



**Vlaanderen**  
is wetenschap

# Effecten van nachtelijke verlichting op biodiversiteit

## Een literatuurstudie voor beleidsonder- steuning

Daan Dekeukeleire, Ralf Gyselings, Luc De Bruyn

INSTITUUT  
NATUUR- EN BOSONDERZOEK

**Auteurs:**

Daan Dekeukeleire , Ralf Gyselings , Luc De Bruyn 

Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

**Reviewers:**

Dit rapport werd gereviseerd door de begeleidingsgroep

Het INBO is het onafhankelijk onderzoeksinstituut van de Vlaamse overheid dat via toegepast wetenschappelijk onderzoek, data- en kennisontsluiting het biodiversiteitsbeleid en -beheer onderbouwt en evalueert.

**Vestiging:**

Herman Teirlinckgebouw

INBO Brussel

Havenlaan 88 bus 73, 1000 Brussel

[vlaanderen.be/inbo](http://vlaanderen.be/inbo)

**e-mail:**

[daan.dekeukeleire@inbo.be](mailto:daan.dekeukeleire@inbo.be)

**Wijze van citeren:**

D Dekeukeleire, R Gyselings, L De Bruyn (2023). Effecten van nachtelijke verlichting op biodiversiteit. Een literatuurstudie voor beleidsondersteuning. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2023 (32).

DOI: <http://doi.org/10.21436/inbor.96637982>

**D/2023/3241/288**

**Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2023 (32)**

**ISSN: 1782-9054**

**Verantwoordelijke uitgever:**

Maurice Hoffmann

**Foto cover:**

Dunvlerkspanner (*Lycia hirtaria*) nabij verlichting - Gert Arijs

**Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van:**

de Provincie Antwerpen, de Provincie Oost-Vlaanderen, de Provincie West-Vlaanderen, de Provincie Vlaams-Brabant, de Provincie Limburg en het Interprovinciaal Kenniscentrum (IPKC)



Dit werk valt onder een [Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

**Auteurs:**

Daan Dekeukeleire , Ralf Gyselings , Luc De Bruyn 

Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

**Reviewers:**

Dit rapport werd gereviseerd door de begeleidingsgroep

Het INBO is het onafhankelijk onderzoeksinstituut van de Vlaamse overheid dat via toegepast wetenschappelijk onderzoek, data- en kennisontsluiting het biodiversiteitsbeleid en -beheer onderbouwt en evalueert.

**Vestiging:**

Herman Teirlinckgebouw

INBO Brussel

Havenlaan 88 bus 73, 1000 Brussel

[vlaanderen.be/inbo](http://vlaanderen.be/inbo)

**e-mail:**

[daan.dekeukeleire@inbo.be](mailto:daan.dekeukeleire@inbo.be)

**Wijze van citeren:**

D Dekeukeleire, R Gyselings, L De Bruyn (2023). Effecten van nachtelijke verlichting op biodiversiteit. Een literatuurstudie voor beleidsondersteuning. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2023 (32).

DOI: <http://doi.org/10.21436/inbor.96637982>

**D/2023/3241/288**

**Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2023 (32)**

**ISSN: 1782-9054**

**Verantwoordelijke uitgever:**

Maurice Hoffmann

**Foto cover:**

Dunvlerkspanner (*Lycia hirtaria*) nabij verlichting - Gert Arijs

**Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van:**

de Provincie Antwerpen, de Provincie Oost-Vlaanderen, de Provincie West-Vlaanderen, de Provincie Vlaams-Brabant, de Provincie Limburg en het Interprovinciaal Kenniscentrum (IPKC)



Dit werk valt onder een [Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

**EFFECTEN VAN NACHTELIJKE VERLICHTING OP  
BIODIVERSITEIT  
Een literatuurstudie voor beleidsondersteuning**

**Daan Dekeukeleire, Ralf Gyselings & Luc De Bruyn**

[doi.org/10.21436/inbor.96637982](https://doi.org/10.21436/inbor.96637982)

## Dankwoord

Deze studie kwam stand met de steun van vele mensen. In de eerste plaats willen we de begeleidingsgroep bedanken, in het bijzonder Mieke Hoogewijs en Dirk Vandenbussche. Vicky Desart en Ben Haeverans worden bedankt voor de administratieve en praktische ondersteuning. Verder zijn we zeer dankbaar aan de vele collega's binnen en buiten het INBO die enthousiast literatuur aanleverden en tips gaven, waaronder Dirk Maes, Koen Devos, Joris Everaert, Marc Pollet en Yana Yakushina. Petra Vyncke wordt bedankt voor alle tips en hulp om het onderwerp, en de resultaten van de studie naar een groter publiek te brengen. Tenslotte bedanken we de fotografen die foto's aanleverden, en Femke Batsleer voor taalkundige opmerkingen.



## Samenvatting

Lichtvervuiling is een onderschat milieuprobleem. België is één van de wereldwijde koplopers op vlak van nachtelijke buitenverlichting. De komende jaren wordt verwacht dat nachtelijke verlichting nog kan toenemen door een omschakeling naar led-verlichting. Dit komt omdat led-verlichting meestal meer licht uit het blauwe spectrum bevat, met kortere golflengtes, ook al is in principe elke lichtkleur mogelijk. De omschakeling naar led-verlichting biedt echter ook kansen, aangezien bij led-verlichting kleur, intensiteit en de duur van verlichting makkelijker aan te passen is dan bij oudere types lampen.

