Spray: Antalet bekämpningstillfällen per odlingssäsong.

Multi-agent: Antalet bekämpningsmedel per odlingssäsong.

Comb-agent: Den exakta kombinationen bekämpningsmedel.

Spring-spray: Har bekämpningsmedel applicerats före första svärmning?

Summer-spray: Har bekämpningsmedel applicerats efter första svärmning?

Generations: Antalet distinkta svärmningstillfällen per art och odlingssäsong (indikerar inte nödvändigtvis separata generationer).

Spray×Multi-agent×Comb-agent×Spring-spray×Summer-spray (i godtycklig kombination): Samlat uttryck för "bekämpningsstrategi".

De temperatursummor som används för att mäta tidpunkt för första svärmning (FAE) har parameteriserats på följande sätt:

FAE: FAE-iii-jjj, där iii markerar undre gränstemperatur och jjj markerar den valda indelningen av veckor.

Threshold temperature: Temperatursummans undre gränsvärde är satt till "all" (ingen undre gräns), 0 (alla temperaturer under 0 grader exkluderas), 3, 6, 10, and 12 grader C° [iii = all, 0, 3, 6, 10, 12]. Övre gränstemperatur beaktas ej i Sveriges tempererade klimat.

Portion of the week: Kumulering av temperaturer från slutet av en vecka till slutet av nästa (fredag till fredag), från mitten av veckan till mitten av nästa (onsdagar), och från början av veckan till början av nästa (måndagar) [jjj = end, mid, intro].

Threshold×Portion: Interaktionen mellan gränsvärde och vecka resulterar i $3 \times 6 = 18$ olika varianter av temperatursumma.

Med riklig tillgång till variabler som beskriver sådant som väder- och markförhållanden på de enskilda odlingarna, används en indexering kkk-lll-mmm-nnn, där kkk markerar den period av året som täcks av variabeln ifråga, lll markerar den fysikaliska entitet som täcks av variabeln ifråga, mmm markerar den övergripande typen av beskrivande statistik, och nnn typen av veckovis observation. Som ett exempel så markerar variabelbeteckningen Win-Temp-ave-min den standardiserade atmosfäriska temperaturen uppmätt under vintern (veckonummer 48 – 9, dvs. ungefär december till och med februari), och att variabeln anger det genomsnittliga veckovisa temperaturminimat under denna period. Med hjälp av denna indexering kan följande variabler listas:

Period: kkk = Win, Spr, Sum, Ear-Spr, Ear-May, W18, W19, W20, W21, W22. Win = vinterveckorna 48 – 9 (inklusive W9), Spr = W10 – W22, Sum = W23 – W35, Ear-Spr = W10 – W15, Ear-May = W18 – W19, och så vidare ned till nivån individuella veckor. Totalt har 10 olika perioder täckts in.

Physical entity: lll = Temp, RH, Prec, Wspeed, Wdir, DewPt, Bar, Leafwet1, Leafwet2, Soiltemp. Temp betyder standardmässig atmosfärisk temperatur [C°], RH = relative atmosfärisk humiditet [%], Prec = nederbörd [mm], Wspeed = vindhastighet[m/s], Wdir = vindriktning [deg.], DewPt = daggpunkt [C°], Bar = standardmässigt atmosfäriskt lufttryck [mm Hg], Leafwet1 = yttre krontakets löv-fuktighet [wetness index], Leafwet2 = inre krontakets löv-fuktighet [wetness index], Soiltemp = marktemperatur på djupet x mm depth [C°]. Totalt har 10 fysikaliska entiteter registrerats.

Statistic: mmm = ave, SD, sum, max, där ave betecknar det aritmetiska medelvärdet, SD standardavvikelsen, sum den kumulerade summan, och max det maximala värdet. totalt har 4 beskrivande statistikor använts.

Assessment type: nnn = mean, min, max, sum, där mean betecknar det veckovisa aritmetiska medelvärdet, min det veckovisa minimat, max det veckovisa maximat, och sum den veckovisa summationen. Totalt har 4 olika typer av veckovisa mått använts.

Period×Entity×Statistic×Assessment type: När indexen närmast ovan kombineras på tvärs över perioder, fysikaliska entiteter, beskrivande statistikor och veckovisa mått så uppstår $10 \times 10 \times 4 \times 4 = 1600$ möjliga kombinationer varav ungefär 280 har hanterats i föreliggande studie. Anledningen till denna diskrepans är att samtliga kombinationer ej är tillämpbara i samtliga fall. Ett exempel på detta är nederbörd som typiskt kumuleras genom den observerade perioden, medan temperatur är ett exempel på en variabel som normalt uttrycks som ett medelvärde.

När antalet experimentella och externa variabler summeras tillsammans med de olika parameteriseringarna av temperatursummor så hamnar det totala antalet variabler som är tillgängliga för statistisk inferens på $9 + 18 + 280 = 307$ st.

