

Insekters attraktion till färger och hinderbelysning på vindkraftverk

JONAS VICTORSSON, OLLE HÅSTAD, ANDERS ÖDEEN

RAPPORT 6847 • FEBRUARI 2020



Insekters attraktion till färger och hinderbelysning på vindkraftverk

Slutrapport

av Jonas Victorsson, Olle Håstad, Anders Ödeen

NATURVÅRDSVERKET

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-6847-9

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2020

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2020

Omslagsfoto: Jonas Victorsson



Förord

Forskningsprogrammet Vindval är ett samarbete mellan Energimyndigheten och Naturvårdsverket med uppgiften att ta fram och förmedla vetenskapligt baserade fakta om vindkraftens effekter på människa, natur och miljö.

Programmets tre första etapper 2005–2018 omfattade ca 50 forskningsprojekt och fyra syntesrapporter, varav en har uppdaterats. I syntesrapporterna sammanställer och bedömer experter de samlade forskningsresultaten och erfarenheterna av vindkraftens effekter nationellt samt internationellt inom fyra områden: Människors intressen, fåglar och fladdermöss, marint liv och däggdjur på land.

Resultaten från Vindvals forskning har bidragit till underlag för miljökonsekvensbeskrivningar samt planerings- och tillståndsprocesser i samband med etablering av vindkraftsanläggningar. I Vindvals tredje etapp har även ingått att förmedla erfarenheter och ny kunskap från parker som är i drift. Resultat från programmet ska också komma till användning i tillsyn och kontrollprogram samt myndigheters vägledning.

Vindvals fjärde etapp pågår till den 31 december 2021 med fokus på planering och de avvägningar mellan miljö och socio-ekonomiska intressen som måste göras. Programmet ska utveckla metoder och verktyg för att göra sådana avvägningar.

Liksom tidigare ställer Vindval höga krav vid vetenskaplig granskning av forskningsansökningar och forskningsresultat, samt vid beslut om att godkänna rapporter och publicering av projektens resultat. I arbetet med denna rapport har deltagit: Olle Håstad, Jonas Victorsson och Anders Ödeen*, samtliga verksamma vid SLU vid tiden för projektets genomförande.

Författarna svarar för slutsatser och rekommendationer.

Vindval i januari 2020

*Anders Ödeen avled 2016.

Innehåll

| | | |
|---------------|---------------------------------------------------|----|
| FÖRORD | | 3 |
| 1 | SAMMANFATTNING | 6 |
| 2 | SUMMARY | 8 |
| 3 | BAKGRUND | 10 |
| 4 | MATERIAL OCH METODER | 13 |
| 4.1 | Försöken i fält | 13 |
| 4.2 | Färgförsöket nattetid | 17 |
| 4.3 | Blinkfrekvensförsöken | 20 |
| 4.4 | Färgförsöket dagtid | 21 |
| 4.5 | Analys | 24 |
| 5 | RESULTAT | 25 |
| 5.1 | Färgförsöket nattetid | 25 |
| 5.2 | Blinkfrekvensförsöket 2016 | 28 |
| 5.3 | Blinkfrekvensförsöket 2017 | 32 |
| 5.4 | Färgförsöket dagtid | 33 |
| 6 | DISKUSSION | 36 |
| 6.1 | Färgförsöken nattetid | 36 |
| 6.2 | Blinkförsöken | 37 |
| 6.3 | Färgförsöket dagtid | 40 |
| 6.4 | Experimentets relevans för verkliga vindkraftverk | 42 |
| 7 | RESULTATREDOVISNING | 44 |
| 8 | TACK | 45 |
| 9 | KÄLLFÖRTECKNING | 46 |
| 10 | APPENDIX | 48 |

1 Sammanfattning

Det är antagligen flera faktorer som bestämmer hur mycket insekter som finns tillgängliga för fladdermöss och fåglar vid vindkraftverk. I detta projekt testade vi om anlockningen av insekter påverkas av blinkfrekvensen eller färgsammansättningen hos vindkraftverkens hinderbelysningsljus eller av kraftverkens färg. Vi genomförde fyra försöksserier av insekters anlockning till nuvarande och alternativa blinkregimer och färger i en dubbelsidig försöksanordning på marknivå. Principen för försöksanordningen är att insekterna flyger mot den belysta eller färgade ytan om de upplever ytan som attraktiv. Insekter som kommer nära den belysta/färgade ytan samlas upp med en sugfälla. Den dubbelsidiga designen gör att vi provtar samma lokala insektsfauna och kontrollerar för väderförhållanden och andra miljöfaktorer.

Resultaten från blinkförsöken visade att anlockningen av Diptera (tvåvingar, främst myggor) minskade om lampan var tänd kortare tid per minut än den nuvarande blinkregim som används vid hinderbelysning (40 blinkningar per minut med en duty cycle på 0.5). Vid 10 blinkningar per minut och en duty cycle på 0.03, vilket var den lägsta vi testade, så minskade anlockningen av insekter med 30 %. Resultatet varierade mellan olika insektsfamiljer och för Chironomidae (fjädermyggor) minskade anlockningen med hela 56 %. Blinkningens längd i den behandlingen är dock endast 0.2 s vilket knappast är förenligt med god flygsäkerhet. Detta resultat visar dock tydligt att det går att minska insektsanlockningen genom att ändra blinkregimen.

Vi fann även att mindre förändringar av blinkregimen som bör kunna accepteras som tillräckligt säkra för luftfarten gav lägre anlockning av insekter. När vi minskade lampans duty cycle från 0.5 till 0.3 eller 0.1 men behöll 40 blinkningar per minut minskade antalet myggor som lockas till belysningen med mellan 6 % och 18 %. Att sänka antalet blinkningar till 20 per minut men behålla en duty cycle på 0.5 sänkte också anlockningen av myggor men endast med 6 %. Anlockningen av nattflygande fjärilar sänktes endast i två av våra tio testade blinkregimer. Antalet infångade fjärilar var dock få jämfört med antalet myggor (91 % av insekterna var myggor och endast 7 % var fjärilar). Om det är värt att förändra nuvarande blinkregim för att uppnå minskningar i anlockningen av insekter i storleksordningen 6 % till 18 % beror bland annat på om den minskningen kommer att leda till lägre fladdermusdödighet. Att ta reda på detta kräver ytterligare studier.

I ett ytterligare försök nattetid så testade vi anlockningen till LED-lampor som var framtagna för att så nära som möjligt motsvara en vit färg för människor medan de skulle vara så "osynlig" som möjligt för insekterna. Med "osynlig" menas att topparna i lampans färgspektrum, skulle så nära som möjligt, ligga i de "dalar" som insekter har i sitt färgseende. Denna belysning skulle då kunna ersätta dagens hinderbelysning. Den ena färgen, gulblå, bestod av en blandning av gula och blå LED-lampor. Den andra färgen, blågrön bestod av en blandning av blå och gröna LED-lampor.

Våra två testade LED-lampor fungerade inte alls som planerat. Tvärtom lockade båda lamporna till sig flera djur än kontrollen när vi analyserade hela insektsmaterialet tillsammans. Stövsländorna var den enda grupp som reagerade som förväntat och hos den ordningen så lockade den blågröna, lampan till sig 42 % färre djur än kontrollen. I analysen av de enskilda insektsfamiljerna så var det ingen skillnad på blågrön och kontrollen för nio av de tretton testade familjerna vilket i sig är intressant eftersom insekterna i dessa familjer då inte ser någon skillnad på vanligt vitt ljus och det vita ljus vi skapat med blåa och gröna LED-lampor. Vi avser att gå vidare i vår analys genom att beräkna det antal fotoner som respektive insektsgrupp uppfattade utifrån deras spektrala känsligheter, i de fall där dessa är kända. Vi hoppas med detta bättre förstå vilka ljusparametrar som avgör attraktionskraften för insekterna, men ur ett praktiskt perspektiv kan vi dra slutsatsen att den nuvarande ljussammansättningen är bra, och inte på ett enkelt sätt kan ändras för att radikalt minska antalet insekter.

Vi genomförde också ett försök med anlockning till färger dagtid. Här testade vi dels färger som används idag och dels färger som skulle kunna ersätta dagens färger. Vi fann att den gula färg som används på vindkraftverk till havs lockar till sig flera insekter än den vita färg som är vanligast på vindkraftverk på land. Vi testade en orange färg som skulle kunna vara ett alternativ till den gula färgen men fann att den var lika dålig som den gula. Vi testade en grå färg som är tillåten idag och fann att den var något sämre än den vita färgen, den ökade anlockningen av myggor och flugor med 4 %. En ljus grön färg lockade till sig färre insekter än den vita färg som används idag men minskningen var liten (4 %). Lila har i en tidigare studie förts fram som ett alternativ som lockar till sig få insekter. Våra resultat motsäger detta och den lila färg vi testade ökade istället anlockningen av steklar. Den färg som minskade insektsanlockningen mest var rosa (12 % färre myggor och flugor). Detta resultat visar att det går att minska anlockningen genom att välja en lämplig färg. Att måla nederdelen av vindkraftverk rosa eller ljusgrönt skulle dock påverka synligheten för människor och är inte en lämplig åtgärd i alla miljöer. I miljöer där man har skog nära inpå kraftverken så skulle dock synligheten öka bara marginellt om man målar kraftverken upp till trädtopphöjd.

2 Summary

A possible way to mitigate bat mortality at wind turbines would be to reduce insect attraction to the turbines. In this project we tested if insect attraction is affected by wind turbine colouration or by aviation obstruction lights. We collected insects attracted to colours or experimental LED-lamps in a bi-directional experimental contraption where insects were caught by a suction trap when they approached coloured panels or LED-lamps. In each contraption we could test an experimental treatment against a control treatment with current wind turbine colour or aviation obstruction light regime.

The results from our night-time flash frequency experiment showed that the attraction of insects could be reduced by using other flash frequencies than the one currently used (40 flashes per minute with a duty cycle of 0.5). A flash frequency of 10 flashes per minute and a duty cycle of 0.03, which was the lowest duty cycle tested, reduced insect attraction by 30%. The effect, however, differed between different insect orders and families and for dipteran chironomids there was a reduction of 54%. The length of the light pulse in that treatment was however only 0.2 s. Such a short light pulse is most likely not acceptable due to aviation safety concerns. However, we also found that flash frequency regimes that are more acceptable regarding aviation safety also reduced insect attraction, at least for Diptera. When we lowered the duty cycle from 0.5 to 0.3 or 0.1 but retained 40 flashes/minute there was a reduction in Diptera attraction of between 8% and 18%. Lowering the number of flashes per minute to 20 and retaining a duty cycle of 0.5 also reduced Diptera attraction, but only by 6%. Overall, the Diptera attraction was reduced in eight out of our ten experimental treatments where we used a lowered flash frequency and/or duty cycle. The attraction of Lepidoptera, however, was reduced in only two of our ten treatments. We caught much fewer Lepidoptera (7% of all insects) than Diptera (91%) and that could affect our results.

We conclude that there are alternative flash frequency regimes that could lower insect attraction compared to the regime currently used. Whether it is justifiable to adjust the current flash frequency regime in order to reduce insect attraction by between 6% or 18% depends to a large degree on whether such a reduction would lower bat mortality. This is a question that requires further study.

In another night-time experiment we tested whether custom made LED-lamps could reduce insect attraction compared to the white aviation obstruction lights currently used. We took advantage of the differences in colour perception between humans and insects to create LED-lamps that would stimulate the insect visual system minimally but that would stimulate a human visual system in the same way as the currently used white aviation obstruction lights. We developed two lamps that to a human observer look white but that consisted of either a combination of yellow and blue LEDs (YB) or a combination of blue and green LEDs (BG).

Our custom made LED-lamps had the opposite effect of what we predicted. Both lamps attracted significantly more insects than the white control. The only insect group that reacted according to our predictions was Psocoptera where attraction was reduced by 42% to the BG treatment. In the analyses of individual insect families there was no difference between the BG treatment and the control for nine of the thirteen tested families. This indicates that that treatment is similar to white light for at least some insect groups. We hope that further analysis of these results (using quantum catch models) will increase our understanding of insect attraction to lights with different spectral composition. From a practical standpoint, however, we conclude that the white light from the current aviation obstruction lights is satisfactory and there are no obvious ways to reduce insect attraction by changing spectral composition along the lines that we have tested.

We also conducted a day-time experiment of insect attraction to alternative wind turbine colour schemes. We compared these colours to the white colour that is most common today. We found that the yellow colour that is used today on wind power installations at sea, to make sure that they are visible to ships, attracted more insects than the white colour. We tested an orange colour that could be an alternative to yellow but this colour was equally bad. A light grey colour, that is allowed to day, attracted 4% more flies and midges than the white colour. Therefore it is better to use white than grey but the difference is small. Violet has previously been mentioned as an alternative colour with low insect attraction but our results do not support that claim. A green beige colour reduced insect attraction but only by 4%. The largest reduction in insect attraction was found for pink which reduced attraction with 12%. A possible use for green beige or pink would be to paint the lower part of the wind power plant in one of these colour to reduce insect attraction at ground level. However, care must be taken not to affect visibility to humans in a negative way.

3 Bakgrund

Det är oklart vad som lockar fladdermöss till vindkraftverk men eftersom fladdermöss ansamlas och jagar vid platser där insekter koncentreras så är det rimligt att tro att fladdermössen söker upp vindkraftverk för att jaga insekter där. Det finns också observationer som ger stöd för detta (Ahlén 2003, Ahlén, m.fl. 2007, de Jong, m.fl. 2019, Horn, m.fl. 2008, Kunz, m.fl. 2007, Rydell, m.fl. 2010). Det är antagligen flera faktorer som bestämmer hur mycket insekter som finns tillgängliga för fladdermöss och fåglar vid vindkraftverk. Vi vet att det förekommer så många insekter vid vindkraftverk så det faktiskt kan bli ett problem att insekter som fastnar på rotorbladen sänker verkens kraftproduktion (Corten & Veldkamp 2001). Man kan tänka sig att insekterna lockas till kraftverket på grund av att verket är en hög struktur i landskapet. Flera insektsgrupper svärmar kring den typen av strukturer (till exempel tvåvingar, se Downes 1969) och det är möjligt att vindkraftverk utnyttjas på det sättet. Verket blir varmare än den omgivande luften vid vissa förhållanden och även detta skulle kunna attrahera insekter. Här testar vi om anlockningen av insekter påverkas av blinkfrekvensen hos verkets hinderbelysningsljus, färgen på detta eller av kraftverkens färg. Färgsättningen av dagens vindkraftverk varierar men den är generellt sett mycket ljus. De vita, gråvita och gula färgerna som är vanliga idag drog till sig mer insekter än mörkare färger i en tidigare studie (Long, m.fl. 2011).

Färgsättningen av vindkraftverken bör kunna påverka anlockning av insekter under den tid som fladdermöss är aktiva. Under nordiska förhållanden jagar fladdermöss inte bara nattetid utan även under skymning och gryning. Detta innebär cirka fyra timmar per dygn som kraftverken bör vara synliga för de insekter som bara kan särskilja färger under dagsljusförhållanden. Många nattaktiva insekter kan även urskilja färger i mörker (Warrant 2017) vilket gör att verkets färgsättning påverkar sådana arter hela dygnet. Eventuell anlockning till vit hinderbelysning sker under hela den delen av dygnet då fladdermössen är aktiva.

Idag ska verk med en totalhöjd över 150 meter förses med högintensivt vitt ljus som blinkar 40-60 gånger per minut enligt Transportstyrelsens föreskrifter (Anonymous 2010). Sådan hinderbelysning kan vara problematisk då det är välkänt att vita lampor som exempelvis gatlyktor drar till sig stora mängder insekter och leder till hög aktivitet hos fladdermöss (Blake, m.fl. 1994, Rydell 1992). Belysningens attraktionskraft verkar vara särskilt stor hos vissa fladdermusgrupper. Till exempel hos nordfladdermus *Eptesicus nilssonii* är födointaget under belysning mycket högre än på andra platser (Rydell 1992). Att insekter lockas till lampor nattetid är välkänt och har länge utnyttjats av entomologer för att samla bland annat fjärilar och myggor. Hur den blinkfrekvens som används som hinderbelysning idag påverkar insekter är okänt men blinkande belysning kan ha stora ekologiska effekter (Barroso, m.fl. 2017, Inger, m.fl. 2014).