Om kritisch te kunnen evalueren waar en op welke manier aanpassingen nodig zijn aan nachtelijke verlichting, is een nodig te vertrekken van wetenschappelijke kennis. Het INBO stelde in 2019 een overzicht op van welke effecten van nachtelijk kunstlicht op vleermuizen beschreven waren in de wetenschappelijke literatuur, maar voor andere soortgroepen ontbrak een dergelijk overzicht. Bovendien zijn er sinds 2019 veel nieuwe studies verschenen. Daardoor was het moeilijk voor beleidsmakers om voor meerdere soortgroepen een overzicht te krijgen van het effect van nachtelijke verlichting.

Daarom werd de wetenschappelijke literatuur systematisch doorzocht naar studies over effecten van nachtelijke verlichting op biodiversiteit, waarbij bijzondere aandacht was voor effecten op soorten die belangrijk zijn in beleid (zoals Natura2000-soorten) en kennis rondom mitigatie. In dit rapport bespreken we de resultaten van deze literatuurstudie.

Eerst bespreken we gerapporteerde effecten op verschillende soortgroepen, namelijk insecten en overige ongewervelden, vogels, vleermuizen, overige zoogdieren, vissen, reptielen en amfibieën, en planten. Daarna bespreken we effecten overheen de verschillende soortgroepen en op ecosystemendiensten. Voor alle groepen werden negatieve effecten op individuele soorten gevonden, met afhankelijk van de groep, vooral effecten op gedrag of fysiologie. Effecten op populaties en gemeenschappen en effecten op interacties tussen soorten zijn voor de meeste groepen veel beperkter onderzocht, maar het is zeer waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook grote effecten heeft op deze niveaus.

Uit de literatuurstudie blijkt dat nachtelijke verlichting voor versnippering kan zorgen, en dat soorten van vochtige biotopen erg kwetsbaar zijn. Behoud van duisternis lijkt dus vooral in het buitengebied belangrijk, specifiek in natuurgebieden en in beek- en riviervalleien. Maar ook in stedelijk gebied, zoals rond verblijfplaatsen en vliegroutes van (gebouwbewonende) vleermuizen is het belangrijk duisternis te behouden.

Doordat effecten sterk soort-specifiek zijn, is er geen *'one-solutions-fits-all'*. Elke verlichting heeft namelijk effect op bepaalde soortgroepen, al vanaf een lage intensiteit (<1lux). Vaak is een gebied-specifieke aanpak nodig, maar we vermelden een aantal algemene stappen die gecombineerd moeten worden:

- (1) verlicht enkel waar nodig. Waar mogelijk kunnen alternatieven (zoals fluorescerende strips) gebruikt worden, en strooilight moet beperkt worden.
- (2) verlicht enkel wanneer nodig, bv. met dynamische verlichting die enkel aangeschakeld wordt op bepaalde uren of gestuurd via beweging.
- (3) gebruik de laagst mogelijke intensiteit.



(4) gebruik een aangepast kleurenspectrum, waarbij korte (blauwe) golflengtes vermeden worden.

## English abstract

Light pollution is an underestimated environmental problem. Belgium is one of the global leaders in artificial light at night. In the coming years, it is expected that artificial light at night may increase even more due to a switch to LED lighting. This is because LED lighting is usually more intense and contains more light in the blue spectrum, with shorter wavelengths, even though in principle any light color is possible. However, the switch to LED lighting also offers opportunities, since with LED lighting, color, intensity and duration of lighting can be adjusted more easily than with older types of lamps.

A critical evaluation of where and in what way adjustments are needed to nighttime lighting, should be based on the current scientific knowledge. INBO compiled an overview in 2019 of the effects of artificial light at night on bats, but such an overview for other species groups was lacking. Moreover, many recent studies have been published since 2019. This made it difficult for policymakers to obtain an overview of the effects of light pollution for multiple species groups, and critically evaluate and adjust light policy.

Therefore, the scientific literature was systematically screened for studies on artificial light at night on biodiversity, paying particular attention to effects on species of policy importance (such as Natura2000 species) and knowledge surrounding mitigation. In this report, we discuss the results of this literature review.

First, we discuss effects on different species groups, namely insects and other invertebrates, birds, bats, other mammals, fish, reptiles and amphibians, and plants. Then we discuss effects across species groups and on ecosystem services. For all groups, negative effects on individual species were reported with, depending on the group, mainly effects on behavior or physiology. Effects on population and community level and effects on species interactions have been much less studied for most groups, but it is very likely that artificial light also has major negative effects at these levels.

The literature review indicates that artificial light at night can be an important cause of fragmentation, and species of wetland biotopes are particularly vulnerable. Therefore conservation of darkness is especially important in the countryside, specifically in natural areas and in stream and river valleys. But also in urban areas, such as in the vicinity of roosts and commuting roosts of (building-dwelling) bats, it is important to preserve darkness.