Statistisk metodik

Sambandet mellan tidpunkt för första flygning (FAE) och de omvärldsvariabler som potentiellt reglerar FAE har analyserats med hjälp av NonLinear Iterative Partial Least Squares (NIPALS), där den kombination omvärldsvariabler som är sinsemellan optimalt oberoende (optimalt ortogonal regressormatris) och samtidigt optimerar förklaringsgraden (justerad förklaringsgrad $R^2(\text{adj.})$) av den variation som har observerats i FAE har identifierats. De slutliga sambanden har därefter bestämts enligt Mallows' kriterium, genom baklänges stegvis regression. All statistisk inferens har genomförts i mjukvarorna SAS och/eller STATISTICA.

Nedanstående redovisning av konkreta resultat sker på engelska:

Optimisation of FAE degree-day scale

With the week of the first swarming-flight of the adult Tortricidae moth transferred to the various degree-day parameterisations (across species and orchards), the effectiveness of parameterisations may be inferred. Here, the term effectiveness should be interpreted in its strict statistical meaning, where an effective estimate minimises the observed variation (and, hence, the associated error). With different parameterisations having different absolute FAE values, a standardised measure of variation is required across degree-day scales. One such standardised measure is the relative standard deviation (RSD), and when applied to the 18 different parameterisations, $jjj = \text{end}$ and $jjj = \text{intro}$ are directly ruled out. This complies nicely with causality, since all swarming-flight observations are made around mid-week. In the remaining category of mid-week parameterisations, RSD is distributed across species and threshold temperatures as illustrated in figure 1.

As may be deduced by inspection of figure 1, degree-day threshold zero degrees C° optimises FAE efficiency in the cases of *A. orana*, *C. pomonella*, *H. nubiferana*, and *S. ocellana*, whereas degree-day threshold six degrees C° optimises FAE efficiency of *A. podana*, *A. rosana*, and *P. heparana*. It may also be deduced that degree-day threshold zero degrees C° may be considered as an approximate optimum across all the species addressed. In the following analyses, for the sake of compatible comparison, FAE-0-mid is used across all species.

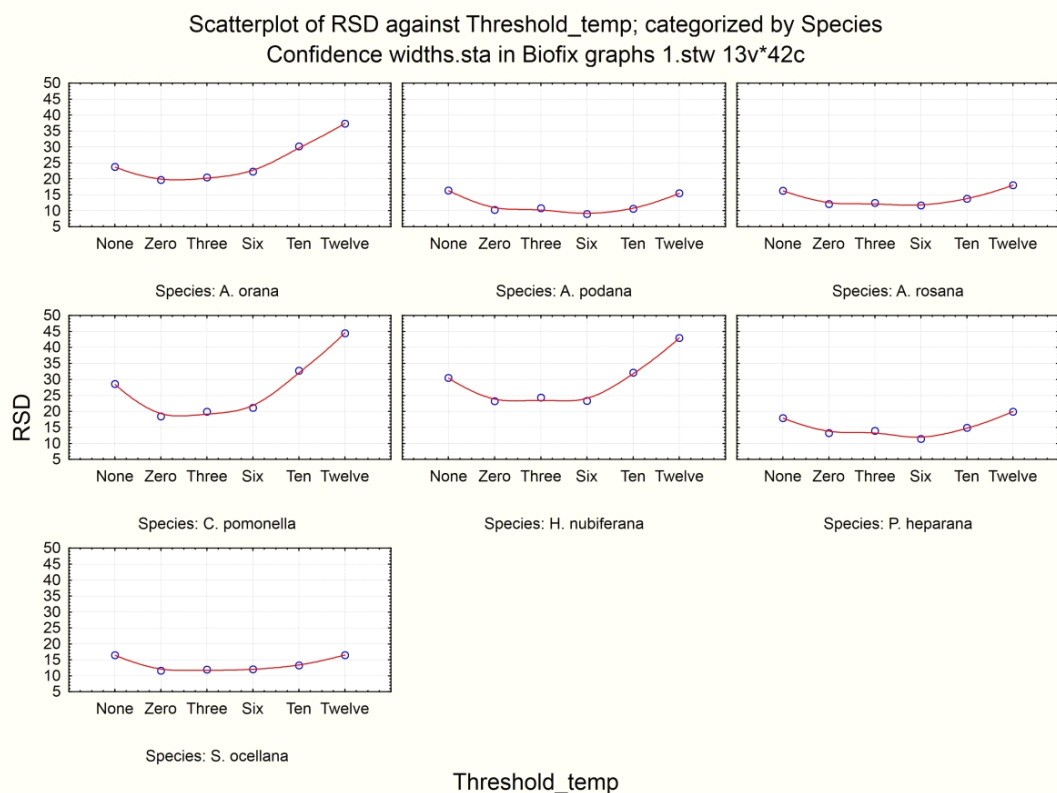


Figure 1: Relative standard deviations across Tortricidae species and degree-day thresholds.

Empirical FAE observations

The FAE descriptives across species and orchards are given in table 1, figure 2 and figure 3. When figure 2 is inspected, the possibility of flight-curves overlapping across groups of Tortricidae species becomes apparent. If eventual overlaps are transferred onto the ovicidal and larval phases where pesticides may be applied, the possibility of targeting several species at one spray occasion emerges. This would increase the efficiency of pest management while minimising the total amount of required pesticides.