Det finns två teorier om varför insekter dras till lampor (Cardé 2003) – ett beteende som kallas positiv fototaxis. Första förklaringen (menotaxis),

går ut på att insekter använder månen för att orientera sig nattetid. Genom att hålla en konstant vinkel till månen så håller insekten en rak kurs eftersom månen är så långt borta. Detta fungerar inte när ljuskällan är en lampa på mycket närmare avstånd och insekten kommer då att närma sig lampan istället. Andra förklaringen (telotaxis), går ut på att insekter flyger rakt mot ljuskällan. I insekternas naturliga miljö kan ett ljust område nattetid indikera att där finns en öppning i vegetationen. Genom att flyga mot det ljusa området kan insekten då ta sig fram genom vegetationen.

Det finns en tydlig trend i spektral känslighet hos insekternas fotoreceptorer (sammanställning av Briscoe & Chittka 2001). En triad av fotoreceptorer med maximal känslighet runt 340 nm (UV), 450 nm (blå) och 540 nm (grön) (som hos honungsbiet *Apis mellifera*) är det vanligaste arrangemanget bland insekter (Briscoe & Chittka 2001). Hos några arter bland ordningarna trollsländor, steklar, skalbaggar och fjärilar finns en extra fotoreceptor maximalt känslig för ca 565 nm (rött).

Den stora och jämna spridningen mellan känslighetsmaxima hos insekternas fotoreceptorer gör att det finns djupa dalar i känslighet mellan dessa toppar. Det bör således vara möjligt att minimera den upplevda ljusstyrkan i en lampa eller reflektionen från en yta genom att selektivt emittera eller reflektera ljus där insekters fotoreceptorer är minimalt känsliga, alltså i dalarna mellan känslighetstopparna på 350, 440 och 530 nm samt på långvågssidan av grönt-receptorernas känslighetsfunktion (för rödkänsliga arter i dalen mellan 530 nm och 565 nm). Därmed bör den fototaxiska effekt som attraherar insekter reduceras. Samtidigt bör människor uppleva relativt hög ljusstyrka när de betraktar samma färg eftersom reflektionen eller emissionen är god i de delar av spektrum där våra fotoreceptorer är som känsligast. Mänskliga fotoreceptorers känslighetsfunktioner är annorlunda fördelade över spektrum, med de tre tapparnas maxima vid 420 (blått), 534 (grönt) respektive 564 nm (rött) och stavarnas vid 498 nm. Dessutom har människor ett för djurvärlden närmast unikt stort överlapp mellan de grönkänsliga och rödkänsliga tapparnas spektrala känslighetsfunktioner, vilket gör att människoögat inte har någon nämnvärd dal i känslighet mellan 534 och 564 nm.

Studier visar att skilda lamptyper liksom skilda färgsättningar drar till sig insekter i olika hög grad (t.ex. van Grunsven, m.fl. 2014). Det finns också skillnader i vilka delar av insektsfaunan som dras till olika slags ljus (tyvärr bestämde Long m.fl. 2011 inte insekternas arttillhörighet). Detta ligger i linje med vad man kan förvänta sig eftersom det finns skillnader i spektral känslighet mellan insektsarter (Briscoe & Chittka 2001, Somers-Yeates, m.fl. 2013). Till exempel har ordningarna nattsländor och fjärilar visat sig dras till skilda ljusstyper fastän de anses vara nära släkt (Ishiwata, m.fl. 2011). Detta visar hur bristen på kunskap om vissa insektordningars färgseende gör det svårt att i dagsläget förutsäga attraktionskraften hos olika belysningssystem (van Grunsven, m.fl. 2014). Empiriska försök är därmed nödvändiga för att förstå hur färgsättning och hinderbelysnings attraktionskraft på de insekter som har

störst betydelse för kollisionssproblematiken hos fåglar och fladdermöss ska kunna minimeras.

Syftet med studien var att undersöka hur kraftverkens färgsättning och hinderbelysning påverkar anlockningen av insekter. I ett försök på låg höjd (cirka två meter) testade vi hur olika färgsättningar och hinderbelysningar påverkar anlockningen. I försöksanordningarna testade vi andra färger och blinkfrekvenser mot den färg och blinkfrekvens som används idag. Vi hade tre mål: (1) att ta fram alternativ färgsättning för vindkraftverk som har minimal attraktionskraft på insekter men som ändå är ljus och väl synlig för människor; (2) att ta fram alternativ till nuvarande vita hinderbelysning som attraherar färre insekter och därmed färre fladdermöss men som är ljus och tydlig för människor; (3) att ta fram en blinkfrekvens som lockar till sig färre insekter än den nuvarande frekvensen som är 40-60 blinkningar per minut med en duty cycle på 0.5 (vilket innebär att lampan är tänd halva tiden).

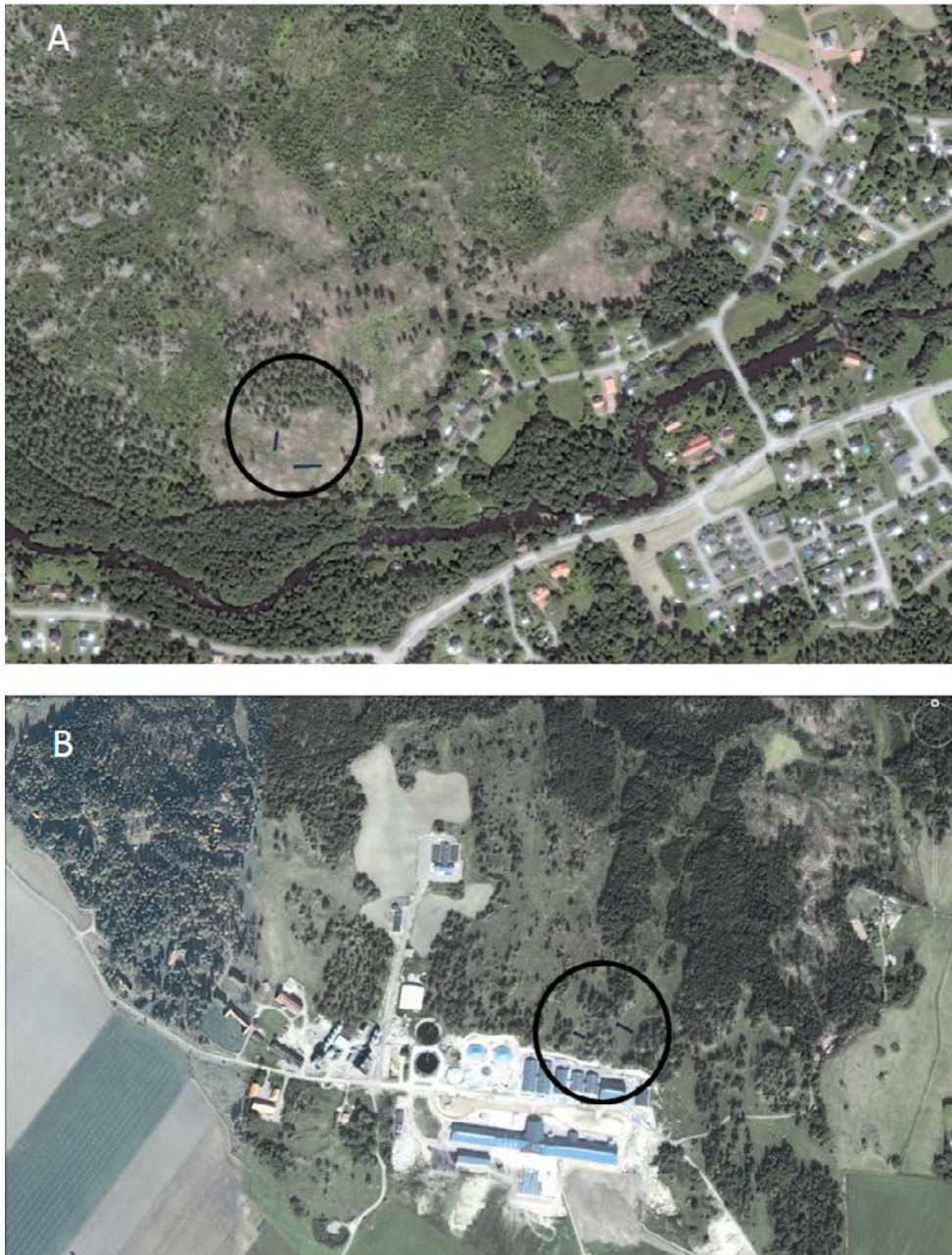
4 Material och metoder

4.1 Försöken i fält

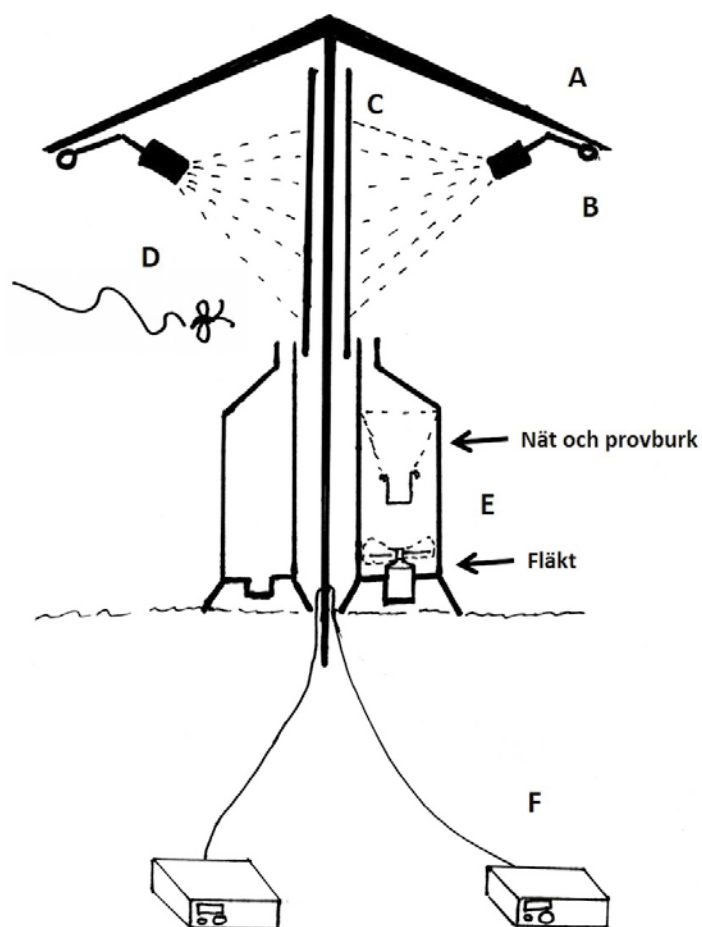
Försöken genomfördes på två platser. År 2016 genomfördes försöket på ett 4 fyra år gammalt kalhygge nära orten Fliseryd i Småland mellan 13 juli och 23 augusti. År 2017 genomfördes försöket i betesmark i anslutning till SLU:s försöksstation Lövsta, Uppland mellan 8 juli och 5 september (Fig. 1). Båda åren användes två försöksanordningar placerade med ca 100 m avstånd mellan varandra.

Experimenten gjordes i en parad design där den testade färgen/blinkfrekvensen jämförs med en kontroll med den färg/blinkfrekvens som nu är standard på vindkraftverk (Fig. 2 och 3). I försöksanordningen fångas flygande insekter som kommer nära färgpanelen eller lampan som testas. Insekterna behöver komma inom ca 0.5 m från färgpanelen/lampan för att fångas upp av sugfällan. Varje försöksstation fångar insekter från två håll: åt ena hållet behandlingen och åt andra hållet kontrollbehandlingen. Den parade designen gör att vi provtar samma lokala insektsfauna och kontrollerar för väderförhållanden och andra miljöfaktorer. Vi var noga med att ha samma vegetationstyp i båda anflygningsriktningarna. I försöket i Småland så var terrängen i båda riktningarna kalhygge med gräs, ormbunkar och begynnande björksly i 100 m åt varje håll. (Fig. 4). I försöket i Uppland var marken betesmark utan buskar ca 75 m åt varje håll. Resultatet från en försöksanordning (experimentell behandling samt kontroll) under en natt är ett replikat i analyserna och antalet replikat för varje behandling var mellan fem och åtta – det vill säga varje behandling testades mellan fem och åtta nätter (dagar för färgförsöket dagtid). Behandlingar och kontrollbehandlingar roterades under fältsäsongen mellan de fyra positionerna (två positioner per försöksanordning) så att alla behandlingar så långt som det var möjligt testades lika många gånger i varje position under försöksperioden.

Vi genomförde fyra experiment:(1) färgförsöket nattetid 2016 med tre behandlingar; (2) blinkfrekvensförsöket 2016 med fyra behandlingar; (3) blinkfrekvensförsöket 2017 med sju behandlingar; och (4) färgförsöket dagtid 2016 med åtta behandlingar. Under försöken nattetid var fällorna aktiva mellan 22:00 och 04:00. Under dagförsöket var fällorna aktiva från 10:00 till 16:00.



Figur 1. Satellitbilder över försökslokalerna. A) Fliseryd, Småland där försöket genomfördes 2016. B) Lövsta, Uppland där försöket genomfördes 2017. Försöksområdet är markerat med en cirkel. I varje cirkel markerar mörkblå streck anflygningsriktningarna på de två fällorna. Varje försöksstation var placerad i mitten på strecket.



Figur 2. Figuren visar en försöksanordning där man samtidigt kan testa insektsattraktion till en försöksfärg och en kontrollfärg. Alternativt kan man testa anlockning till simulerad hinderbelysning. Konfigurationen som visas här är för färgförsöket nattetid. Hela anordningen är 2 m hög. A) Tak för att skydda utrustningen. B) LED-lampa som belyser skärmen i färgförsöket. C) Skärm där "färgen" projiceras. D) Flygande insekt på väg mot den belysta skärmen. E) Sugfälla som samlar in insekter som lockas till skärmen. Indikerat är fläkten i botten på fällan som suger in luft samt nät och provburk där insekterna samlas upp. F) Signalgenerator där ljuset kan pulsmoduleras. Kring den belysta skärmen finns en avskärmning (utelämnad i figuren) som gör att insekter kommer inom räckhåll för sugfällan endast då de flyger an mot fällan, inte om de närmar sig fällan från sidan.



Figur 3. En försöksanordning under försöket i Småland 2016. A) försöksanordningen från sidan. B) Försöksanordningen med vit färgpanel (RAL 9003) som anlockning. Under färgpanelen syns sugfällan. Avskärmningen som gör att insekter kommer inom räckhåll för sugfällan endast då de flyger an mot fällan syns i figurerna A och B. C) Serviceluckan i fällan öppnad så man ser fläkten i botten på fällan samt uppsamlingsburken för insekterna. D) Signalgeneratorerna i sin vattentäta låda.



Figur 4. En försöksanordning på kalhygget där försöket genomfördes 2016. Marktäcket i båda anflygningsriktningarna bestod av kalhygge med gräs, ormbunkar och begynnande björksly.

4.2 Färgförsöket nattetid

I färgförsöket nattetid testade vi tre färger med LED-lampor av egen tillverkning (Fig. 5). Två av färgerna var beräknade för att så nära som möjligt motsvara en vit färg för människor medan den skulle vara så ”osynlig” som möjligt för insekterna. Med ”osynlig” menas att topparna i lampans färgspektrum, skulle så nära som möjligt, ligga i de ”dalar” som insekter har i sitt färgseende. Vi utgick här från publicerade data på honungsbiet (ordningen steklar, Hymenoptera). Den ena färgen, gulblå, bestod av en blandning av gula och blå LED-lampor. Den andra färgen, blågrön, bestod av en blandning av blå och gröna LED-lampor. Färgen projicerades på en frigolitskiva i fällan eftersom frigolit i tidigare mätningar visat sig vara en mycket effektiv diffus reflektor för hela det relevanta våglängdsområdet. I praktiken innebär detta att det reflekterade ljuset från LED-lamporna blandas så att den spektrala sammansättningen för en observatör av ljusfläcken på frigoliten blir densamma oberoende av betraktningvinkeln.

I färgförsöket nattetid hade vi även en behandling med UV och vitt ljus (UV+vitt). Vi förväntade oss att den behandlingen skulle locka till sig fler individer än kontrollen eftersom det är väl känt att UV attraherar många insektsgrupper, särskilt fjärilar. Eftersom responsen på våra två andra färger var okända så var det bra att ha en behandling där vi på förhand vet hur resultatet skulle bli.