Because effects are highly species-specific, there is no 'one-solution-fits-all'. In fact, the scientific literature indicates that all artificial light at night has effects on certain species groups, already from low intensities (<1lux). An area-specific approach is often needed, but we list some general steps that should be combined:

- (1) illuminate only where necessary. Where possible, alternatives (such as fluorescent strips) can be used, and stray light should be limited.
- (2) light only when needed. Dynamic lighting switched on only at certain hours or controlled by movement.
- (3) use the lowest intensity possible.
- (4) use an appropriate color spectrum, avoiding short (blue) wavelengths.



## Begeleidingsgroep

Deze literatuurstudie werd begeleid en nagelezen door een diverse groep experts en stakeholders, namelijk:

- Mark Alderweireldt – Provincie Oost-Vlaanderen
- Kris Boers – Natuurpunt Vleermuizenwerkgroep
- Jeroen De Landtsheer – Fluvius
- Vicky Desart – Interprovinciaal Kenniscentrum Milieu (IPKC)
- Veerle Herssens – Provincie Antwerpen
- Mieke Hoogewijs – Provincie Antwerpen
- Deneef Huig – Provincie Limburg
- Tine Mandonx – Agentschap voor Natuur en Bos
- René Meeuwis – Agentschap voor Natuur en Bos
- Marleen Moelants – Agentschap Wegen en Verkeer
- Friedel Pas – Leve(n)de Nacht vzw
- Robbert Schepers – Regionaal Landschap Schelde-Durme
- Dirk Vandenbussche – Provincie Antwerpen
- Bob Vandendriessche – Regionaal Landschap Houtland en Polders
- Stijn Vanderheiden – Leve(n)de Nacht vzw
- Frederik Vanlerberghe – Provincie Vlaams Brabant
- Joris Verhees – Provincie Limburg
- Wouter Vuylstek – Provincie West-Vlaanderen





## Inhoudstafel

Dankwoord .....	2
Samenvatting .....	3
English abstract.....	4
Begeleidingsgroep.....	5
1 Algemene Inleiding.....	9
1.1 Waarom deze literatuurstudie? .....	9
1.2 België koploper op vlak van lichtvervuiling .....	9
1.3 Bronnen van Lichtvervuiling en evolutie .....	10
1.4 Gehanteerde termen, definities, eenheden en afkortingen .....	14
1.4.1 Lichtkleur .....	14
1.4.2 Lichtintensiteit .....	18
2 Systematische Literatuurstudie .....	21
2.1 Inleiding.....	21
2.2 Onderzoeksvraag.....	22
2.3 Zoekstrategie en werkwijze .....	22
2.4 Kwaliteitscontrole en interpretatie van de data .....	25
3 Bespreking van de verschillende soortgroepen .....	27
3.1 Insecten en andere Geleedpotigen.....	27
3.1.1 Inleiding.....	27
3.1.2 Literatuur onderzoek .....	29
3.1.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele geleedpotigen.....	31
3.1.4 Effecten op Populaties, gemeenschappen en soortinteracties bij geleedpotigen	36
3.1.5 Effecten op Europees beschermde soorten geleedpotigen.....	39
3.1.6 Kennis rond mitigatie.....	39
3.2 Vogels.....	43
3.2.1 Inleiding.....	43
3.2.2 Literatuur onderzoek .....	44
3.2.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele vogels .....	46
3.2.4 Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten vogels	49
3.2.5 Effecten op Europees beschermde soorten .....	50
3.2.6 Kennis rond mitigatie.....	52
3.3 Vleermuizen .....	55
3.3.1 Inleiding.....	55
3.3.2 Literatuur onderzoek .....	56



3.3.3	Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele vleermuizen .....	58
3.3.4	Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten .....	61
3.3.5	Effecten op Europees beschermde soorten .....	63
3.3.6	Kennis rond mitigatie.....	65
3.4	Overige zoogdieren .....	69
3.4.1	Inleiding.....	69
3.4.2	Literatuur onderzoek .....	71
3.4.3	Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele zoogdieren.....	73
3.4.4	Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten .....	75
3.4.5	Effecten op Europees beschermde soorten .....	75
3.4.6	Andere effecten van nachtelijk licht .....	76
3.4.7	Kennis rond mitigatie.....	78
3.5	Amfibieën en reptielen .....	79
3.5.1	Inleiding.....	79
3.5.2	Literatuur onderzoek .....	80
3.5.3	Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele amfibieën en reptielen .....	83
3.5.4	Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten .....	86
3.5.5	Effecten op Europees beschermde soorten .....	86
3.5.6	Kennis rond mitigatie.....	87
3.6	Vissen .....	89
3.6.1	Inleiding.....	89
3.6.2	Literatuur onderzoek .....	90
3.6.3	Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele vissen.....	92
3.6.4	Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten .....	94
3.6.5	Effecten op Europees beschermde soorten .....	96
3.6.6	Kennis rond mitigatie.....	98
3.7	Planten .....	100
3.7.1	Inleiding.....	100
3.7.2	Literatuur onderzoek .....	101
3.7.3	Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele planten .....	103
3.7.4	Effecten van nachtelijk kunstlicht op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten .....	105
3.7.5	Effecten op Europees beschermde soorten .....	108
3.7.6	Kennis rond mitigatie.....	108
4	Samenvattende hoofdstukken .....	109
4.1	Effecten van nachtelijke verlichting op Ecosysteemdiensten .....	109
4.1.1	Inleiding.....	109