Species	FAE Mean	FAE SD	FAE Min	FAE Max
A. orana	1155	227	750	1715
A. podana	1059 (872)	109 (78)	896 (741)	1368 (1100)
A. rosana	1264 (1077)	154 (126)	896 (784)	1595 (1426)
C. pomonella	698	129	500	973
H. nubiferana	993	231	701	1746
P. heparana	1253 (1066)	167 (122)	999 (882)	1595 (1426)
S. ocellana	1182	137	973	1610
All groups	1086	137	973	1610

Table 1: FAE-0-mid with FAE-6-mid bracketed when applicable. Each species comprises 44 observations.

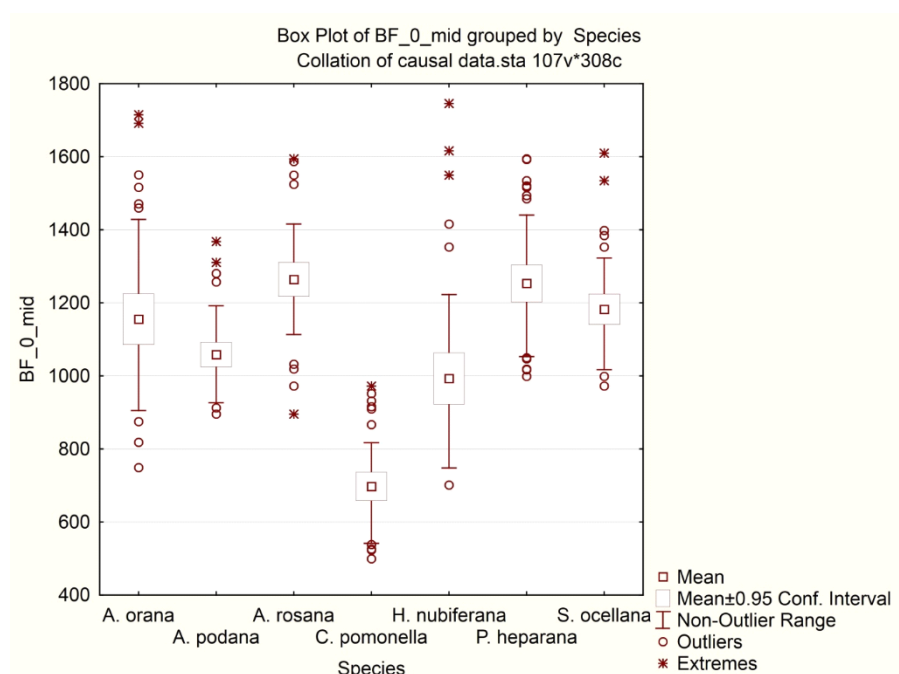


Figure 2: FAE-0-mid across seven Tortricidae species. See also table 1.

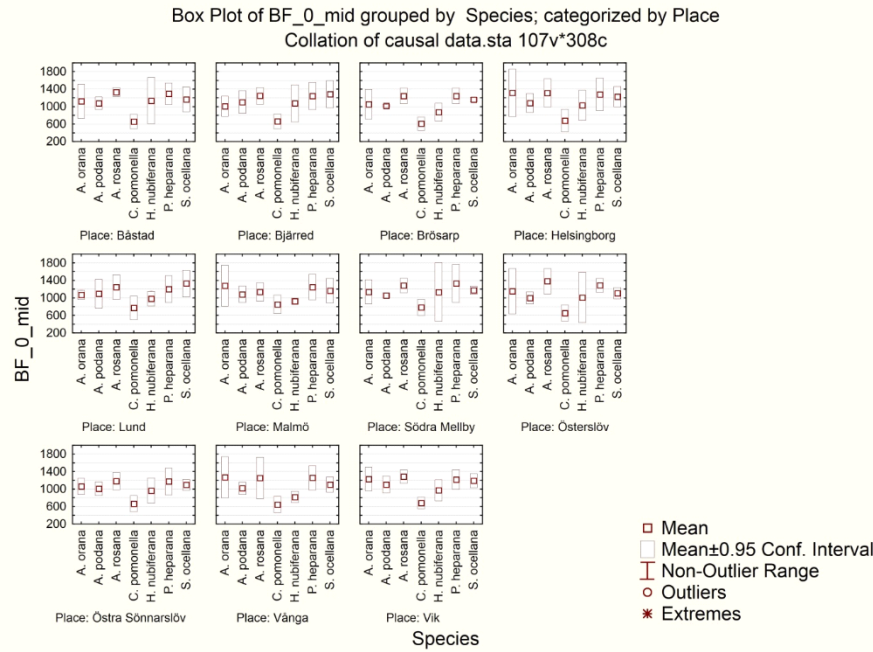


Figure 3: FAE-0-mid across species and orchards. Each combination of species and orchard comprises 4 observations (across 4 years).