Vi räknade i Matlab fram optimala LED-kombinationer för att minimera synligheten för insekter, utifrån honungsbiets synsystem, med begränsningen att det totala ljuset skulle vara vitt, d.v.s. befinna sig inom ett definierat område omkring positionen [0.3127; 0.3290] i CIE färgrummet. Koden som användes finns tillgänglig från gitlab (https://gitlab.com/olleh/insect_led, tag: production).

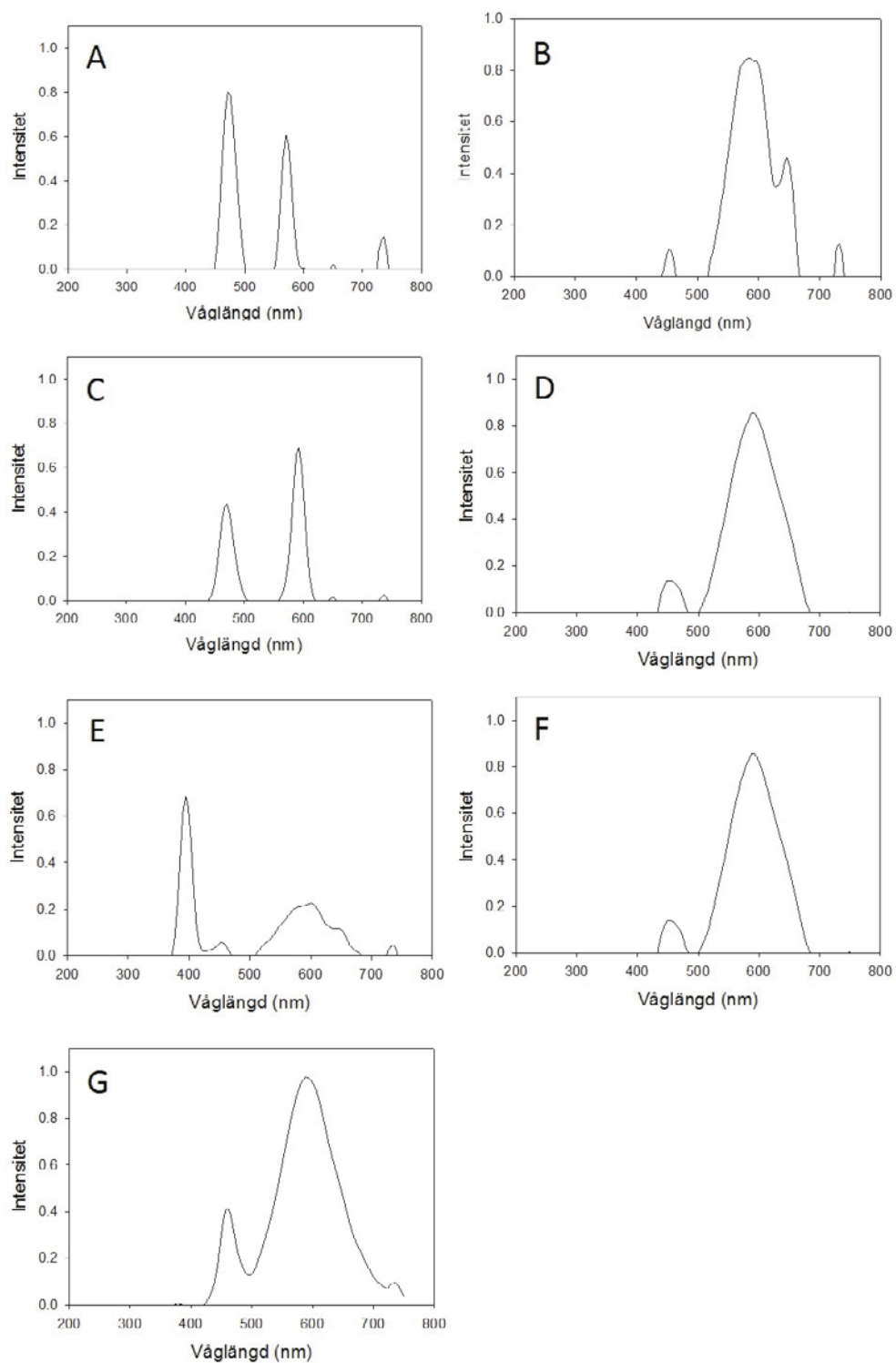
Skillnaden i total spektral känslighet mellan människans och biets färgkänslighet beräknades först, varefter en LED-lampa placerades i den del av spektrum där människan har det största känslighetsövertaget. För att göra ljuset vitt valde vi därefter LED-lampans komplementfärg genom att identifiera den våglängd som befinner sig på motsatt sida av vitpunkten i CIE-färgrymden. Avståndet till vitpunkten från de respektive ideala lamporna stod då i relation till den ljusstyrka från respektive lampa som skulle krävas för att skapa ett ljus som uppfattas som vitt. Baserat på dessa beräkningar valde vi kommersiellt tillgängliga lampor vilka i möjligaste mån motsvarade den beräknade specifikationen. Antalet lampor i den tillverkade lampan justerades, baserat på mätningar av det faktiska ljuset, till att falla inom det definierade vitområdet. Ljusets sammansättning för de olika lamporna presenteras i figur 6.

Vi anpassade antalet LED-lampor för att få samma ljusstyrka mätt i Candela (Cd) i behandlingen och kontrollen. För den blågröna lampan låg ljusstyrkan på 4.6 Cd och motsvarande vita kontroll hade 4.3 Cd. För den gulblåa lampan, lampan med UV och vitt ljus samt för vita kontrollen för dessa låg ljusstyrkan på 30 Cd. Samtliga mätningar är på det reflekterade ljuset från frigolitskivan.

Antalet replikat var sju för UV+vitt, sju för blågrön, samt nio för gulblå.



Figur 5. I försöken användes LED-lampor av egen tillverkning. (A) Tillverkning av LED-lampor. (B) Färdig lampa. (C) Lampa innesluten i plastlåda som skydd mot väder och vind. Lådan till höger innehåller en Arduino dator som användes i blinkförsöket 2017 för att ge oss bättre kontroll över blinkfrekvenserna än vad man får med signalgeneratorerna.



Figur 6. Spektral sammansättning av ljuset från lamporna som användes i försöken. A) Blågrön. B) Vit kontroll till blågrön. C) Gulblå. D) Vit kontroll till gulblå. E) UV+vit. F) Vit kontroll till UV+vit. G) Den vita lampan som användes i blinkförsöken.

4.3 Blinkfrekvensförsöken

I blinkfrekvensförsöken testades blinkande vita LED-lampor (Fig. 5C) med annan blinkfrekvens och/eller duty cycle än den nuvarande hinderbelysningen. Termen duty cycle beskriver hur stor del av en hel blinkcykel som lampan är tänd. Med en duty cycle på 0.5 så är lampan tänd halva tiden och med en duty cycle på 0.33 så är lampan tänd en tredjedel av tiden. Som kontrollbehandling använde vi i blinkförsöken 40 blinkningar per minut med en duty cycle på 0.5. Detta betyder att lampan är tänd halva tiden under de 1.5 sekunder som varje blinkning tar. Nuvarande bestämmelser tillåter 40 - 60 blinkningar per minut och vi valde 40 blinkningar per minut eftersom det används på verken i den vindkraftspark i Småland där vi tillsammans med Johnny de Jong genomförde ett annat projekt inom Vindval (rapport 6902, 2019).

År 2016 inriktade vi oss på att undersöka om ändrad blinkfrekvens överhuvudtaget kan påverka insektsattraktionen (konceptvalidering). Vi hade därför två behandlingar med den kortaste duty cycle som utrustningen tillät. Det året hade vi även en behandling där lampan var tänd hela tiden (konstant). Vi förväntade oss att den behandlingen skulle locka till sig fler individer än kontrollen.

År 2016 reglerade vi blinkfrekvens och duty cycle med funktionsgeneratorer (GW INSTEK GFG-8020H) vilket visade sig begränsa vilka behandlingar vi kunde använda. År 2017 använde vi istället egentillverkade styrenheter baserade på datorplattformen Arduino. Dessa styrenheter levererar den blinkfrekvens och duty cycle man programmerar in i en dator och sedan överför till Arduinoenheten.

År 2017 utökade vi antalet behandlingar och inriktade oss på att ta fram blinkfrekvenser som faktiskt kan användas som hinderbelysning genom att bland annat testa blinkfrekvenser som ligger ganska nära den som används idag. År 2017 testade vi behandlingar där lampan var tänd sammanlagt 6 s/min, 18 s/min, eller 30 s/min, och för varje tid hade vi två behandlingar med olika antal blinkningar per minut vilket ger två olika längder på blinkningen (Tabell 1). För t ex behandlingarna med 6 s/min så har vi då en längd på blinkningen på 0.15 s för 40 blinkningar/min (behandlingen 40b/0.1D) och en på 0.60 för 10 blinkningar/min (10b/0.1D).

Båda åren planerade vi att ha en behandling med 10 blinkningar/minut och en duty cycle på 0.5. Detta hade vi år 2017 (10b/0.5D i Tabell 1) men år 2016 blev det en duty cycle på 0.45 (10b/0.45D i Tabell 1) p.g.a. begränsningar i funktionsgeneratorn.

I detta försök använde vi identiska lampor i behandlingarna och i kontrollen. Varje lampa var sammansatta av sammanlagt 12 vita LEDar (Fig. 5C).

Tabell 1. Behandlingarna i blinkfrekvensförsöken 2016 och 2017. Behandlingarna är rangordnade först efter hur lång tid som lampan är tänd varje minut för respektive behandling därefter efter hur lång blinkningen är. Koden för varje behandling innehåller antalet blinkningar (b) och duty cycle (D).

| Blinkningar/ minut | Blinkperiodens längd (s) | Duty cycle | Blinkningens längd och mörk- rets längd (s) | Tid som lampan är tänd/ minut (s) | Behandling 2016 | År (antal replikat) |
|-----------------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------|------------------------|
| 10 | 6 | 0.03 | 0.2 och 5.8 | 2 | 10b/0.03D | 2016 (5) |
| 40 | 1.5 | 0.1 | 0.15 och 1.35 | 6 | 40b/0.1D | 2017 (8) |
| 10 | 6 | 0.1 | 0.60 och 5.40 | 6 | 10b/0.1D | 2017 (8) |
| 40 | 1.5 | 0.13 | 0.20 och 1.3 | 8 | 40b/0.13D | 2016 (6) |
| 40 | 1.5 | 0.3 | 0.45 och 1.05 | 18 | 40b/0.3D | 2017 (7) |
| 10 | 6 | 0.3 | 1.80 och 5.70 | 18 | 10b/0.3D | 2017 (6) |
| 10 | 6 | 0.45 | 2.70 och 3.30 | 27 | 10b/0.45D | 2016 (5) |
| 40 | 1.5 | 0.5 | 0.75 och 0.75 | 30 | kontroll | kontroll |
| 20 | 3 | 0.5 | 1.50 och 1.50 | 30 | 20b/0.5D | 2017 (6) |
| 10 | 6 | 0.5 | 3.00 och 3.00 | 30 | 10b/0.5D | 2017 (6) |
| - | - | 1.0 | 60.0 och 0 | 60 | konstant | 2016 (5) |

4.4 Färgförsöket dagtid

Färgerna som användes i dagförsöket och deras RAL-nummer (RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.) kan ses i figur 7 och tabell 2. Den uppmätta spektrala sammansättning av färgerna presenteras i figur 8. Som kontroll i dagförsöket användes RAL 9003 ”Signal white” som är en av de färger som idag är tillåtna på vindkraftverk (Anonymous 2010). Vi valde färger utifrån att de används idag eller har förts fram som alternativ till dagens färgsättning. Grå färger lockade till sig färre insekter än dagens vita färg i Long m.fl. (2011). Därför testade vi RAL 7038 ”Agate grey” som också är tillåten på vindkraftverk idag samt RAL 7000 ”Squirrel grey” som är en mörkare grå färg än den föregående. Färgerna RAL 1000 ”Green beige” och RAL 6025 ”Fern green” är två gröna nyanser som antagligen inte skulle uppfattas som störande på vindkraftverk men som skulle kunna locka till sig färre insekter eftersom de har mindre kontrast mot den gröna vegetationen än nuvarande vita färgen. Färgen RAL 1026 ”Luminous yellow” är en färg som används på nedre delen av vindkraftverk till havs enligt ett styrdokument från Transportstyrelsen (Anonymous 2013). Färgen RAL 2007 ”Luminous bright orange” skulle kunna vara ett alternativ till den föregående signalfärgen. Lila lockade till sig färre insekter enligt Long m.fl. (2011) så därför testade vi RAL 4009 ”Pastel violet” och RAL 3014 ”Antique pink”.

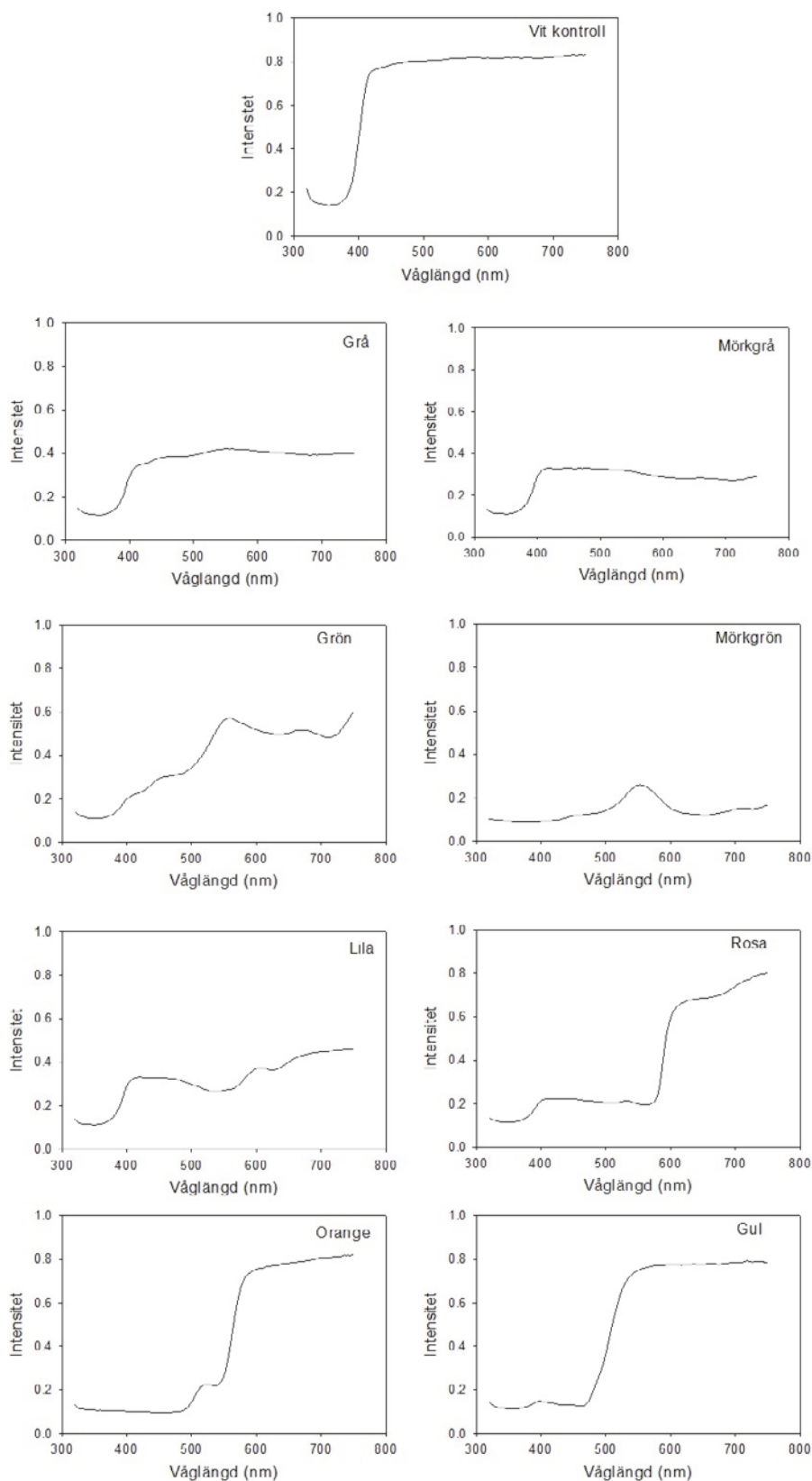
Färgerna blandades till på Uppsala Färg (Bolandsgatan 18A, 753 23 Uppsala) utifrån de RGB-specifikationer (red-green-blue) som finns i RAL-schemat. De gula och orangea färgerna följer inte helt den uppgivna RAL-färgen men är så nära som det var möjligt att komma med den maskin som Uppsala Färg hade.

| | | |
|----------|-------------|------------------------|
| RAL 9003 | 244-244-244 | Signal White |
| RAL 7038 | 195-195-195 | Agate grey |
| RAL 7000 | 120-133-139 | Squirrel grey |
| RAL 1026 | 255-255-00 | Luminous yellow |
| RAL 2007 | 255-164-032 | Luminous bright orange |
| RAL 4009 | 164-125-144 | Pastel violet |
| RAL 3014 | 211-110-112 | Antique pink |
| RAL 6025 | 061-100-045 | Fern green |
| RAL 1000 | 214-199-148 | Green beige |

Figur 7. De färger som användes i färgförsöket dagtid. För varje färg uppges RAL-nummer, RGBkoder (red-green-blue) samt den engelska benämningen på färgen. För den gula och den orangea färgen så tog vi fram en färg som var så nära RAL-specifikationen som möjligt men de två färgerna följer inte helt de uppgivna RGB-värdena.