4.1.2	Literatuur onderzoek .....	110
4.1.3	Effecten van nachtelijk kunstlicht op ecosysteemdiensten .....	111
4.2	Synthese van de verschillende soortgroepen .....	115
4.2.1	Effecten op Individuen, populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten .....	115
4.2.2	Kwetsbare habitats en landschapseffecten .....	116
4.2.3	Mitigatie mogelijkheden .....	118
5	Aanbevelingen voor Beheer, Beleid en verder onderzoek .....	120
5.1	Aanbevelingen voor beheer en beleid .....	120
5.2	Onderzoeksnoden .....	122
5.2.1	Belangrijke open vragen .....	122
5.2.2	Aangewezen methodiek .....	126
6	Bijlage .....	128
7	Referenties.....	129



# 1 ALGEMENE INLEIDING

Deze inleiding is een gemeenschappelijke inleiding met het rapport over de literatuurstudie naar effecten van verlichting op gezondheid door het Provinciaal Instituut voor Hygiëne (PIH).

## 1.1 WAAROM DEZE LITERATUURSTUDIE?

Zowel in steden als op het platteland is er massaal buitenverlichting geplaatst. De vervuiling van de natuurlijke duisternis met kunstlicht blijkt grote en onvermoede negatieve gevolgen te hebben voor de gezondheid van dieren en planten. Ook zijn er wetenschappelijke studies die een verband suggereren met tal van ziektes bij de mens. De recente en toekomstige omschakeling naar LEDkunstlicht, die gebeurt in het kader van energiebesparing, zou de negatieve gevolgen nog vergroten. De wetenschappelijke literatuur hierover werd echter nog niet op een gestructureerde manier doorzocht en geïnterpreteerd.

De omschakeling naar led-kunstlicht brengt ook opportuniteiten mee. Daardoor is er een momentum om kritisch te evalueren welke lichtpunten aangepast of verwijderd kunnen worden op basis van huidige maatschappelijke noden en wetenschappelijke kennis over de negatieve gevolgen. Er zijn nog meer keuzes te maken wanneer er omgeschakeld wordt naar led-verlichting: bij gebruik van specifieke installatie en technieken kan led-verlichting aangestuurd worden vanop afstand (bv. aan- en uitschakelen, verandering van intensiteit zoals dimmen en versterken, sommige led-lampen kunnen van kleur wijzigen).

De vijf Vlaamse provincies en het interprovinciaal kenniscentrum (IPKC) ondersteunen daarom twee literatuurstudies: één naar gezondheidseffecten bij de mens en één naar effecten op biodiversiteit. Het doel is om uit de literatuurstudies wetenschappelijk onderbouwde adviezen te kunnen geven rond nachtelijk kunstlicht om de gezondheid van mens en soorten maximaal te beschermen (bv. de positie van nieuwe openbare led-verlichting, het soort armatuur, de lichtkleur, de intensiteit van de verlichting, en het al dan niet inzetten van slimme verlichting).

## 1.2 BELGIË KOPLOPER OP VLAK VAN LICHTVERVUILING

Door de massale plaatsing van nachtelijk kunstlicht over de laatste 100 jaar wordt de natuurlijke duisternis verstoord. We spreken daarom van ‘lichtvervuiling’. Falchi en collega’s ontwikkelden ‘the world atlas of artificial sky brightness’<sup>1</sup> om de ernst van lichtpollutie te kwantificeren. Het niet meer kunnen zien van de melkweg is een maatstaf om de ernst aan te geven. Dat is voor 60% van de Europese bewoners het geval. België, en zeker Vlaanderen, springt er op kaarten die lichtvervuiling weergeven sterk uit ten opzichte van Europa en de rest van de wereld (zie **Figuur 3** en **Figuur 4**). België deelt met Koeweit de zesde plaats op de wereldwijde ranking van aandeel landoppervlakte met een niet-zichtbare melkweg (m.n. 51% van het Belgische territorium), na Singapore, San Marino, Malta, West Bank en Qatar. Op deze kaarten is de verleding nog niet zichtbaar, aangezien de atlas gemaakt is op basis van data tussen 2007 en 2016 en led-verlichting pas in 2015 zijn intrede deed in de openbare verlichting in Vlaanderen. Dit gebeurde eerst traag en vanaf 2017 werd dit standaard toegepast bij het plaatsen van nieuwe armaturen voor vrij liggende fietspaden, woonwijken, landelijke wegen en dergelijke. De verleding die over heel Europa verloopt, zorgt voor een ander lichtspectrum (grotere emissie van golflengtes in het blauwe spectrum)<sup>2</sup>.

### 1.3 BRONNEN VAN LICHTVERVUILING EN EVOLUTIE

Nachtelijk kunstlicht wordt geplaatst om de zichtbaarheid voor mensen te verhogen. Zo wordt openbare verlichting, verlichting van industrie, KMO, sport-, parkeer- en privéterreinen geplaatst met de bedoeling om ongevallen bij nachtelijk werk of tijdens verplaatsingen te voorkomen. Daarnaast worden ook sociale redenen aangehaald voor het gebruik van nachtelijke verlichting, namelijk om (het gevoel van) veiligheid te verhogen m.b.t. criminaliteit<sup>3</sup> of omwille van de sfeer. Verder wordt nachtelijk kunstlicht o.a. ook gebruikt in de landbouw om de efficiëntie te verhogen (bv. serres...) en in de horeca en retail sector ter ondersteuning van reclame.