Analysis of FAE variation

Info:	Regressor:	Entity:	p (< i):	β:
A. orana	Win_Wspeed_ave_mean	Winter wind-speed	0.002	-0.79
FAE-0-mid	Spr_Wspeed_ave_max	Spring wind-speed	0.001	0.59
F(4, 39) = 6.3	Win_Temp_ave_mean	Winter temperature	0.022	0.37
R ² (adj.) = 0.33	Win_RH_ave_mean	Winter humidity	0.045	-0.44
A. podana	Sum_Temp_ave_mean	Summer temperature	0.001	0.52
FAE-6-mid	Sum_Prec_sum_sum	Summer precipitation	0.027	-0.27
F(4, 39) = 9.6	Spr_Temp_ave_min	Spring temperature	0.001	0.43
R ² (adj.) = 0.44	Spring_spray	Spring pesticide spray	0.005	-0.35
A. rosana	Ear_Spr_RH_ave_mean	Early spring humidity	0.008	-0.37
FAE-6-mid	Spr_Wspeed_ave_mean	Spring wind-speed	0.031	-0.31
F(3, 40) = 6.7	Spring_spray	Spring pesticide spray	0.019	-0.35
R ² (adj.) = 0.29				
C. pomonella	Win_Temp_ave_mean	Winter temperature	0.001	0.95
FAE-0-mid	Ear_Spr_Temp_ave_mean	Early spring temp.	0.005	0.45
F(2, 41) = 22.0				
R ² (adj.) = 0.49				
H. nubiferana	Ear_Spr_Prec_sum_sum	Early spring prec.	0.001	0.61
FAE-0-mid	Win_RH_ave_mean	Winter humidity	0.006	-0.50
F(3, 40) = 18.7	Win_Wspeed_ave_mean	Winter wind-speed	0.038	-0.35
R ² (adj.) = 0.55				
P. heparana	Win_Temp_ave_mean	Winter temperature	0.010	1.72
FAE-6-mid	Win_Temp_ave_min	Winter min. temp.	0.043	-1.32
F(2, 41) = 7.3				
R ² (adj.) = 0.23				
S. ocellana	Win_Temp_ave_min	Winter min. temp.	0.001	0.83
FAE-0-mid	Ear_Spr_Temp_ave_max	Early spring temp.	0.016	0.34
F(2, 41) = 19.4				
R ² (adj.) = 0.46				

Table 2: FAE base regressors of seven Tortricidae species. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

As can be seen in figure 3, the FAE of individual Tortricidae species varies from one orchard to another. If figure 3 was further broken down into Species×Orchards×Year, 44 varying FAE values would be attained per orchard (table 1). When this response variation is regressed on potentially regulating external variables, a regulatory base is identified where the individual components are chosen to simultaneously minimise component covariance and optimise the degree of response explanation. As a result, table 2 is attained. When table 2 is inspected, the profile of factors that control the variation of FAE may be inferred across species. As an example, winter and early spring temperatures seem to control the FAE of *C. pomonella*, whereas wind-speed dominates in the case of *A. orana*. All bases are highly significant, although they leave large portions of the observed FAE variation unexplained. The standard interpretation of this is that the variables at hand do indeed contribute to controlling the observed FAE variation, but that other important regressors exist that haven't been covered with observations.

Searching a large matrix of potential regressors for an explanatory base, given a target response, is a delicate task. Here it was initially solved with partial least squares (NIPALS algorithm) where the base dimensionality was estimated together with a list of regressor efficacy. The top candidates of this list were thereafter brought into a best subset regression, using Mallows's criteria to identify a regressor base. The final estimation of regression parameters was made with a mixed model, assuming the within-orchard covariance that defines the inherited phenological continuum assumed to prevail within, but not across, orchards.

2.1.2. The Boltzmann growth-curve

At each combination of species, orchards, and years, the observed number of swarming adults may be cumulated and plotted against an appropriate degree-day scale (figure 4). Under standard assumptions, a standard interpretation of such a cumulation is that it may be considered as a primitive function of the primary flight curve (figure 4), and hence that the primary flight curve may be determined as the degree-day derivative of the cumulated flight-curve.