Tabell 2. Färgerna som användes i dagförsöket. RALnumret är enligt standarden från Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. Röd-grön-blå värden beskriver färgens sammansättning. Svenska namnet är vår översättning då det inte finns någon accepterad svensk standard-namngivning.

| RAL | Röd | Grön | Blå | Engelska | Svenska | Antal replikat |
|------|-----|------|-----|------------------------|----------|----------------|
| 9003 | 244 | 244 | 244 | Signal white | Vit | kontroll |
| 7038 | 195 | 195 | 195 | Agate grey | Grå | 7 |
| 7000 | 120 | 133 | 139 | Squirrel gray | Mörkgrå | 6 |
| 1000 | 214 | 199 | 148 | Green beige | Grön | 7 |
| 6025 | 061 | 100 | 045 | Fern green | Mörkgrön | 7 |
| 4009 | 164 | 125 | 144 | Pastel violet | Lila | 7 |
| 3014 | 211 | 110 | 112 | Antique pink | Rosa | 7 |
| 2007 | 255 | 164 | 032 | Luminous bright orange | Orange | 6 |
| 1026 | 255 | 255 | 000 | Luminous yellow | Gul | 8 |



Figur 8. Spektral sammansättning av färgerna som användes i färgförsöket dagtid. Mätningarna genomfördes i dagsljus och är normaliserade mot en vit cellplastyta vars reflektans är god både i synligt ljus och UV ner till 320nm.

4.5 Analys

Proverna från nattförsöken var helt dominerade av Diptera (tvåvingar, främst myggor) och Lepidoptera (fjärilar). Bland insekterna insamlade i blinkfrekvensförsöket 2016 och färgförsöket nattetid bestämdes dessa två ordningar till familj och övriga till ordning. I blinkförsöket 2017 bestämdes tvåvingar och fjärilar till ordning medan alla andra ordningar räknades i en grupp. I dagförsöket analyserades Diptera och Hymenoptera (steklar) som utgjorde de individrikaste ordningarna.

Varje natt eller dag så insamlades från varje försöksstation: E = antal insekter i den experimentella behandlingen samt K = antal insekter i kontrollen. Testvariabeln var kvoten $E/(E+K)$ där ett värde lika med 0.5 betyder att behandling och kontroll attraherar lika många insekter. Värden > 0.5 betyder att behandlingen attraherar fler insekter än kontrollen och värde < 0.5 betyder att behandlingen attraherar färre insekter än kontrollen.

För varje experiment analyserades effekten av de olika behandlingarna i en generalized linear (mixed) model för varje insektsgrupp med tillräckligt många observationer för att modellen skulle konvergera. Vi använde modeller med binomialfördelat fel och en logit-länk eftersom vi testar en kvot. I varje modell var behandling med som en faktor. För nattfärg 2016 och nattblink 2016 var modellen enkel och inkluderade endast behandling. För blinkförsöket 2017 och färgförsöket dagtid inkluderades även datum och försöksanordning som effekter. Datum var en kontinuerlig variabel som hanterar eventuell säsongsvariation. Faktorn försöksanordning (som en random effect) hanterar eventuella skillnader mellan de två anordningarna. I varje analys gjordes också två ad hoc analyser: 1) där vi testade om resultatet för de enskilda behandlingarna skilde sig signifikant från 0.5 (t-tester) och 2) parvisa t-tester för att se vilka behandlingar som skiljer sig från varandra. Vi beräknade även den procentuella ökningen eller minskningen i kvoten $E/(E+K)$ för varje behandling och presenterar detta i figurerna.

5 Resultat

5.1 Färgförsöket nattetid

I färgförsöket nattetid fångades sammanlagt 10 594 insekter. Av dem var 88 % Diptera (tvåvingar) och 7 % var Lepidoptera (fjärilar).

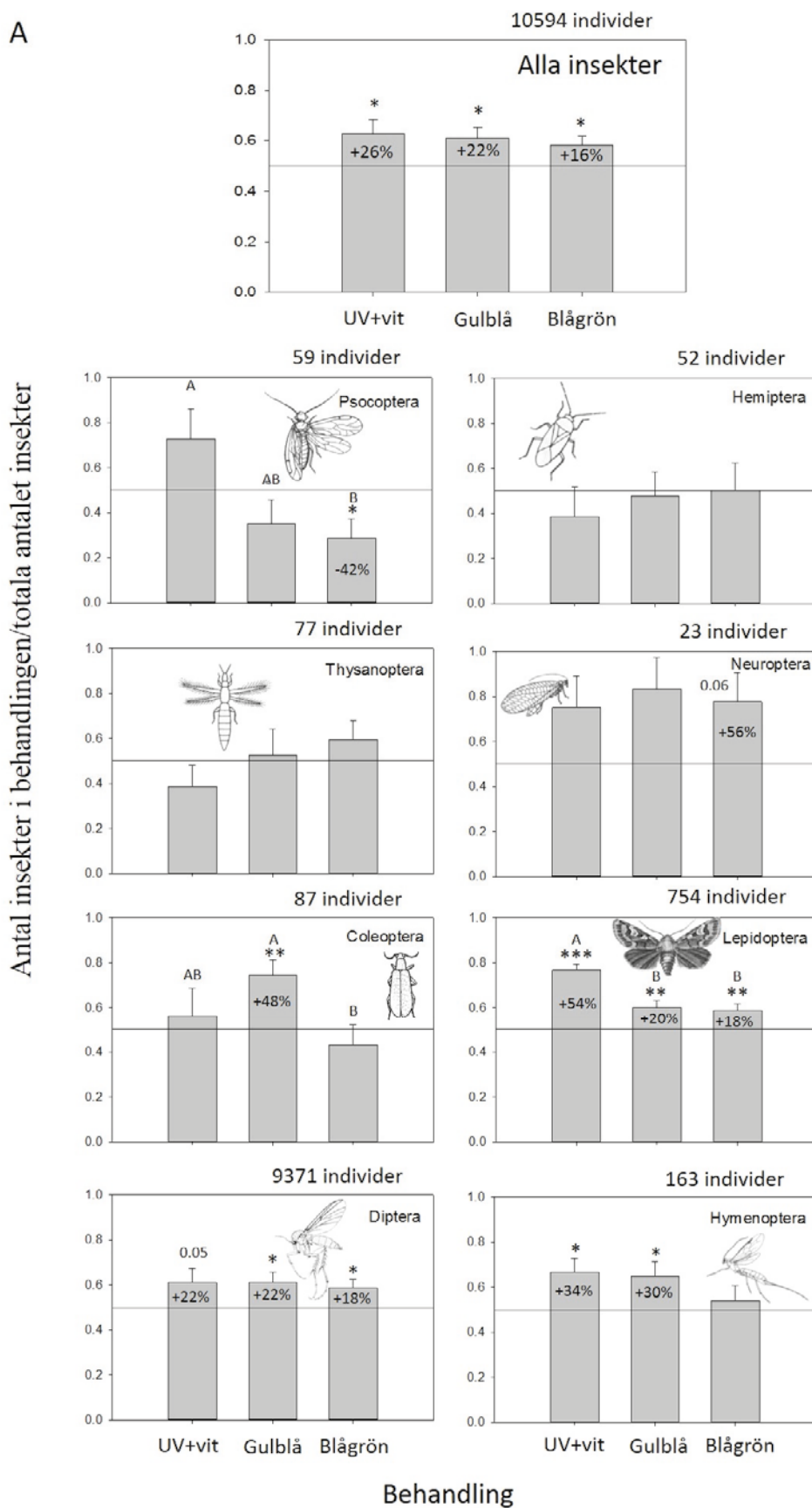
I färgförsöket nattetid så lockade alla testade lamporna till sig fler insekter än den vita kontrollen när vi testade alla insekter tillsammans (Fig. 9 A). Detta resultat var förväntat för behandlingen UV+vit men raka motsatsen mot vad vi förväntade oss för de gulblå och blågröna lamporna.

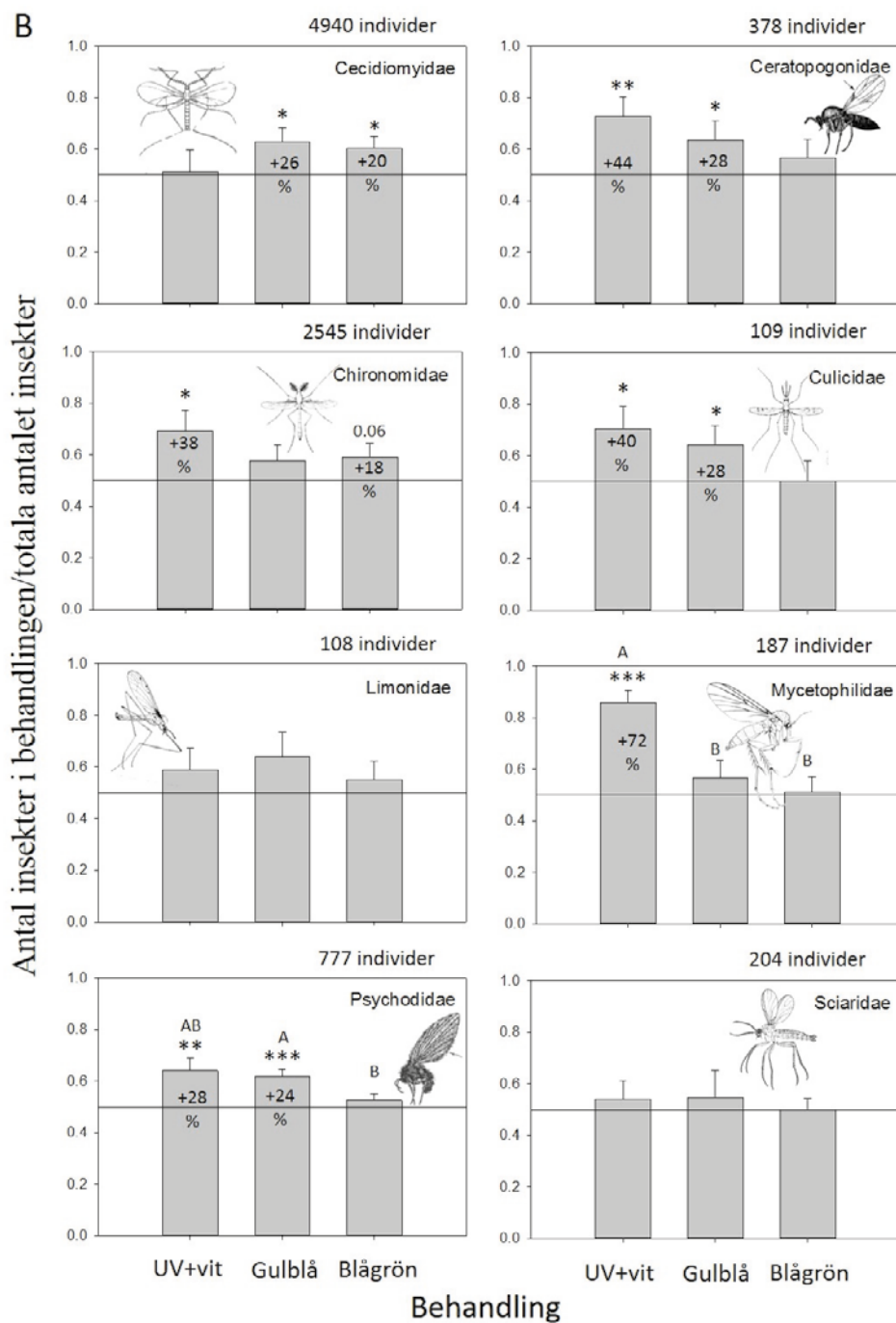
Hos Lepidoptera, Diptera och Hymenoptera (steklarna) ökade UV+vit antalet djur med mellan 22 och 54 % ($p = 0.05$ för Diptera). Lepidoptera var den ordning som ökade mest. Både Diptera och Lepidoptera reagerade positivt på de två andra färgerna gulblå och blågrön. Hymenoptera föredrog gulblå över kontrollen men anlockningen till den blågröna lampan skilde sig inte från kontrollen. Vi fångade bara 59 Psocoptera (stövsländor) i detta försök men detta var den enda ordningen där gulblå och blågröna lamporna drog till sig färre djur än kontrollen på det sätt vi förväntat oss. Skillnaden var signifikant endast för blågrön men där minskade fångsten med 42 %.

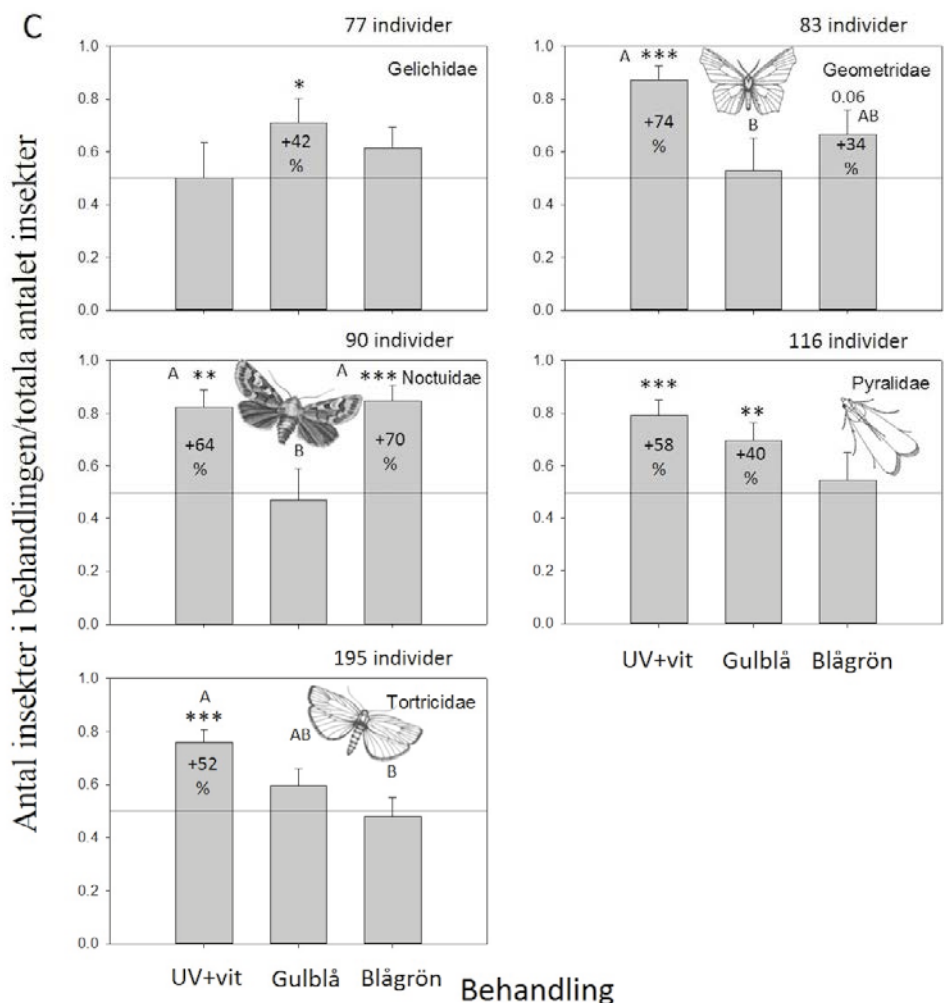
Bland de testade myggfamiljerna varierade responsen på färgerna (Fig. 9 B). Fem av de åtta familjerna reagerade positivt på UV+vit medan den individrikaste familjen, Cecidiomyidae (gallmyggor) inte drogs till UV. Fyra myggfamiljer reagerade positivt på gulblåa lampan men endast två familjer reagerade positivt på blågröna lampan ($p = 0.06$ för Chironomidae, fjädermyggor) (Fig. 8 B). Detta innebär att blågröna lampan i alla fall inte lockade till sig fler djur än kontrollen i de flesta familjerna.