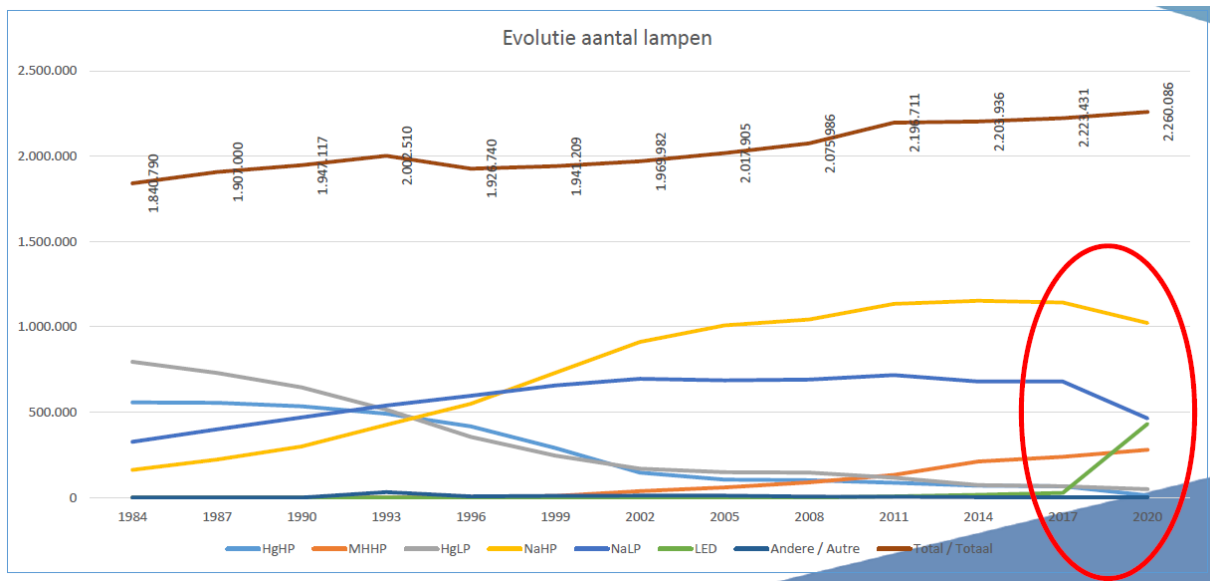
Recentelijk is er een **omschakeling** bezig van oudere types lampen naar **led-verlichting**. Dit is zowel het geval voor particuliere verlichting, arbeid gerelateerde verlichting als openbare verlichting. Voor openbare verlichting zijn er cijfers beschikbaar over deze omschakeling.

De Vlaamse Regering besliste in 2019 om tegen 2030 alle openbare verlichting om te schakelen naar led-verlichting. Ten opzichte van de vroeger geplaatste openbare verlichting (zoals natriumlampen, hogedrukkwiklampen, fluorescentielampen of metaalhalogenide lampen) is led-verlichting energie-efficiënter wanneer ze wit licht uitzenden. Bij gebruik van specifieke installatie en technieken kan led-verlichting eenvoudiger aangestuurd worden, soms ook vanop afstand (bv. aan- en uitschakelen, verandering van intensiteit zoals dimmen en versterken, sommige led-lampen kunnen van kleur wijzigen). Wit licht, zoals vaak gebruikt bij led-lampen, geeft de weggebruiker een duidelijker zicht in het donker, doordat kleuren beter waar te nemen zijn door mensen. Dit witte licht bevat echter veel licht uit het blauwe spectrum.