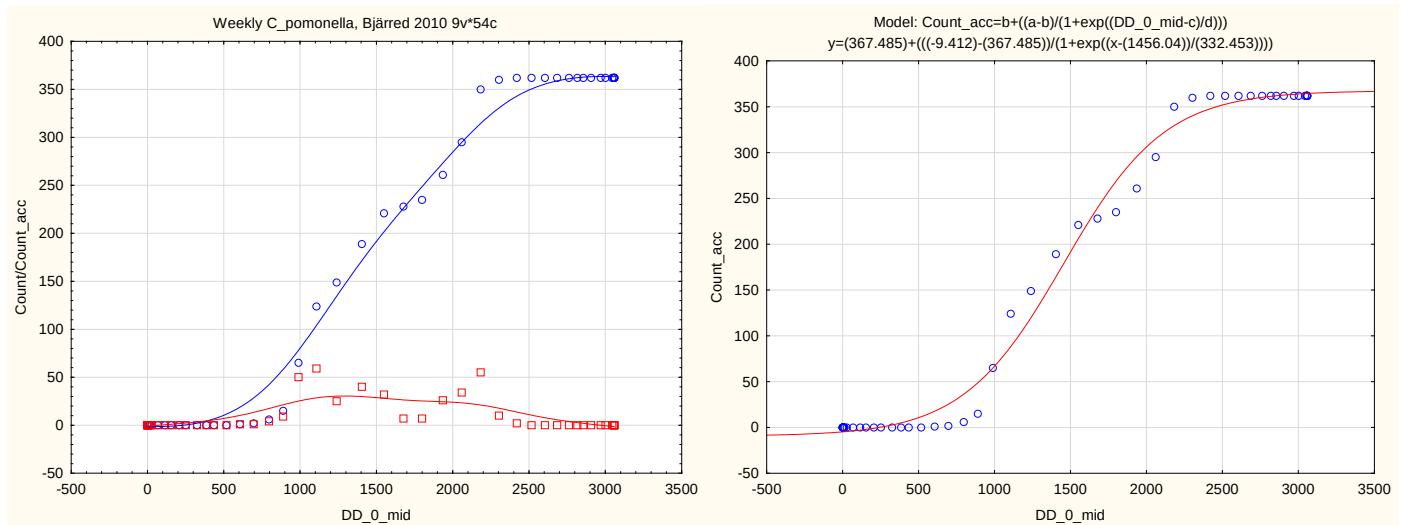


Figure 4 and 5: Left (4): Primary (red) and cumulated (blue) flight-curves of *C. pomonella* in the Bjärred orchard, 2010. Distance weighted least squares fitted curves. Right (5): A four-parameter Boltzmann growth-curve fitted to the cumulation of swarming *C. pomonella* observed at the Bjärred orchard during 2010.

If basic flight-curves are considered as being smoothly symmetric around the degree-day value (DD) of maximum swarming adults (which, in many ways, is a smart assumption), the so called four-parameter Boltzmann growth-

curve $f(DD) = a + \frac{(b-a)}{1 + e^{(DD-c)/d}} + \varepsilon$ adequately expresses the cumulated flight-curve (figure 5). As a consequence,

the Boltzmann degree-day derivative $f'(DD)$ expresses the primary flight-curve, with parameters a , b , c , and d as follows: a = annual initial number of swarming moths (trivially zero), b = the annual maximum cumulation of swarming moths, c = degree-day timing of maximum swarming adults, d = value of maximum population growth-speed [number of swarming adults per degree-day]. In addition to the Boltzmann parameters, FAE coincides with the Boltzmann

curve take-off from value zero (from value a actually). During a sequence of years, the Boltzmann estimates of the previous year (one year back) may be denoted b_{-1} , c_{-1} , and d_{-1} . Measured in terms of standard least squares, the four-parameter Boltzmann growth curve typically explain around 95% of the observed count variation.

Given the experimental and external variables accounted for above, annual flight curves may be predicted if they correlate accurately enough with the Boltzmann parameters. We therefore apply the same methodology as in the case with FAE, searching for regressor bases that connect expected flight-curves with a suitable set of regulating factors (tables 3i):

Info:	Regressor:	Entity	$p (< i)$:	β :
A. podana b:	Sum_Temp_ave_max	Summer temperature	0.001	-0.53
$F(5, 38) = 11.4$	b_{-1}	Size of last year's population	0.039	0.25
$R^2(\text{adj.}) = 0.55$	Sum_RH_ave_mean	Summer humidity	0.005	0.36
	c_{-1}	Timing of last year's population	0.006	0.34
	Spring_spray	Spring pesticide spray	0.032	-0.26
A. podana c:	Ear_May_Temp_ave_min	Early May temperature	0.001	0.47
$F(5, 38) = 61.8$	Win_Temp_ave_min	Winter temperature	0.032	0.22
$R^2(\text{adj.}) = 0.88$	Sum_Temp_ave_min	Summer temperature	0.001	0.35
	Sum_Temp_ave_mean	Summer temperature	0.001	0.26
	Spring_spray	Spring pesticide spray	0.001	-0.25
A. podana d:	Ear_Spr_RH_ave_mean	Early spring humidity	0.001	0.88
$F(5, 38) = 7.3$	Sum_RH_ave_mean	Summer humidity	0.003	0.78
$R^2(\text{adj.}) = 0.42$	Ear_Spr_Temp_ave_max	Early spring temperature	0.003	0.51
	Win_Temp_ave_max	Winter temperature	0.006	0.63
	Spr_RH_ave_mean	Spring humidity	0.001	-1.00

Table 3a: Base regressors concerning the Boltzmann parameters of *A. podana* flight curves. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