Hos Lepidoptera så lockade UV+vit till sig mera djur än kontrollen hos fyra av fem familjer. (Fig. 9 C). Dessa familjer ökade 52-74 % i den behandlingen. Den gulblå lampan lockade till sig mera djur än kontrollen för Gelichidae (stävmalar) och Pyralidae (mott) medan det inte var någon skillnad mot kontrollen för de andra tre familjerna. Den blågröna lampan lockade till sig mera djur än kontrollen endast för Noctuidae (nattflyn) och Geometridae (mätare) ($p = 0.06$ för Geometridae) medan det inte var någon skillnad mot kontrollen för de andra fyra familjerna (Fig. 9 C).

A







Figur 9. Resultat från nattfärgsförsöket 2016. Testvariabeln var kvoten mellan antalet insekter i behandlingen delat med totala antalet insekter i försöksanordningen (behandling + kontroll). Ett värde lika med 0.5 (vågräta hjälplinjen) betyder att behandling och kontroll attraherar lika många insekter. Värden > 0.5 betyder att behandlingen attraherar fler insekter än kontrollen och värden < 0.5 betyder att behandlingen attraherar färre insekter än kontrollen. Behandlingarna var: UV+vit - vitt ljus och ultraviolett (UV) ljus; Gulblå - vitt ljus bestående av en blandning av gult och blått ljus; Blågrön - vitt ljus bestående av en blandning av blått och grönt ljus. Kontrollen var vitt ljus i alla jämförelserna. Den procentuella ökningen eller minskningen i anlockning för behandlingen (jämfört med kontrollen) är utmärkt för alla signifikanta behandlingseffekter. A) ordningar; B) Dipterafamiljer; C) Lepidopterafamiljer. Staplar indikerade med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0.05$). Felstaplarna är standardfel från GLM-modellen. En behandlingseffekt skild från 0.5 indikeras med asterisker: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. Siffror indikerar en behandlingseffekt som är nära signifikant ($p = 0.05-0.06$).

5.2 Blinkfrekvensförsöket 2016

I blinkfrekvensförsöket 2016 fångades sammanlagt 7 659 insekter. Av dem var 90 % Diptera (tvåvingar) och 6 % var Lepidoptera (fjärilar). Blinkfrekvens och duty cycle för behandlingarna presenteras i Tabell 1.

När det totala antalet insekter av alla ordningar analyserades så lockade det konstanta ljuset till sig 54 % mera djur än kontrollen medan alla tre testade varianterna av blinkfrekvenser lockade till sig färre djur än kontrollen (Fig. 10 A). Den behandling som minskade anlockningen mest var 10b/0.03D (10 blinkningar/minut, lampan tänd 2 s/min) med en minskning på 30 %. Blinkningens längd i den behandlingen var endast 0.2 s. Behandlingen 40b/0.13D (40 blinkningar/min, 8 s/min) minskade anlockningen med 18 % medan 10b/0.45D (10 blinkningar/min, 27 s/min) minskade anlockningen med 16 %. Det var dock ingen statistiskt signifikant skillnad mellan de tre blinkvarianterna.

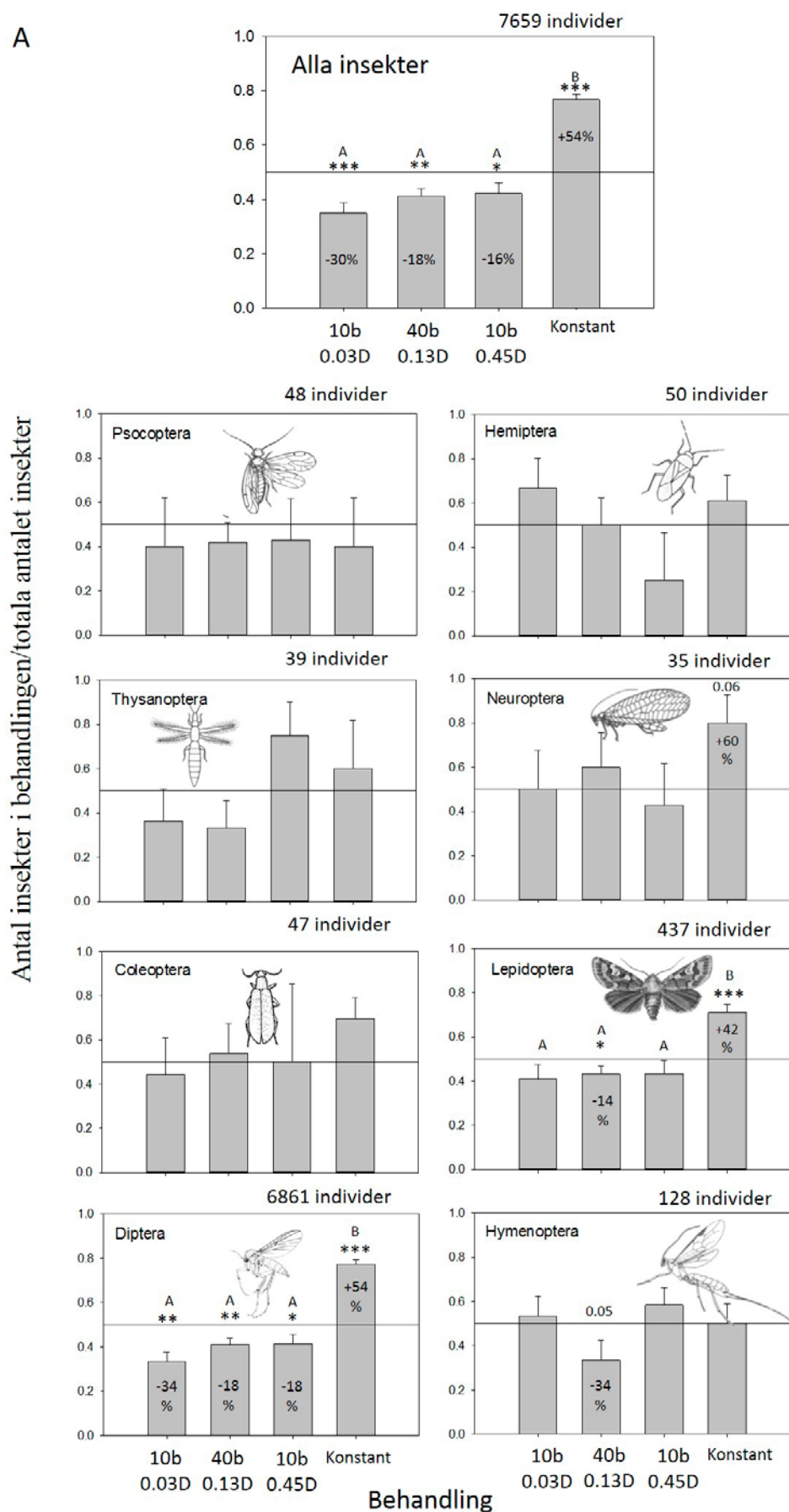
För ordningen Diptera så fann vi samma mönster (Fig. 10 A) som för totalantalet insekter. Även Lepidoptera uppvisade ett liknande mönster men endast en av blinkbehandlingarna var signifikant skild från kontrollen (Fig. 10 A). Eftersom Diptera och Lepidoptera hade flest antal individer så är det dessa två ordningar som till stor del ligger bakom resultatet för totalantalet.

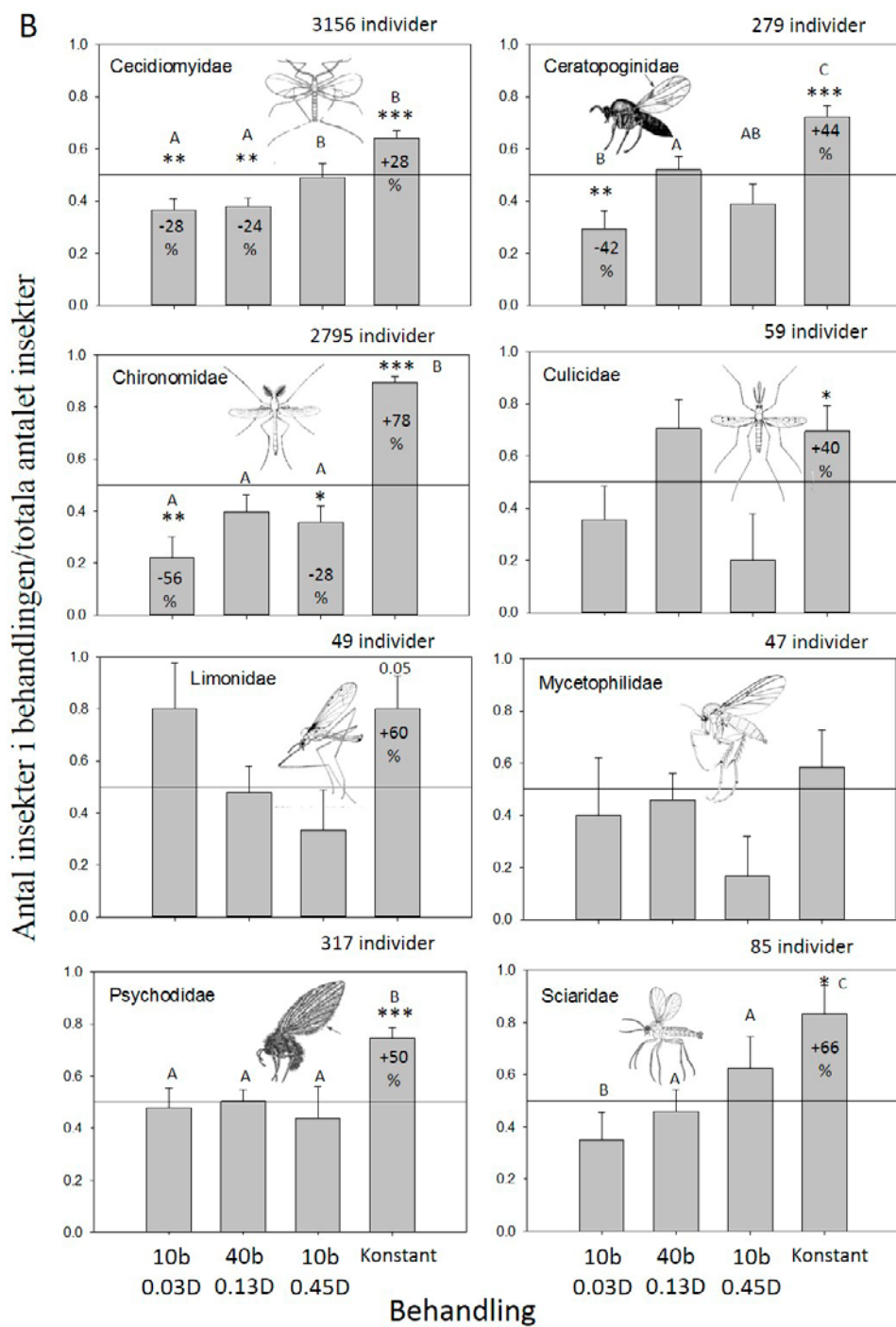
Övriga sex ordningar som analyserades hade mellan 39 och 128 individer totalt. Bland dessa så minskade 40b/0.13D antalet Hymenoptera (steklar) med 34 % (endast nära signifikant, $p = 0.05$) (Fig. 10 A). I övrigt fann vi inga behandlingseffekter på dessa ordningar.

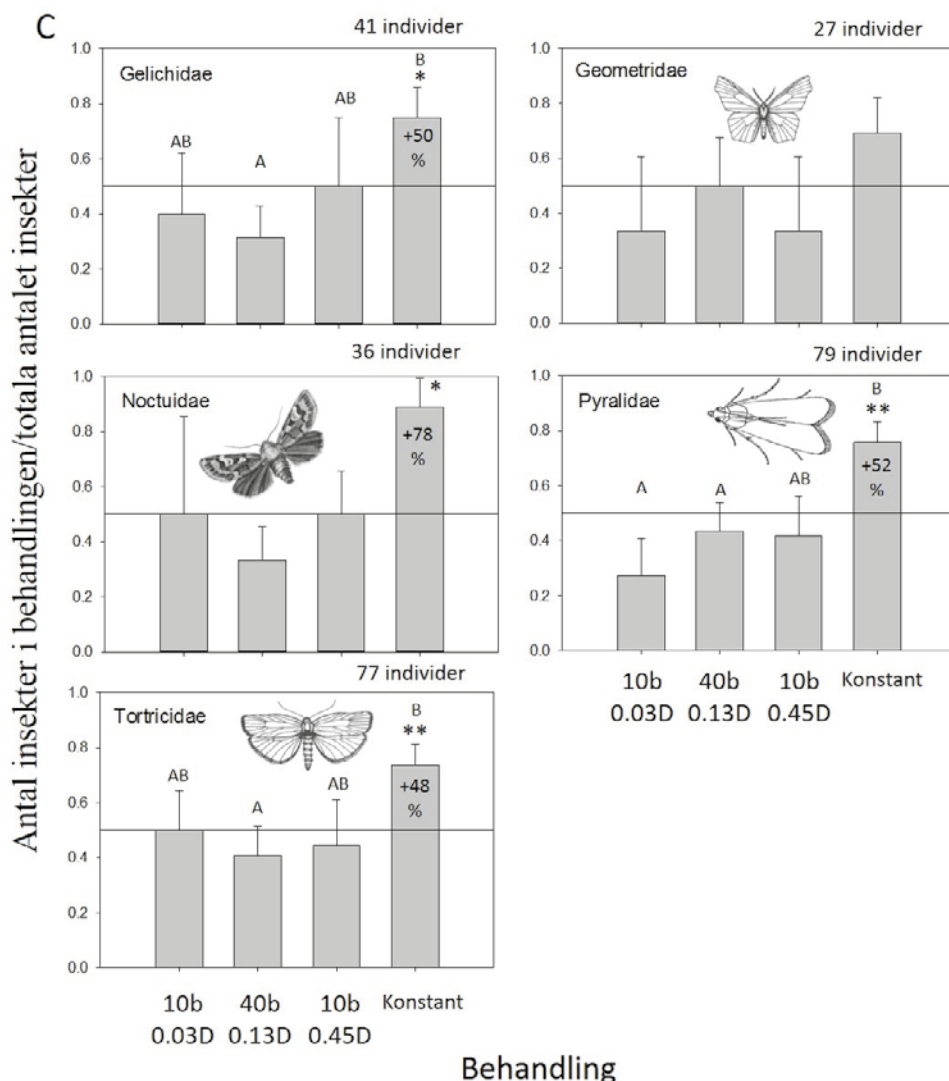
I sju av de åtta analyserade myggfamiljerna så lockade det konstanta ljuset till sig fler individer än kontrollen (endast nära signifikant, $p = 0.05$ för Limoniidae (småharkrankar) (Fig. 10 B). I tre av de individrikaste familjerna, Cecidiomyidae (gallmyggor), Chironomidae (fjädermyggor) och Ceratopoginidae (svidknott), så hittades en effekt av blinkbehandlingarna där behandlingen 10b/0.03D sänkte individantalet med mellan 28 % och 56 % (Fig. 10 B). Minskningen på 56 % hos fjädermyggorna var den kraftigaste minskningen i försöket. För familjen Cecidiomyidae minskade även behandlingen 40b/0.13D anlockningen och för familjen Chironomidae minskade även 10b/0.45D anlockningen (Fig. 10 B). Familjen Psychodidae (fjärilsmyggor) var också individrik men där hittade vi ingen effekt av blinkbehandlingarna.

Antalet individer i de analyserade fjärilsfamiljerna var bara mellan 27 och 79 men i fyra av de fem familjerna lockade det konstanta ljuset till sig fler individer än kontrollen (Fig. 10 C). Det fanns inga signifikanta effekter av blinkbehandlingarna för någon enskild fjärilsfamilj (Fig. 10 C).