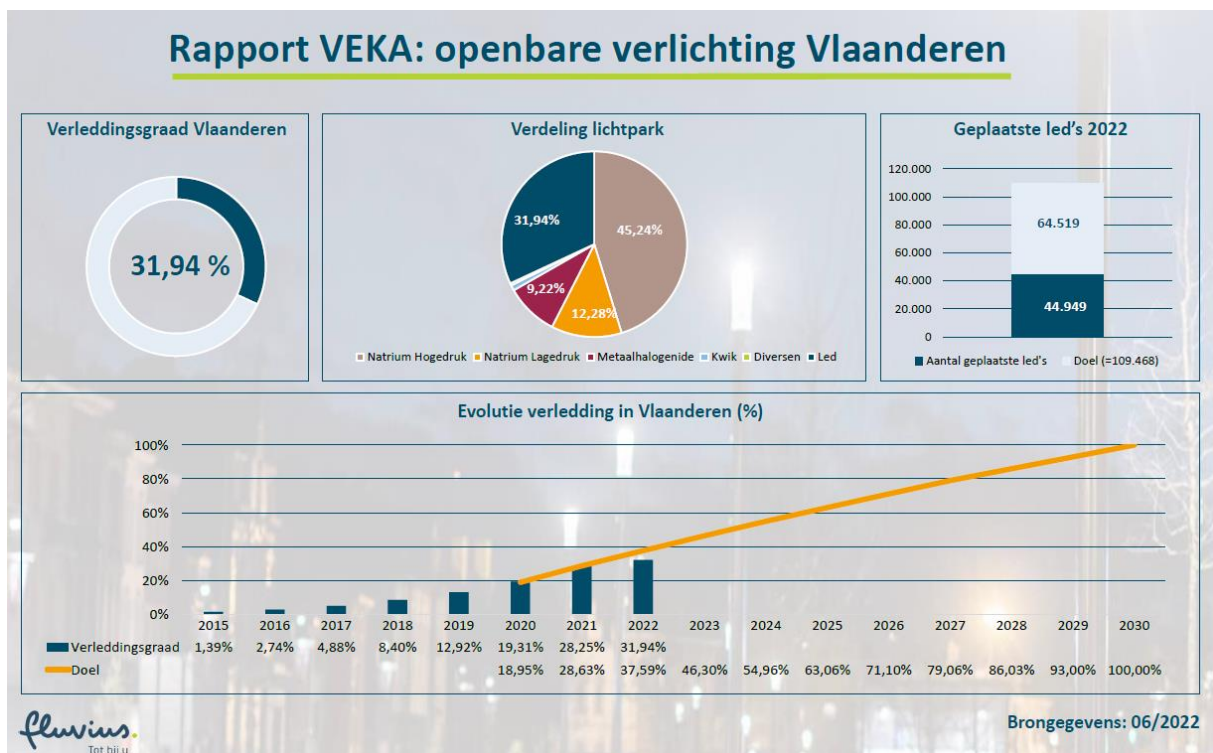
De verleding van de openbare verlichting is al volop bezig. Figuur 1 toont de evolutie van het aantal openbare lampen in België per type verlichtingsbron tot 2020. In de jaren '90 zien we een daling van de hoge- en lagedruk kwikdamplampen (HGHP en HGLP) en een stijging van de natrium hogedruk lampen (NAHP). Vanaf 2000 komen de metaalhalogenide lampen op, al blijft hun aandeel beperkt ten opzichte van andere verlichtingsbronnen. Tussen 2015 en 2017 komen de eerste led-lampen, maar pas vanaf 2017 is een duidelijke stijging te zien. Verder zijn er **steeds meer openbare verlichtingsbronnen bijgeplaatst** (bruine lijn, 'totaal'), met in 2020 een totaal aantal van 2.260.086.

Kijken we enkel naar Vlaanderen, dan toont **figuur 2** de evolutie van de verleding tot juni 2022, met op dat moment een verledingsgraad van 32%.



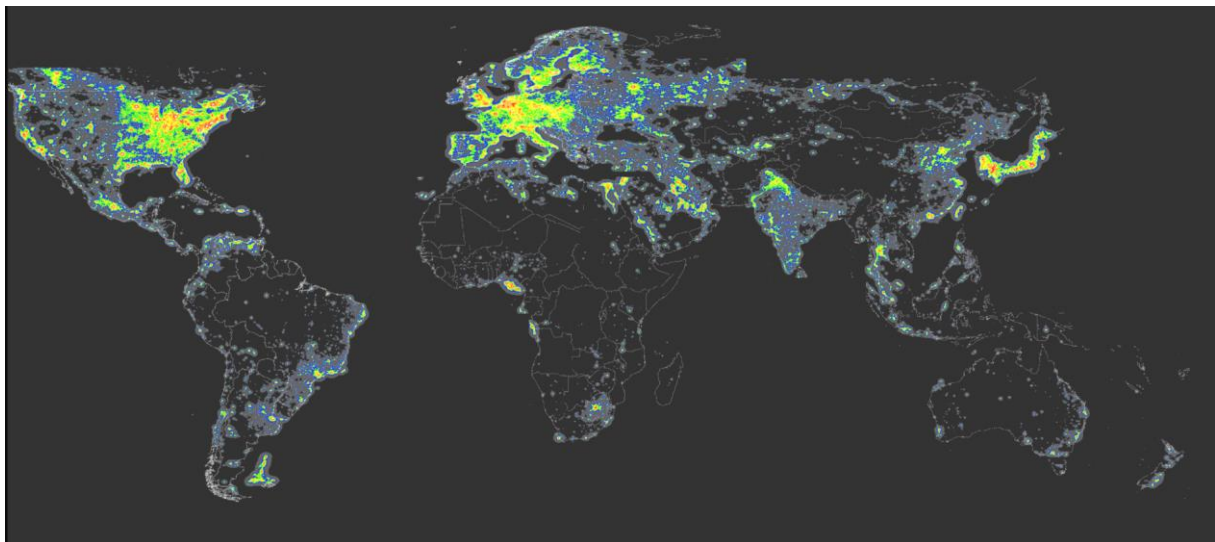


Figuur 1: Evolutie aantal openbare lampen in België per type verlichtingsbron van 1984 tot 2020. HgHP= kwikhogedruk lampen; MHHP=metaalhalogenide lampen; HgLP=kwiklagedruk lampen; NaHP=natrium hogedruk lampen, NaLP=natrium lagedruk lampen; LED=light emitting diodes. (bron: Belgisch Instituut voor Verlichtingskunde, figuur uit presentatie 'Driejaarlijks overzicht 2020 Openbare verlichting in België').