Info:	Regressor:	Entity	$p (< i)$:	β :
A. rosana b:	b_{-1}	Size of last year's population	0.001	0.50
$F(5, 38) = 12.4$	Ear_Spr_Temp_ave_mean	Early spring temperature	0.014	0.31
$R^2(\text{adj.}) = 0.53$	Sum_Prec_sum_sum	Summer precipitation	0.020	-0.29
	Spr_Wspeed_ave_mean	Spring wind-speed	0.006	-0.33
A. rosana c:	Ear_May_Temp_ave_min	Early May temperature	0.001	0.50
$F(2, 40) = 39.5$	Ear_Spr_Prec_sum_sum	Early spring precipitation	0.001	0.41
$R^2(\text{adj.}) = 0.65$				
A. rosana d:	Win_Wspeed_ave_max	Winter wind-speed	0.002	-0.49
$F(3, 39) = 7.7$	Ear_Spr_RH_ave_mean	Early spring humidity	0.019	0.33
$R^2(\text{adj.}) = 0.32$	Win_Temp_ave_min	Winter temperature	0.001	0.51

Table 3b: Base regressors concerning the Boltzmann parameters of *A. rosana* flight curves. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

Info:	Regressor:	Entity	$p (< i)$:	β :
C. pomonella b:	b_{-1}	Size of last year's population	0.001	0.55
$F(3, 40) = 24.6$	Spr_RH_ave_mean	Spring humidity	0.001	0.54
$R^2(\text{adj.}) = 0.62$	d_{-1}	Growth rate of last year's pop.	0.023	0.22
C. pomonella c:	c_{-1}	Timing of last year's population	0.001	0.48
$F(5, 38) = 61.8$	Sum_Temp_ave_mean	Summer temperature	0.001	0.48
$R^2(\text{adj.}) = 0.88$	Ear_May_Temp_ave_max	Early May temperature	0.001	0.51
C. pomonella d:	c_{-1}	Timing of last year's population	0.001	0.50
$F(3, 40) = 12.2$	Sum_Temp_ave_mean	Summer temperature	0.001	0.47
$R^2(\text{adj.}) = 0.44$	Win_RH_ave_mean	Winter humidity	0.030	-0.28

Table 3c: Base regressors concerning the Boltzmann parameters of *C. pomonella* flight curves. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

Info:	Regressor:	Entity	p (< i):	β:
H. nubiferana b:	b-1		0.001	0.65
F(4, 31) = 17.9	Ear_May_Temp_ave_mean		0.018	1.11
R ² (adj.) = 0.66	Ear_May_Temp_ave_max		0.001	-1.50
	Ear_Spr_Prec_sum_sum		0.003	-0.41
H. nubiferana c:	Win_Temp_ave_mean		0.001	0.50
F(2, 37) = 9.0	Sum_Temp_ave_mean		0.023	0.32
R ² (adj.) = 0.29				
H. nubiferana d:	Ear_May_Temp_ave_min		0.004	-0.43
F(3, 36) = 6.3	Spr_Prec_sum_sum		0.023	0.33
R ² (adj.) = 0.28	Sum_Temp_ave_mean		0.035	-0.31

Table 3d: Base regressors concerning the Boltzmann parameters of *H. nubiferana* flight curves. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

Info:	Regressor:	Entity	p (< i):	β:
P. heparana b:	Ear_Spr_RH_ave_mean		0.001	0.52
F(5, 38) = 11.4	Sum_Temp_ave_mean		0.001	0.51
R ² (adj.) = 0.55	Ear_Spr_Temp_ave_min		0.001	0.41
	Spring_spray		0.001	-0.58
P. heparana c:	Win_RH_ave_mean		0.001	-0.64
F(6, 37) = 18.361.8	Ear_May_Temp_ave_min		0.001	0.77
R ² (adj.) = 0.71	Win_Prec_sum_sum		0.010	0.27
	Sum_Temp_ave_min		0.017	0.34
	Sum_Temp_ave_mean		0.007	0.28
	Ear_May_RH_ave_mean		0.002	0.83
P. heparana d:	Sum_Prec_sum_sum		0.054	-0.26
F(1, 42) = 3.0				
R ² (adj.) = 0.05				

Table 3e: Base regressors concerning the Boltzmann parameters of *P. heparana* flight curves. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

Info:	Regressor:	Entity	p (< i):	β:
S. ocellana b:	b-1		0.001	0.427
F(5, 38) = 16.8	Sum_Temp_ave_mean		0.002	0.33
R ² (adj.) = 0.65	c-1		0.045	0.25
	Ear_Spr_Temp_ave_mean		0.004	0.63
	Ear_Spr_Temp_ave_max		0.007	-0.59
S. ocellana c:	Win_Temp_ave_mean		0.001	2.00
F(3, 40) = 53.1	Ear_May_Temp_ave_mean		0.001	-1.22
R ² (adj.) = 0.78	Spr_Temp_ave_mean		0.001	1.23
S. ocellana d:	b-1		0.016	0.31
F(3, 40) = 8.9	Win_Wspeed_ave_mean		0.001	-0.54
R ² (adj.) = 0.35	Win_Temp_ave_mean		0.001	0.53

Table 3f: Base regressors concerning the Boltzmann parameters of *S. ocellana* flight curves. The betas denote standardised regression coefficients, and hence indicate the relative weight of regressors.