A







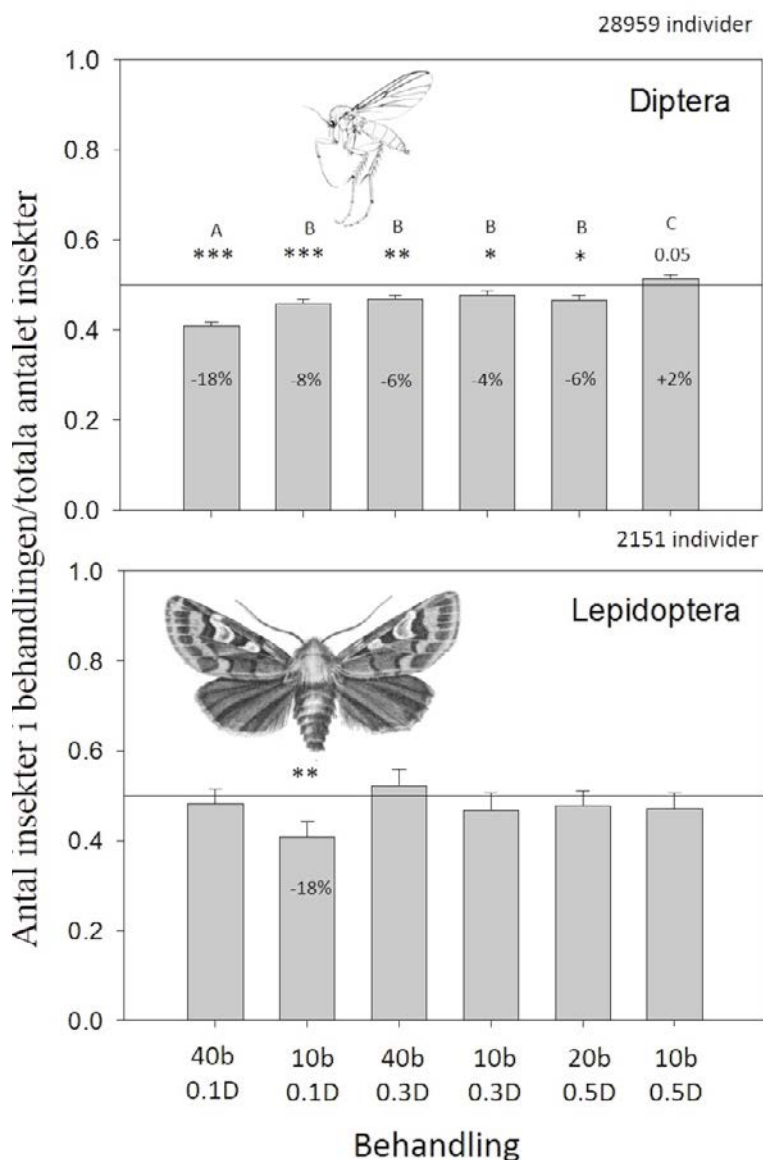
Figur 10. Resultat från blinkfrekvensförsöket 2016. Testvariabeln var kvoten mellan antalet insekter i behandlingen delat med totala antalet insekter i försöksanordningen (behandling + kontroll). Ett värde lika med 0.5 (vågräta hjälplinjen) betyder att behandling och kontroll attraherar lika många insekter. Värden > 0.5 betyder att behandlingen attraherar fler insekter än kontrollen och värden < 0.5 betyder att behandlingen attraherar färre insekter än kontrollen. Behandlingarna var: 10b/0.03D - 10 blinkningar/minut med 0.03 duty cycle; 40b/0.13D - 40 blinkningar/minut med 0.13 duty cycle; 10b/0.45D - 10 blinkningar/minut med 0.45 duty cycle; konstant - konstant vitt ljus utan blinkning. Kontrollen var alltid 40 blinkningar/minut med 0.5 duty cycle. Den procentuella ökningen eller minskningen i anlockning för behandlingen (jämfört med kontrollen) är utmärkt för alla signifikanta behandlingseffekter. A) ordningar; B) Diptera; C) Lepidoptera. Staplar indikerade med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0.05$). Felstaplarna är standardfel från GLM-modellen. En behandlingseffekt skild från 0.5 indikeras med asterisker: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. Siffror indikerar en behandlingseffekt som är nära signifikant ($p = 0.05-0.06$).

5.3 Blinkfrekvensförsöket 2017

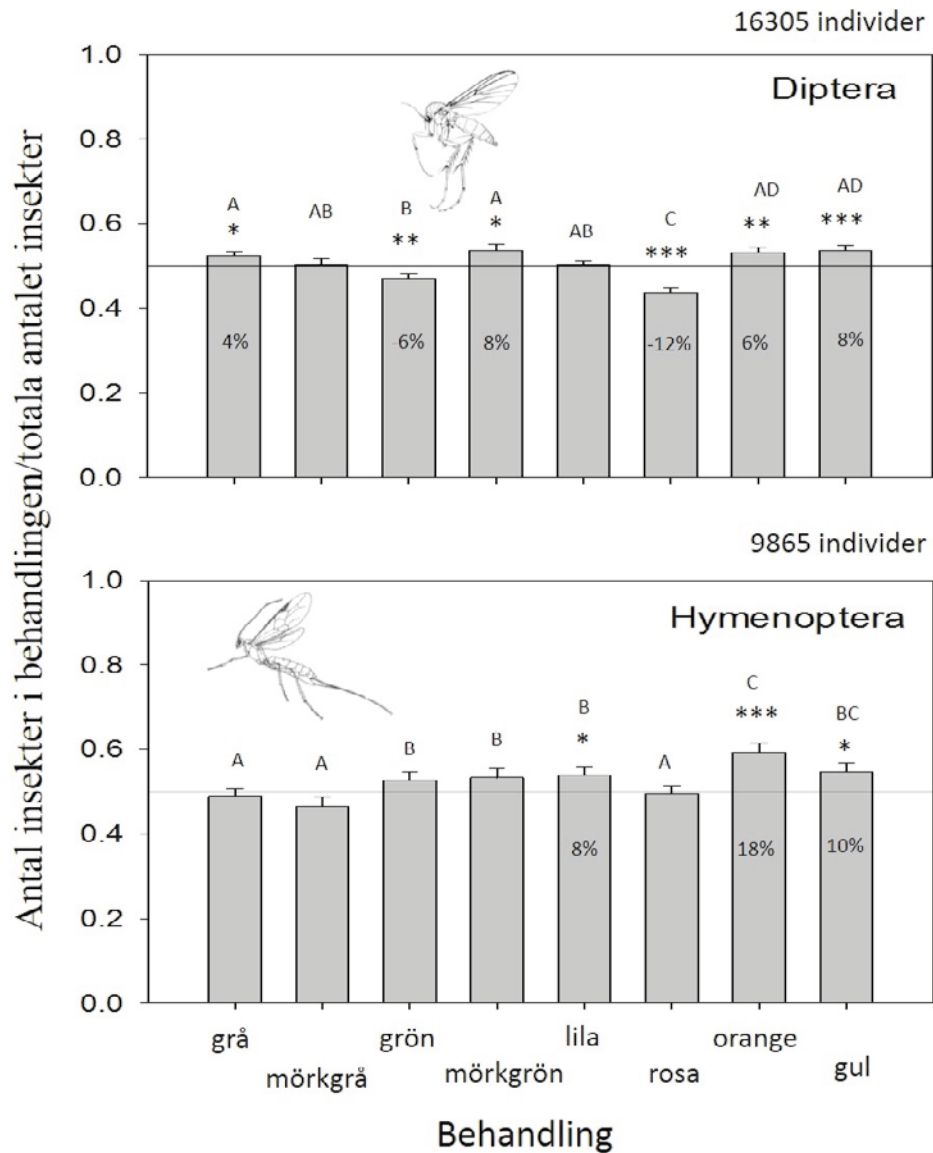
I blinkfrekvensförsöket 2017 fångades 31 714 insekter. Av dem var 91 % Diptera och 7 % var Lepidoptera. Blinkfrekvens och duty cycle för behandlingarna presenteras i Tabell 1. Anlockningen av Diptera minskade med 18 % för behandlingen 40b/0.1D (6 s/min) som var den behandling som hade kortast ljuspulser (endast 0.15 s) (Fig. 11, Appendix 1). Behandlingen 10b/0.5D (30 s/min) ökade antalet fångade djur med 2 % men denna effekt var endast nära signifikant, $p = 0.05$. De övriga fyra behandlingarna sänkte också anlockningen med mellan 4 % och 8 %. Hos fjärilarna var det bara 10b/0.1D (6 s/min) som sänkte antalet fångade djur och då med 18 % (Fig. 11, Appendix 1).

5.4 Färgförsöket dagtid

I färgförsöket fångade vi 16 305 Diptera och 9 865 Hymenoptera. Dessa två ordningar utgjorde ca 90 % av alla insekter i detta delförsök. Sex av de åtta testade färgerna påverkade attraktionen av Diptera medan bara tre färger påverkade Hymenoptera (Fig. 12, Appendix 1). Den grå färgen lockade till sig fler Diptera än kontrollen medan den mörkgrå färgen inte skilde sig från kontrollen. Den gröna färgen minskade anlockningen medan den mörkgröna färgen ökade anlockningen hos Diptera. Den lila färgen lockade till sig fler Hymenoptera än kontrollen men det fanns ingen effekt hos Diptera. Rosa var den färg som minskade anlockningen mest (12 %) men bara hos Diptera. Både den gula och den orangea färgen lockade till sig flera Diptera och Hymenoptera än kontrollen.



Figur 11. Resultat från blinkfrekvensförsöket 2017. Testvariabeln var kvoten mellan antalet insekter i behandlingen delat med totala antalet insekter i försöksanordningen (behandling + kontroll). Ett värde lika med 0.5 (vågräta hjälplinjen) betyder att behandling och kontroll attraherar lika många insekter. Värden > 0.5 betyder att behandlingen attraherar fler insekter än kontrollen och värden < 0.5 betyder att behandlingen attraherar färre insekter än kontrollen. Behandlingarna var: 40b/0.1D - 40 blinkningar/minut med 0.1 duty cycle; 10b/0.1D - 10 blinkningar/minut med 0.1 duty cycle; 40b/0.3D - 40 blinkningar/minut med 0.3 duty cycle; 10b/0.3D - 10 blinkningar/minut med 0.3 duty cycle; 20b/0.5D - 20 blinkningar/minut med 0.5 duty cycle; 10b/0.5D - 10 blinkningar/minut med 0.5 duty cycle. Kontrollen var alltid 40 blinkningar/minut med 0.5 duty cycle. Den procentuella ökningen eller minskningen i anlockning för behandlingen (jämfört med kontrollen) är utmärkt för alla signifikanta behandlingseffekter. Staplar indikerade med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0.05$). Felstaplarna är standardfel från GLM-modellen. En behandlingseffekt skild från 0.5 indikeras med asterisker: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.



Figur 12. Resultat från färgförsöket dagtid. Testvariabeln var kvoten mellan antalet insekter i behandlingen delat med totala antalet insekter i försöksanordningen (behandling + kontroll). Ett värde lika med 0.5 (vågräta hjälplinjen) betyder att behandling och kontroll attraherar lika många insekter. Värden > 0.5 betyder att behandlingen attraherar fler insekter än kontrollen och värden < 0.5 betyder att behandlingen attraherar färre insekter än kontrollen. Behandlingarna var: grå (RAL 7038 Agate grey); mörkgrå (RAL 7000, Squirrel grey); grön (RAL 1000, Green beige); mörkgrön (RAL 6025, Fern green); lila (RAL 4009, Pastel violet); rosa (RAL 3014, Antique pink); orange (RAL 2007, Luminous bright orange); gul (RAL 1026, Luminous yellow). Kontrollen var vit (RAL 9003, Signal white). Den procentuella ökningen eller minskningen i anlockning för behandlingen (jämfört med kontrollen) är utmärkt för alla signifikanta behandlingseffekter. Staplar indikerade med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0.05$). Felstaplarna är standardfel från GLM-modellen. En behandlingseffekt skild från 0.5 indikeras med asterisker: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

6 Diskussion

6.1 Färgförsöken nattetid

Som förväntat så lockade UV+vit till sig flera insekter än kontrollen (bara vit). UV-lampor har länge använts av fjärlissamlare och det var den ordningen som i störst antal lockades till UV+vit. Bland myggorna så varierade responsen för de olika familjerna och tre familjer, däribland gallmyggorna, reagerade inte positivt på UV utan förekom i samma antal i kontrollen. Gallmyggorna var den individrikaste familjen.

Våra två testlampor som var designade för att locka till sig så få insekter som möjlig fungerade inte alls som planerat. Tvärtom lockade båda lamporna till sig flera djur än kontrollen när vi analyserade hela insektsmaterialet tillsammans. Stövsländorna var den enda grupp som reagerade som förväntat på våra blågröna och gulblå lampor. Hos den ordningen så lockade den blågröna, lampan till sig 42 % färre djur än kontrollen.

I analysen av de enskilda familjerna var det ingen skillnad på blågrön och kontrollen för nio av de tretton testade familjerna vilket i sig är intressant, eftersom insekterna i dessa familjer då inte ser någon skillnad på vanligt vitt ljus och det vita ljus vi skapat med blåa och gröna LED-lampor.

För att förstå resultatet behövs en analys utgående från respektive insektsgrupps spektrala känslighet. Den metod som testades innebar funktionellt att ljuset ur insekternas perspektiv var svagare och färgat, jämfört med ett starkt vitt ljus för en mänsklig observatör. Den avsedda intensitetssänkningen för de flesta insekter var att testljuset skulle bli som mest hälften så starka som kontrollampan. Om vi antar att chansen att en insekt blir attraherad av lampan är direkt beroende av hur många fotoner som träffar dess öga, och att insekterna är jämnt fördelade i luften, borde detta innebära att vi skulle ha fått 2,8 insekter i kontrollfällan för varje insekt i testljuset. Detta beror på att ljusintensiteten minskar med kvadraten av avståndet till ljuskällan medan luftvolymen ökar med kvadraten av avståndet. Ett dubbelt så starkt ljus bör därför nå $\sqrt{2}$ gånger längre men innesluta $(\sqrt{2})^3 \sim 2,8$ gånger mer luft.

När vi inte ser en sådan minskning kan det ha ett antal olika orsaker. Det kan vara så att alla delar av ljusspektrum inte har samma attraktionskraft på insekter. Den metod vi använde för att skapa de alternativa färgerna innebar att vi, istället för att ha ett brett men ganska jämnt vitt spektrum, hade två smala men ganska kraftiga ljusstopp. Om det är så att insekterna huvudsakligen attraheras av kortvågigt ljus, vilket verkar vara fallet för fjärlilar, kan det vara så att den funktionella intensiteten istället bör beräknas endast utifrån det ljus som emitteras under 500nm. I så fall kan det vara så att vi istället ökat ljusstyrkan för insektsögat i vårt testljus. Ett försök där man undersöker den relativa attraktionskraften av olika smalbandiga ljuskällor på olika insektsordningar vore intressant att genomföra med den nu befintliga utrustningen.

Baserat på vilken typ av fototaxis man tror dominerar finns det argument för en större betydelse av både kortvågigt och långvågigt ljus. Om insekten skall urskilja månen mot en himmel upplyst huvudsakligen av spritt kortvågigt ljus borde insekten huvudsakligen nyttja det mer riktade långvågiga ljuset, medan en insekt som söker öppningar i vegetation bör dra nytta av att kortvågigt ljus i högre grad sprids vilket skapar jämt upplysta luckor i vegetationen.

Vi avser att gå vidare i vår analys genom att beräkna det antal fotoner som respektive insektsgrupp uppfattade utifrån deras spektrala känsligheter, i de fall där dessa är kända. De data vi samlat in i detta experiment kan användas för att öka vår förståelse för vilka ljusparametrar som avgör attraktionskraften för insekter. Detta kan leda till att man kan ta fram ett vitt ljus som attraherar färre insekter men ur ett praktiskt perspektiv kan vi dra slutsatsen av det genomförda experimentet att den nuvarande färgsammansättningen av det vita ljuset är bra, och inte på ett enkelt sätt kan ändras för att radikalt minska antalet insekter.

6.2 Blinkförsöken

I blinkförsöket 2016 lockade den konstant tända lampan till sig mera insekter än den blinkregim som används som hinderbelysning idag. Detta var väntat och det var bra att ha ett resultat där utgången var ganska given med i försöket eftersom det var första gången försöksanordningen användes. Ökningen var stor, med 54 % fler individer i analysen av totala antalet insekter.