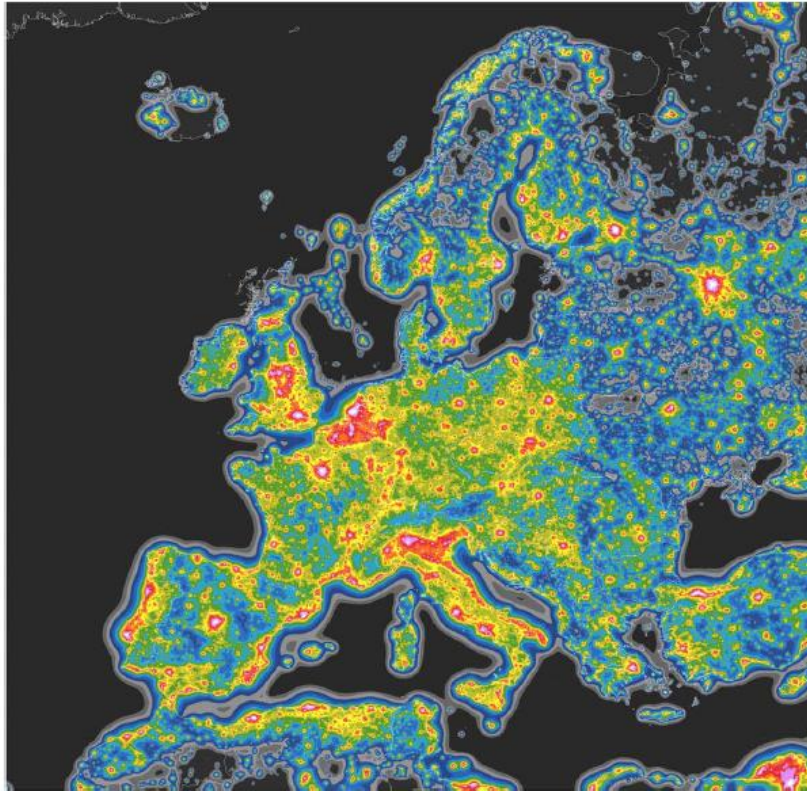


Figuur 2: Bovenaan: aandeel led-verlichting Vlaanderen in juni 2022. Onderaan: Evolutie van de verledingsgraad in Vlaanderen. Nota: voor openbare verlichting beheerd door Fluvius.

In Vlaanderen wordt openbare verlichting van gewestwegen en autostrades geplaatst en beheerd door het Agentschap Wegen en Verkeer. Lokale wegen worden beheerd door lokale besturen. Bij de overgang in Vlaanderen naar led-verlichting tegen 2030 kunnen gemeentes het eigendom van verlichting bij lokale wegen overdragen aan de distributienetbeheerder. Bij de verledning komen heel wat keuzes kijken: de mogelijkheid tot dimmen of doven, de lichtkleur van nieuwe led-lampen en het soort armaturen. Ook is het een opportuniteit om kritisch te kijken naar de huidige openbare verlichting, en of die nog aangepast is aan huidige maatschappelijke noden en wetenschappelijke kennis. Men kan evalueren of de posities van lichtpunten nog goed zijn, of er lichtpunten geschrapt kunnen worden en of er zaken kunnen gewijzigd worden waarover klachten van burgers binnen kwamen (teveel of te weinig licht). Daarbij is er een nood aan adviezen voor de gemeenten zodat ze hierover beslissingen kunnen nemen. Ook hier speelt Fluvius een belangrijke rol.



Figuur 3: Kaart van de wereld met artificiële hemelhelderheid in V-band, als een ratio ten opzichte van natuurlijke hemelhelderheid (verondersteld om  $174 \mu \text{ cd/m}^2$  te zijn). Bron: 'the world atlas of artificial sky brightness'<sup>1</sup>



Figuur 4: Kaart van de wereld met artificiële hemelhelderheid in V-band, als een ratio ten opzichte van natuurlijke hemelhelderheid (verondersteld om  $174 \mu\text{cd/m}^2$  te zijn). Bron: 'the world atlas of artificial sky brightness'<sup>1</sup>

Lichtpollutie heeft negatieve gevolgen op biodiversiteit. Ook zijn er wetenschappelijke studies die een verband suggereren met tal van ziektes bij de mens. De wetenschappelijke literatuur hierover werd echter nog niet op een gestructureerde manier doorzocht en geïnterpreteerd. Het interprovinciaal kenniscentrum (IPKC) ondersteunt daarom twee literatuurstudies: één naar gezondheidseffecten bij de mens en één naar effecten op biodiversiteit. Het doel is om op basis van de literatuurstudies wetenschappelijk onderbouwde adviezen te kunnen geven rond het plaatsen van openbare verlichting om de gezondheid van mens en soorten maximaal te beschermen (bv. de positie van nieuwe openbare led-verlichting, het soort armatuur, de intensiteit van de verlichting, en het al dan niet inzetten van slimme verlichting).