Upon inspection of tables 3i, the main factors controlling the variation of flight-curve parameters may be inferred across species. In the general case, we conclude that the characteristic of last year's swarming, in combination with wintering-, hatching-, and swarming conditions, regulate the flight-curve characteristics of the present year. All the regressors are highly significant (except the *P. heparana* d), although the explanatory power of most regressor bases is limited. Like in the case with FAE analysis, the reason for this is that important controlling factors are missing in the observatory design. It may be noted that *A. orana* is missing in the above analysis, which is due to the relative rarity of this species – in many orchards there simply weren't observations enough for fitting the Boltzmann curve.

Apart from deducing basal knowledge regarding the regulators of Tortricidae phenology from the above data, the regression equations may be used as algorithms in order to predict important population characteristics. Since flight-

curves begin with FAE, the inclusion of FAE in flight-curve estimation is possible (but not done in the above analysis). In most cases, this improves the explanatory power of the regression models.

3.2. Utveckling av systemprototyp

Med hjälp av lämplig graddagsmodell, en modell för FAE, samt modeller för de parametrar som styr Boltzmanns tillväxtmodell, så som presenterats ovan, har de variabler som behövs för att driva en webbaserad simulering av populationsdynamik identifierats. De variabler som beskriver de enskilda odlingarnas bekämpningsstrategi anges i beslutsstödsystemet av odlarna själva, i privata odlingsspecifika konton, medan meteorologiska variabler strömmas in i realtid via väderstationer som har installerats i de enskilda odlingarna, eller via strömmade vädertjänster från SMHI (MESAN prognosdata). Ett sådant system existerar redan i form av en webbaserad prototyp avsedd för demonstrationer, se illustrationerna nedan. Prototypen är emellertid inte försedd med kopplingar till väderstationer eller strömmade vädertjänster, och kan därför ännu inte driftsättas. Den viktiga förvaltningsfrågan har heller inte kunnat utredas inom ramen för den begränsade projektbudgeten. Om man ändå ska lämna en rekommendation angående drift och förvaltning så är den grundläggande principen att denna typ av beslutsstödsystem inte bör kommersialiseras utan förvaltas av användarna själva. Detta görs lämpligen via deras gemensamma intresseorganisation, där den största svenska intresseorganisationen för äppelbönder är skånska "Äppelriket". Användarna rekommenderas att inom ramen för deras engagemang i Äppelriket upprätta en förvaltningsorganisation gällande det webbaserade beslutsstöd som kan erbjudas via Vecklarportalen, där samtliga beslut rörande systemets budgetering, drift och vidareutveckling tas. Driften läggs ut på webshotell, där Umeå universitets avdelning för IT och system (UmU ITS) särskilt kan rekommenderas. Representanter för driften måste finnas med i förvaltningsorganisationen, och tillsammans med den bestämma hur driften skall finansieras. Det finns olika modeller för finansiering, så som abonnemang eller direkt fakturering. Kostnaden för att utveckla Vecklarportalen från befintlig prototyp till drift torde motsvara skillnaden mellan de medel som söktes i föreliggande projekt, och de medel som faktiskt tilldelades, dvs. omkring en miljon SEK. Den löpande driftkostnaderna är omöjliga att uppskatta eftersom de är helt beroende på serverkonfiguration och säkerhetsnivå. Beslut i denna riktning åligger förvaltningsorganisationen att fatta i samarbete med representanter för driften.

Prototypen till den s.k. vecklarportalen har utvecklats i samarbete med odlarna själva, och med representanter för odlarföreningar i ett antal möten arrangerade under perioden 2013 till våren 2016. Dessa möten har blivit protokollförda och det resulterande materialet följer gängse standard för s.k. agil systemutveckling. Det finns nogsamt lagrat på SLU ET, och kan betecknas som relativt värdefullt.

Nedan följer en kort illustrerad beskrivning av Vecklarportalens viktigaste karaktärer:

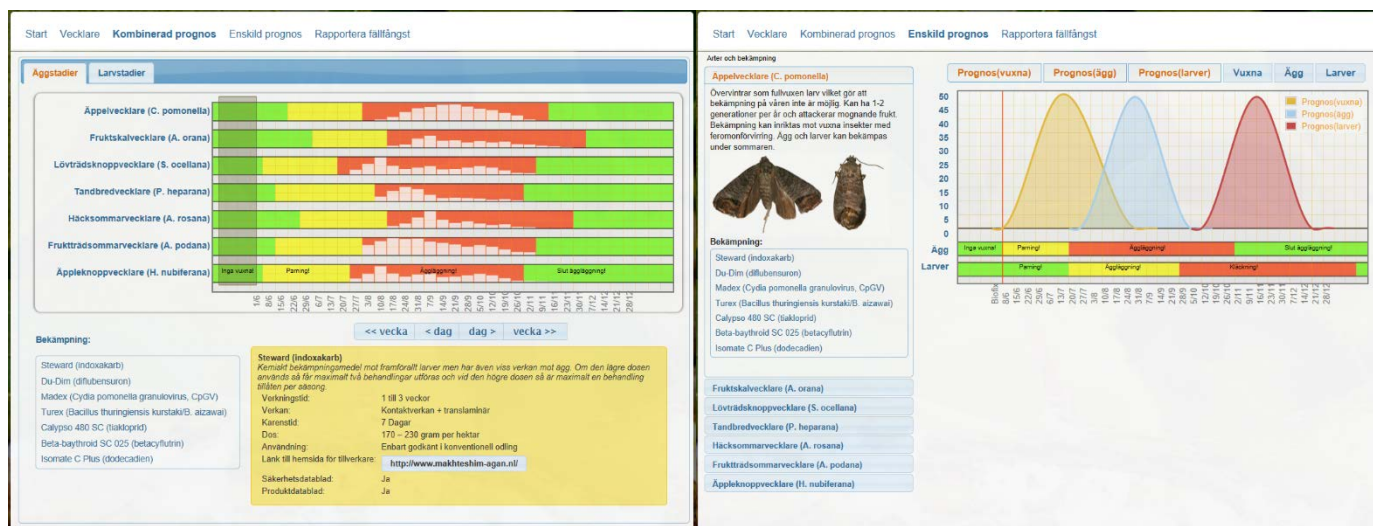


Figure 6: Multispecies and single-species views of the Tortricidae portal.

Vecklarportalen kombinerar simuleringar gällande skadeinsekternas årliga utveckling med information rörande de bekämpningsmedel som finns tillgängliga för de arter som har observerats i en viss odling ett visst år. I den vy som parallellt visar den simulerade årscykel för samtliga observerade arter i en viss odling (vänster i figur 6) görs

rekommendationer gällande hur bekämpningsmedel kan kombineras för att vid samma bekämpningstillfälle nå så många arter som möjligt. Eftersom simuleringarna blir allt mer precisa när tidpunkten för första flykt (FAE) närmar sig, så ändrar vyn färg från grönt så länge kalenderdagen för FAE är osäker, via gult när FAE närmar sig, till rött när prediktionen av FAE kan anses vara tillräckligt säker. Den longitudinella förändringen av utvecklingsfaser inom arter möjliggör dessutom en distinktion mellan bekämpningsmedel avsedda för ägg- respektive larv-fas (höger i figur 6).

3. Slutsatser och rekommendationer

I föreliggande studie dras slutsatsen att det är fullt möjligt att bygga ett beslutsstödsystem som baserar en simulering av skadeinsekters årscykel på inströmmade omvärldsdata. I identifieringen av de nödvändiga simuleringsalgoritmerna kan dessutom grundläggande kunskaper om vilka omvärldsvariabler som reglerar populationerna ifråga vinnas.

Den fältverksamhet som ligger till grund för föreliggande studie har fortsatt ytterligare fyra eller fem år, och generat data som ännu inte har beaktats. Detta arbete utförs av Tasin & Swiergiel m.fl. på SLU Alnarp, och genom fortgående samarbete med SLU ET har kompatibiliteten mellan de två dataseten säkrats. Vi rekommenderar att dessa två dataset kombineras i en förnyad analys av hur omvärldsvariabler reglerar skadepopulationerna i svensk äppelodling.

Ett webbaserat beslutsstöd för integrerad skadebekämpning är mera aktuellt än någonsin. En enkel avslutande rekommendation för intressenterna blir därför att avsätta den budget som krävs för att etablera beslutsstödsystemet så som avsågs i den ansökan som ligger till grund för föreliggande studie. En kortfattad organisatorisk strategi för detta ges i texten ovan.

4. Resultatförmedling och litteraturhänvisningar

Resultaten av föreliggande studie har presenterats för intressenter vid en rad möten där Vecklarportalen har specificerats i aktivt samarbete med mötesdeltagarna (agil systemutveckling). Mötena har ägt rum på SLU Alnarp och på Äppelriket i Kivik under perioden 2013 – 2016, och beskrivs i Bryntse et al., 2014.

Direkta resultat av studien har publicerats enligt följande lista:

Sjöberg P., Swiergiel W., Neupane D., Lennartsson E., Thierfelder T., Tasin M., Rämert B., 2014: Evaluation of temperature sum models and timing of *Quassia amara* (Simaroubaceae) wood-chip extract to control apple sawfly (*Hoplocampa testudinea* Klug) in Sweden. – *Journal of Pest Science*, DOI 10.1007/s10340-014-0616-0.

Sjöberg P., Rämert B., Thierfelder T., Hillbur Y., 2015: Ban of a broad-spectrum insecticide in apple orchards: effects on tortricid populations, management strategies, and fruit damage. – *Journal of Pest Science*, DOI 10.1007/s10340-015-0648-0.

Thierfelder T., Sjöberg P., Hillbur, Y., 2014: The life-cycle phenology of seven Tortricidae species. A study across eleven south-Swedish apple orchards. – *J. of Applied Ecology*. Submitted.

Bryntse S., Sjöberg P., Thierfelder T., 2014: Design criteria concerning a web-based decision support system for pest control in Swedish apple orchards. – *J. of Environmental Informatics*. In progress.