Första säsongen, år 2016, testades två blinkbehandlingar där vi hade så kort duty cycle som utrustningen tillät det året. Båda dessa behandlingar 10b/0.03D (lampan tänd 2 s/min) och 40b/0.13D (8 s/min) minskade antalet insekter mycket, 30 % respektive 18 % jämfört med kontrollen. Den kraftigaste minskningen i hela studien var minskningen med 56 % för Chironomidae (fjädermyggor) i behandlingen 10b/0.03D. Denna myggfamilj samt Cecidiomyidae (gallmyggor) var de i särklass individrikaste familjerna med 2795 respektive 3156 individer. Det är därför mycket dessa två familjer som driver mönstret i analysen av det totala antalet insekter. Även behandlingen med tio blinkningar per minut och en duty cycle på 0.45, det vill säga 10b/0.45D (27 s/min), sänkte antalet insekter (16 %).

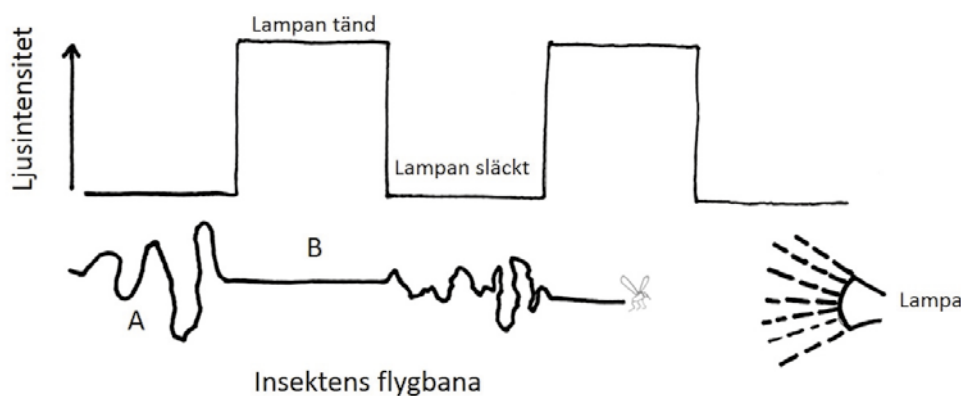
Resultaten från år 2016 visar att det går att minska antalet insekter som lockas till blinkande ljus genom att minska den tid som lampan är tänd. Resultatet verkar till stor del styras av hur lång tid lampan är tänd per minut – den största minskningen fann vi för den kortaste tiden, då lampan bara var tänd 2 s/min (10b/0.03D). Det var främst Diptera som reagerade på ändrad blinkregim. Endast en blinkregim minskade anlockningen för Lepidoptera.

Tidigare insektsstudier av effekter av blinkande lampor har studerat helt andra blinkfrekvenser än de vi använde. De 10 och 40 blinkningar per minut som vi använde motsvarar 0.167 respektive 0.667 Hz (antal blinkningar per sekund). Tidigare har man sett att färre insekter lockas till lampor med blinkfrekvenser mellan 120 och 240 Hz jämfört med lampor som inte blinkar

(Barroso m.fl. 2017). Dessa höga frekvenser är inte jämförbara med blinkfrekvenserna i våra experiment utan studien av Barroso m.fl. handlar om lampor som pulserar i en frekvens som är mycket högre än vad människor kan uppfatta. Det finns negativa effekter på många arter, även insekter, av blinkningar i dessa höga frekvenser (Inger m.fl. 2014). Vi känner inte till några studier som testat blinkfrekvenser i det spann som vi undersökt.

Resultaten är svåra att förstå utifrån förklaringen att insekterna använder månen för orientering (menotaxis, se avsnittet Bakgrund). Om insekterna rör sig i en cirkel kring lampan, vilket blir resultatet av menotaxis, så borde man inte hitta några skillnader mellan de båda sidorna i försöksanordningen. I varje fall borde skillnaderna bli ganska små.

Vi tror mer på den andra förklaringen till varför insekter dras till lampor (telotaxis, se avsnittet Bakgrund) som går ut på att insekter flyger rakt mot ljuskällan i hopp om att hitta en öppning i vegetationen. Man kan här tänka sig ett scenario där insekten flyger mot lampan så länge som den är tänd men sedan tappar riktningen när lampan slocknar (Fig. 13). Enligt denna modell inleder insekten ett sökbeteende när lampan slocknar. Ju kortare tid som lampan är tänd desto längre tider flyger insekten utan att ha en fast punkt att orientera mot och därför tappar den lättare orienteringen då lampan är tänd endast korta tider. Denna modell är också förenlig med den kraftiga ökningen av antalet insekter i behandlingen (konstant) då lampan var tänd hela tiden (54 % ökning).



Figur 13. Modell av hur en insekt kan tänkas flyga mot en blinkande lampa. Grafen högst upp i bild visar när lampan är tänd respektive släckt. Insekten flyger mot lampan till höger i figuren. När lampan är tänd flyger insekten rakt mot lampan eftersom den ser det vita ljuset. När lampan slocknar börjar insekten leta efter ljuset genom att flyga omväxlande åt höger och vänster (sicksackflykt) för att på nytt kunna få syn på lampan. Detta beteende finns beskrivet för insekshanar som letar efter en hona som släpper ut feromoner. Lampans blinkfrekvens och duty cycle bestämmer hur långa perioderna av rak flykt respektive sicksackflykt är.

Försöket år 2016 var en form av konceptvalidering där vi visade att blinkregimen påverkar anlockningen. Men att sänka antalet blinkningar/minut från dagens 40-60 till 10 och dessutom med en mycket kort duty cycle ($D = 0.03$) låter sig knappast göras med tanke på luftfartssäkerheten. År 2017 hade vi

förbättrat vår utrustning genom att helt datorisera lampornas blinkregim. Försöket det året inriktades därför på att se om det finns gränser i antalet blinkningar och duty cycle som kan accepteras i praktiken men som ändå sänker antalet insekter påtagligt. I nuvarande hinderbelysning så blinkar lampan 40-60 gånger/minut och är tänd 30 s/min. År 2017 testade vi att ha lampan tänd 6 s/min, 18 s/min och 30 s/min och för varje tid hade vi två behandlingar med olika antal blinkningar per minut. Vi testade 10, 20 och 40 blinkningar per minut.

Minskningen i antalet Diptera följde samma mönster som för år 2016: om lampan var tänd kortare tid per minut så fångades färre Diptera. Den största minskningen fann vi för den kortaste tid som lampan är tänd nämligen med blinkpulsens längd på 0.15 s (40b/0.1D). Minskningen på 18 % i denna behandling är samma som minskningen för behandlingen 40b/0.13D år 2016 där blinkpulsens längd var 0.20 s. Skillnaden i duty cycle mellan dessa två behandlingar är minimal (0.1 jämfört med 0.13) så det är inte oväntat att resultaten blev lika för dessa båda behandlingar. Att minska duty cycle från 0.5 till 0.1 men behålla 40 blinkningar per minut som är det som används idag skulle alltså kunna minska antalet tvåvingar som lockas till hinderbelysningen med 18 %. Också behandlingen 40b/0.3D minskade antalet insekter. Denna regim innebär att lampan blinkar 40 gånger/minut precis som dagens bestämmelser kräver men lampan är tänd 18 s varje minut istället för 30 s. Minskningen i anlockning för den behandlingen var dock mindre, endast 6 %. De två behandlingarna 40b/0.1D och 40b/0.3D var dock inte signifikant skilda från varandra vilket gör att man bör tolka den skillnaden försiktigt. Att sänka antalet blinkningar till 20 per minut men behålla en duty cycle på 0.5 sänkte också anlockningen men endast med 6 %.

Behandlingarna med 10 blinkningar per minut och en duty cycle på 0.5 (år 2017) eller 0.45 (år 2016) fick olika utfall de två åren. År 2017 ökade anlockningen av Diptera med 2 % och år 2016 minskade anlockningen med 18 %. Dessa två behandlingar har de två längsta blinkningarna, 2.70 s år 2016 och 3.00 s år 2017. Det vore fördelaktigt att göra om försöket med båda dessa behandlingar under samma säsong för att verkligen kunna dra korrekta slutsatser om skillnaden. Om det verkligen är en skillnad i anlockning när man ökar blinkningens längd från 2.70 till 3.00 s så skulle detta kunna undersökas ytterligare för att ta fram en optimal blinkregim.

Överlag så var behandlingseffekterna för Diptera i de blinkbehandlingar som sänkte anlockningen lägre år 2017 (sänkning på 4 % till 18 %) än år 2016 (sänkning på 18 % till 34 %). Försöken utfördes i skogsmiljö år 2016 och i en betesmark år 2017 men det är inte självklart att detta bör leda till skillnader i behandlingseffekter. Det kan vara skillnader i Dipterafaunans sammansättning i de två miljöerna. Eftersom proverna från 2017 ej bestämts till familj så vet vi inte om det var andra familjer som dominerade det året. År 2016, när vi bestämde Diptera till familj, så fann vi skillnader i anlockning mellan familjerna. Om vi år 2017 hade Dipteraprover som var

dominerade av andra familjer än Cecidiomyidae och Chironomidae vilket vi hade 2016 så skulle det möjligen kunna förklara skillnaderna.

Tre av de fyra testade fjärilsfamiljerna reagerade starkt positivt på det konstanta ljuset år 2016 men hos fjärilarna fanns det en effekt av endast två av de sammanlagt tio blinkbehandlingarna. Detta står i skarp kontrast mot tvåvingarna där alla blinkbehandlingar påverkade anlockningen. Antalet fjärilar var lågt år 2016 (437 individer) men år 2017 fick vi 2151 fjärilar vilket inte kan anses vara lite. Det är möjligt att den låga responsen på blinkbehandlingar hos fjärilarna är en effekt av deras synsystem. De reagerar kraftigt positivt på den konstant tända lampan vilket ju tydligt visar att de dras till lampor. Men man kan tolka våra resultat som att de inte påverkas av förändringar i blinkfrekvens lika starkt som myggorna gör.

Kroppsstorleken hos Diptera är i genomsnitt mindre än hos Lepidoptera och detta skulle kunna antyda att våra sugfällor lättare fångar små djur än stora. En observation som talar emot att storleken avgör antalet djur är att i blinkförsöket 2016 fick vi bara 39 Thysanoptera (tripsar) och i färgförsöket nattetid fick vi bara 77 Thysanoptera. Detta är djur som är 1-2 mm långa så om storleken avgör antalet djur så borde vi fått många Thysanoptera. Det viktigaste är att den parade designen gör att djurens storlek inte kan påverka resultatet – båda fläktarna är ju lika starka. Att vi finner flera Diptera än Lepidoptera nattetid speglar troligen en faktisk skillnad i abundans mellan de två grupperna i de miljöer där vi genomförde försöken.

6.3 Färgförsöket dagtid

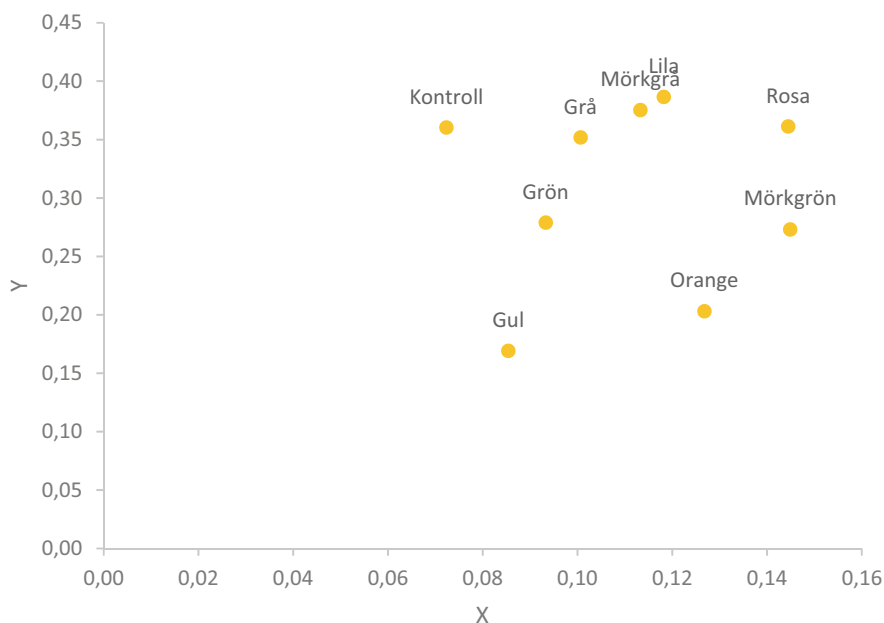
Det finns bara en tidigare studie av insektsattraktion till färger av relevans för färgen på vindkraftverk nämligen Long m.fl. (2011). Våra resultat skiljer sig delvis från den studien och det är därför intressant att förstå skillnaderna i vårt försöksupplägg jämfört med deras. Studien av Long m.fl. (2011) är i princip en studie som testar insekters attraktion till blommor. Man lade ut färgade kort i gräset och räknade sedan antalet insekter som ”besökte” varje färg. I vårt experiment har vi ökat relevansen för vindkraft genom att istället undersöka insektsattraktionen till lodräta, färgade ytor som mera liknar ett riktigt vindkraftverk än vad färgade kort på en gräsmatta gör.

För att förstå skillnaden mellan dessa upplägg måste man hålla i åtanke att ögat inte är ett objektivi mätinstrument. Färguppfattningen påverkas av belysningen, men också av färgsammansättningen i den bakgrund mot vilken objektet betraktas. En blåmålad yta kan upplevas som starkt kontrasterande om den betraktas mot en gräsbevuxen yta, men mot himlen kan densamma verka blek och ointressant.

Precis som Long m.fl. (2011) så finner vi att gul färg lockar till sig mycket insekter. Detta är inte överraskande eftersom ”gulfällor” länge använts föra att samla insekter (Leather 2004). Gul färg används idag på nedre delen av verk till havs där man också observerat stora mängder insekter (Ahlén m.fl. 2007). Det är troligt att gula kraftverk i havsmiljö kan locka till sig mängder av insekter, både för att de attraheras till gult men även eftersom vindkraftverken ofta är

de enda höga, lodräta föremålen i den miljön. Vi testade även orange eftersom orange reflekterar mer långvågigt ljus än de gula och gröna färgerna. Att använda orange skulle vara ett acceptabelt alternativ för sjöfartssäkerheten men våra resultat visar att orange är lika dålig som gul. För Hymenoptera så var anlockningen faktisk högre för orange än för gul. Att ersätta gult med orange till havs skulle därför inte minska insektsanlockningen. Vi kan också dra slutsatsen att måla landbaserade vindkraftverk i gult skulle vara dåligt.

Då insekternas färgkänslighet skiljer sig från människans kan det vara svårt att med ögat avgöra vilka färger som kan upplevas som kontrasterande för till exempel ett honungsbi. Det vanligaste arrangemanget bland insekter är att ha en triad av fotoreceptorer med maximal känslighet runt 340 nm (UV), 450 nm (blå) och 540 nm (grön) (som hos honungsbiet, *Apis mellifera*, Briscoe & Chittka 2001). Som kan ses i figur 14, ligger därför inte alltid färger vi uppfattar som lika nära varandra i insekternas färgrymd. Anmärkningsvärt är bland annat att lila och mörkgrå är mycket lika för ett bi, medan de båda gröna färgerna är mer olika än exempelvis rosa och mörkgrönt. Grafen beskriver dock endast hur receptorerna stimuleras vilket inte direkt kan likställas med insektens uppfattning av färgerna och hur de kontrasterar.



Figur 14. En X/Y-plot av de testade färgerna i ett honungsbis färgrymd. Avståndet mellan färgerna anger hur olika deras färg upplevs av insektens färgreceptorer. I diagrammet har alla färger normaliserats till samma intensitet och X anger den andel av färgen som stimulerar den kortvågiga receptorn, medan Y är mellanvågsreceptorn.

Vi testade två gråa färger. Den vi kallar grå (RAL 7038) är idag tillåten på vindkraftverk medan den vi kallar mörkgrå (RAL 7000) inte är det. Vi fann att den grå färgen ökade anlockningen av Diptera jämfört med vita kontrollen medan mörkgrå lockade till sig lika många Diptera som kontrollen. För

Hymenoptera fanns ingen behandlingseffekt. Figur 2 i Long m.fl. (2011) antyder att grå färger borde locka till sig färre insekter än vit men så är alltså inte fallet i vår studie. Om något så visar vår studie att nuvarande vita färg (RAL 9003) är bättre än den tillåtna gråa (RAL 7038). Om man har ett val så finns det därför stöd i vår studie för att hellre måla verken i vitt än i grått för att minska insektsanlockningen.

Vi testade två gröna nyanser och fann att den ljusare gröna (RAL 1000) minskade anlockningen av Diptera medan den mörkgröna (RAL 6025) ökade anlockningen. Den minskade anlockning till den ljusare gröna är intressant. Antagligen minskar anlockningen till den färgen för att kontrasten mot den omgivande grönskan (främst björksly och gräs på kalhygget där försöket genomfördes) minskar. Man skulle kunna tänka sig att måla den nedre delen av ett kraftverk i denna gröna färg, kanske upp till samma höjd som trädtopparna. Det är möjligt att genom att göra den nedre delen av verket svårare att upptäcka för svärmande Diptera så får man färre Diptera som lockas till nedre delen av verket och sedan följer den höga strukturen upp till toppen av verket där fladdermusdödligheten sker. Färgen på den nedre delen av verket påverkar ju inte flygsäkerheten så det bör finnas möjlighet att ändra den. Behandlingseffekten av grön var dock måttlig (en minskning på 4 % för Diptera) vilket är ganska lite jämfört med behandlingseffekterna av att ändra blinkregimen (en minskning på 34 % för Diptera i den bästa blinkregimen år 2016).

Lila var den färg som lockade till sig minst antal insekter i försöket av Long m.fl. (2011). I vårt försök lockade dock lila till sig fler steklar än kontrollen medan det inte fanns någon effekt på Diptera. Den färg som minskade insektsanlockningen mest var rosa (12 % färre Diptera). Detta resultat visar att det går att minska anlockningen genom att välja en lämplig färg. Att måla nederdelen av verken rosa skulle påverka synligheten för människor vilket inte gör det till en lämplig åtgärd i alla miljöer. I en miljö med skog nära inpå kraftverken så skulle dock synligheten öka bara marginellt om man målar kraftverken rosa upp till trädtopphöjd.

6.4 Experimentets relevans för verkliga vindkraftverk

En viktig fråga att besvara om man ska gå vidare med studier av insekters attraktion till färger och lampor är om fladdermössen faktisk ökar sin aktivitet kring nacellen på vindkraftverk om det är fler insekter där. Att mängden insekter och fladdermusaktiviteten samvarierar är ju avgörande för att manipulationer av blinkfrekvenser eller färgsättning ska vara relevanta. Vidare studier av sambandet mellan insekter och fladdermöss vid toppen av vindkraftverk bör därför prioriteras.

Våra experiment har utförts på marknivå vilket var nödvändigt för att ta reda på om färger och lampor spelar någon roll för anlockningen av insekter. Den största effekten på insekterna var i blinkfrekvensförsöken. Ett naturligt

nästa steg vore därför att testa olika blinkfrekvenser på högre höjd för att se om anlockningen till blinkande lampor fungerar på samma sätt på högre höjd som i vårt experiment vid marknivå. Här kan man tänka sig ett försök med en mast som är högre än omgivande skog där man på ett kontrollerat sätt kan testa olika blinkfrekvenser med en lampa och samla in insekter vid lampan med en fjärrstyrd sugfälla av samma typ som vi använde i vårt parallella Vindvalsprojekt (rapport 6902, 2019). Då kan man först testa hur mycket insekter som anlockas med nuvarande blinkregim och sedan om antalet insekter sjunker då man använder till exempel blinkregimen med 40 blinkningar per minut och en duty cycle på 0.1 som var en av de blinkregimer där vi såg störst effekt på insekterna.

Vårt experiment med färger under dagtid var mera realistiskt än studien av Long m.fl. (2011) eftersom vi testade anlockning till lodräta ytor istället för till färglappar på marken. I motsats till Long m.fl. (2011) så fann vi inga positiva effekter av de grå färgerna. Det fanns en positiv effekt av grön men den var mycket mindre än effekterna av ändrad blinkregim. Man kan tänka sig att gå vidare och testa anlockning till större lodräta strukturer målade i denna gröna färg eller i den ljusst rosa färg där vi hade starkast effekt på Diptera. Men eftersom de positiva effekterna av grön och rosa var mindre än effekterna av blinkfrekvenser så bör vidare studier av blinkfrekvenser ha högre prioritet.

Om förändringar i färgsättningen planeras för att minska kraftverkens attraktionskraft för någon djurgrupp är det viktigt att objektivt mäta den faktiska synligheten av färgen mot den naturliga bakgrunden för alla relevanta synsystem. Som kan ses i figur 14 verkar färgskillnaden mellan de båda gröna färgerna vara större för biets öga än skillnaden mellan mörkgrön och orange. Att därför bara välja en, för det mänskliga ögat, lämplig grön färg i skogsmiljö kan få oönskade konsekvenser så som aggregation av insekter eller en ökad mängd fågelkollisioner med tornet, orsakade av skillnaderna i djurens färguppfattning.

Det finns två förklaringar till varför insekter uppehåller sig kring vindkraftverk. En anledning kan vara att de använder nacellen som föremål att svärma vid. Diptera och andra insekter har ett svärmsbeteende där individer av båda könen flyger i grupper ovanför uppräta föremål i landskapet (Downes 1989). En annan anledning till att insekter finns vid nacellen är om de under spridning följer med vinden på den höjd som nacellen har. En viktig fråga att studera är vilken av dessa två mekanismer som är viktigast för att förklara insekternas beteende kring vindkraftverk. Om insekterna som en del av sitt svärmsbeteende samlas kring den höga struktur som ett vindkraftverk utgör så blir åtgärder som minskar verkets synlighet viktiga. Man bör därför studera om insekter som anlockas till denna lodräta struktur följer strukturen uppåt för att sedan bilda en svärm ovanför objektet. Om insekterna har detta beteende så kan färgsättningen på nedre delen av kraftverket vara intressant att ändra. I dessa fall bör kraftverket målas i färger som har liten kontrast mot bakgrunden för de problematiska insektsgruppernas synsystem, både avseende spektral sammansättning och total reflektans.

7 Resultatredovisning

Uppsala Nya Tidning skrev en artikel om vårt blinkförsök år 2017 där JV, OH och examensarbetaren Caroline Nilsson blev intervjuade. <http://www.unt.se/nyheter/uppsala/sa-ska-det-raddas-fler-fladdermoss-4747526.aspx>

8 Tack

Göran Gullberg tillverkade försöksanordningarna. Gustaf Naeser assisterade i design och konstruktion av styrelektroniken till lamporna 2017. Anna Sandberg assisterade i fält och på labb. Joel Hallqvist bestämde tvåvingar och fjärilar. Caroline Nilsson genomförde experimentet 2017 som sitt examensarbete. Alfred Radu hjälpte till att bygga lampor 2017. Vita Manak assisterade i fält år 2017. Vi bodde hos Evy Victorsson under fältsäsongen 2016. Emma Håstad stöttade oss under lamptillverkningen 2016. Julia Österberg hjälpte oss till rätta vid Lövsta försöksstation.

9 Källförteckning

- Ahlén, I. 2003. Wind turbines and bats - a pilot study. Final report to the Swedish national energy administration 11 december 2003.
- Ahlén, I., m.fl. 2007. Fladdermöss och havsbaserade vindkraftverk studerade i södra Skandinavien.
- Anonymous. 2010. TSFS 2010: 155. Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om markering av föremål som kan utgöra en fara för luftfarten (konsoliderad elektronisk utgåva).
- Anonymous. 2013. Vindkraft. Rekommendationer för utmärkning. Sjö- och luftfartsavdelningen 2013-11-22.
- Barroso, A., m.fl. 2017. Effects of flickering light on the attraction of nocturnal insects. - *Lighting Research & Technology* 49: 100-110.
- Blake, D., m.fl. 1994. Use of lamplit roads by foraging bats in southern England. - *Journal of Zoology* 234: 453-462.
- Briscoe, A. D. & Chittka, L. 2001. The evolution of color vision in insects. - *Annual Review of Entomology* 46: 471-510.
- Cardé, R. T. 2003. Orientation. - I: Resh, V. H. & Cardé, R. T. (Red.), *Encyclopedia of insects*. Academic Press, pp. 823-827.
- Corten, G. P. & Veldkamp, H. F. 2001. Aerodynamics - Insects can halve wind-turbine power. - *Nature* 412: 41-42.
- de Jong, J., m.fl. 2019. Aktivitet av fladdermöss och insekter vid vindkraftverk. Slutrapport till Vindval Rapportnr 6902, 2019.
- Downes, J. A. 1969. Swarming and mating flight of Diptera. - *Annual Review of Entomology* 14: 271-&.
- Horn, J. W., m.fl. 2008. Behavioral responses of bats to operating wind turbines. - *Journal of Wildlife Management* 72: 123-132.
- Inger, R., m.fl. 2014. Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. - *Plos One* 9.
- Ishiwata, K., m.fl. 2011. Phylogenetic relationships among insect orders based on three nuclear protein-coding gene sequences. - *Molecular Phylogenetics and Evolution* 58: 169-180.
- Kunz, T. H., m.fl. 2007. Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. - *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 315-324.
- Leather, S. 2004. *Insect sampling in forest ecosystems*. Blackwell.

Long, C. V., m.fl. 2011. Insect attraction to wind turbines: does colour play a role? - *European Journal of Wildlife Research* 57: 323-331.

Rydell, J. 1992. Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. - *Functional Ecology* 6: 744-750.

Rydell, J., m.fl. 2010. Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration? - *European Journal of Wildlife Research* 56: 823-827.

Somers-Yeates, R., m.fl. 2013. Shedding light on moths: shorter wavelengths attract noctuids more than geometrids. - *Biology Letters* 9.

van Grunsven, R. H. A., m.fl. 2014. Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. - *Journal of Insect Conservation* 18: 225-231.

Warrant, E. J. 2017. The remarkable visual capacities of nocturnal insects: vision at the limits with small eyes and tiny brains. - *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 372: 13.

10 Appendix

Resultat från analyserna (ANOVA eller ANCOVA) av skillnader mellan behandlingarna i de fyra experimenten.

| Insektsgrupp | Faktor | F.g. | F-värde | p-värde |
|---------------------------|------------|------|---------|---------|
| Nattfärgsförsöket | | | | |
| Alla insekter | Behandling | 2,20 | 0.26 | 0.78 |
| Ordningar | | | | |
| Psocoptera | Behandling | 2,13 | 2.92 | 0.09 |
| Hemiptera | -"- | 2,13 | 0.21 | 0.81 |
| Thysanoptera | -"- | 2,16 | 1.25 | 0.31 |
| Neuroptera | -"- | 2,10 | 0.08 | 0.92 |
| Coleoptera | -"- | 2,14 | 3.49 | 0.06 |
| Lepidoptera | -"- | 2,20 | 11.34 | < 0.001 |
| Diptera | -"- | 2,20 | 0.11 | 0.90 |
| Hymenoptera | -"- | 2,19 | 1.08 | 0.36 |
| Dipterafamiljer | | | | |
| Cecidiomyidae | Behandling | 2,20 | 0.67 | 0.52 |
| Ceratopogonidae | -"- | 2,19 | 1.13 | 0.34 |
| Chironomidae | -"- | 2,20 | 0.71 | 0.50 |
| Culicidae | -"- | 2,16 | 1.58 | 0.24 |
| Limonidae | -"- | 2,16 | 0.27 | 0.77 |
| Mycetophilidae | -"- | 2,17 | 7.93 | 0.004 |
| Psychodidae | -"- | 2,17 | 3.93 | 0.04 |
| Sciaridae | -"- | 2,19 | 0.16 | 0.85 |
| Lepidopterafamiljer | | | | |
| Gelichidae | Behandling | 2,14 | 0.81 | 0.46 |
| Geometridae | -"- | 2,14 | 3.68 | 0.05 |
| Noctuidae | -"- | 2,19 | 4.55 | 0.02 |
| Pyralidae | -"- | 2,17 | 2.15 | 0.15 |
| Tortricidae | -"- | 2,17 | 5.36 | 0.02 |
| Blinkförsöket 2016 | | | | |
| Alla insekter | Behandling | 3,17 | 48.58 | < 0.001 |
| Ordningar | | | | |
| Psocoptera | Behandling | 3,11 | 0.01 | 0.99 |
| Hemiptera | -"- | 3,12 | 0.77 | 0.52 |
| Thysanoptera | -"- | 3,10 | 1.37 | 0.31 |
| Neuroptera | -"- | 3,9 | 0.89 | 0.48 |
| Coleoptera | -"- | 3,4 | 0.67 | 0.61 |
| Lepidoptera | -"- | 3,17 | 9.91 | < 0.001 |
| Diptera | -"- | 3,17 | 44.00 | < 0.001 |
| Hymenoptera | -"- | 3,17 | 1.40 | 0.28 |

| Dipterafamiljer | | | | |
|----------------------------|--------------------|------|-------|---------|
| Cecidiomyidae | Behandling | 3,17 | 14.44 | < 0.001 |
| Ceratopogonidae | -"- | 3,17 | 8.39 | 0.001 |
| Chironomidae | -"- | 3,17 | 27.17 | < 0.001 |
| Culicidae | -"- | 3,10 | 2.44 | 0.12 |
| Limonidae | -"- | 3,12 | 1.81 | 0.20 |
| Mycetophilidae | -"- | 3,11 | 0.85 | 0.50 |
| Psychodidae | -"- | 3,12 | 6.27 | 0.008 |
| Sciaridae | -"- | 3,13 | 2.43 | 0.11 |
| Lepidopterafamiljer | | | | |
| Gelichidae | Behandling | 3,8 | 1.98 | 0.19 |
| Geometridae | -"- | 3,7 | 0.73 | 0.57 |
| Noctuidae | -"- | 3,11 | 1.81 | 0.20 |
| Pyralidae | -"- | 3,16 | 3.46 | 0.04 |
| Tortricidae | -"- | 3,14 | 2.22 | 0.13 |
| Blinkförsöket 2017 | | | | |
| Diptera | Behandling | 5,28 | 9.30 | < 0.001 |
| | Behandling x Datum | 6,28 | 13.09 | < 0.001 |
| Lepidoptera | Behandling | 5,28 | 1.12 | 0.37 |
| | Behandling x Datum | 6,28 | 1.25 | 0.31 |
| Dagfärgsförsöket | | | | |
| Diptera | Behandling | 7,37 | 6.01 | < 0.001 |
| | Behandling x Datum | 7,37 | 2.35 | 0.04 |
| Hymenoptera | Behandling | 7,38 | 2.28 | 0.048 |
| | Behandling x Datum | 8,38 | 1.40 | 0.23 |

Insekters attraktion till färger och hinderbelysning på vindkraftverk

RAPPORT 6847

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-6847-9
ISSN 0282-7298

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

JONAS VICTORSSON, OLLE HÅSTAD, ANDERS ÖDEEN

Insekter som samlas vid vindkraftverk utgör föda för fladdermöss och vissa fågelarter. Det är antagligen flera faktorer som bestämmer hur mycket insekter som finns tillgängliga för fladdermöss och fåglar vid vindkraftverk.

Rapporten beskriver studier som har testat om blinkfrekvensen och färgsammansättningen av hinderbelysningen, samt färgen på vindkraftverken, kan påverka i vilken utsträckning insekter lockas till vindkraftverk.

Resultaten av blinkförsöken visade att ansamlingen av insekter minskade om lampan var tänd kortare tid per minut än den nuvarande blinkregimen.

Färgsammansättningen av hinderbelysningen kan inte på ett enkelt sätt ändras för att radikalt minska antalet insekter. Nuvarande sammansättning får anses vara bra. De LED-lamporna som testades lockade till sig flera djur.

När det gäller färgen på vindkraftverken, visade resultatet det skulle gå att minska anlockningen av insekter genom att måla nederdelen av tornen i rosa eller ljusgrönt. Detta skulle dock påverka synligheten för människor och är inte en lämplig åtgärd i alla miljöer.

Forskningsprogrammet Vindval samlar in, bygger upp och förmedlar fakta om vindkraftens påverkan på den marina miljön, på växter, djur, människor och landskap samt om människors upplevelser av vindkraftanläggningar. Vindval erbjuder medel till forskning inklusive kunskapssammanställningar och synteser kring effekter och upplevelser av vindkraft.