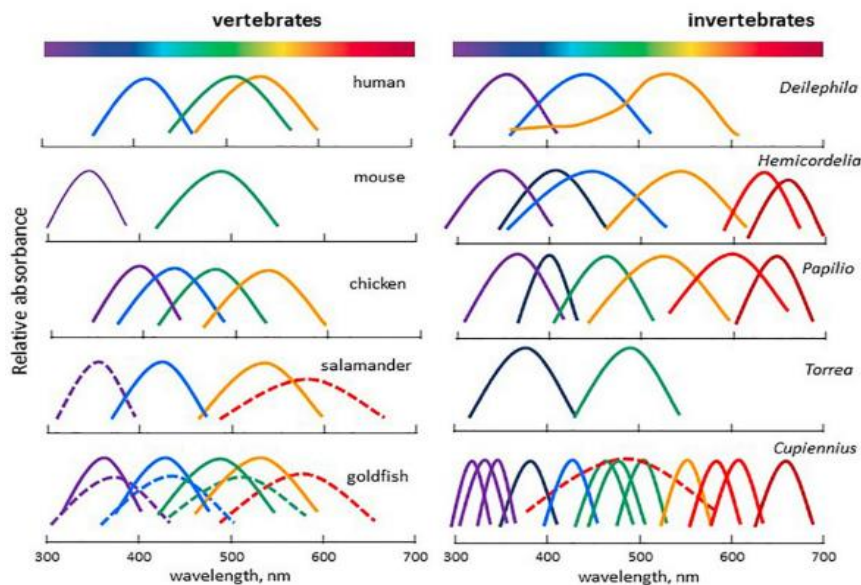
## 1.4 GEHANTEERDE TERMEN, DEFINITIES, EENHEDEN EN AFKORTINGEN

Er zijn **twee variabelen** die licht beschrijven die erg belangrijk zijn in deze literatuurstudies, namelijk **lichtkleur en lichtsterkte**. Daarnaast heeft licht ook nog andere eigenschappen, zoals polarisatie (trillingsrichting), die minder relevant zijn voor deze literatuurstudies.

### 1.4.1 Lichtkleur

De kleur van licht is een belangrijke eigenschap die het effect ervan op biodiversiteit en op de mens mee bepaalt. De kleur van licht wordt bepaald door de relatieve verdeling en het gewicht van verschillende golflengtes waaruit het licht is samengesteld. Daarnaast bepaalt ook het type fotoreceptoren van de diersoort hoe de kleur gezien wordt. Een voorbeeld van zo'n fotoreceptoren zijn de staafjes en kegeltjes in het netvlies van het oog bij mensen.

Rood licht bestaat uit lange golflengtes, terwijl blauw licht uit korte golflengtes bestaat. Deze golflengtes worden gemeten in nanometer (nm). Mensen kunnen licht waarnemen tussen 380 nm en 780 nm. Deze range wordt dan ook het visuele spectrum genoemd. Maar het spectrum dat soorten kunnen zien is erg soortspecifiek (zie ook **Figuur 5**).



Figuur 5: gevoeligheid van een aantal soorten voor verschillende golflengtes, van blauw (korte golflengtes) tot rood licht (lange golflengtes). Soorten hebben andere fotoreceptoren die een piek-gevoeligheid hebben voor andere golflengtes. Soorten: Mens (*Homo sapiens*), Huismuis (*Mus musculus*), Kip (*Gallus domesticus*), salamander (*Salamandra*), Goudvis (*Carassius auratus*), Pijlstaart (nachtvlinder) (*Deilephila elpenor*), Libel (*Hemicordulia tau*), dagvlinder (*Papilio xuthus*), ringworm (*Torrea candida*), nachtactieve spin (*Cupiennius salei*). (Figuur uit<sup>4</sup>)

Verschillende lichtbronnen geven licht met verschillende golflengtes uit het spectrum, en worden daardoor waargenomen in een ander kleur. In **Tabel 2** wordt voor verschillende veelgebruikte lamptypes weergegeven hoe mensen de kleur zien, hoe breed het spectrum is en of ze ook licht uit het ultraviolet deel van het spectrum uitstralen. Figuur 6 toont de verdeling van verschillende golflengtes waaruit het licht van veelgebruikte lamptypes is samengesteld.



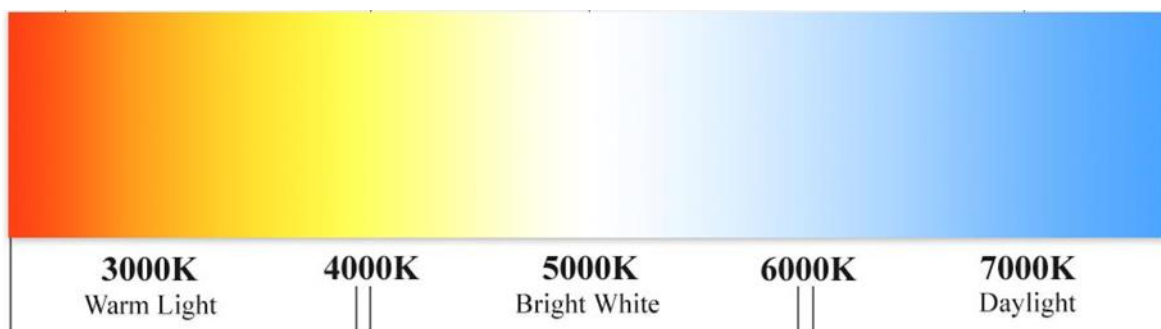
Tabel 1: Lichteigenschappen van verschillende veelgebruikte lamptypes (naar <sup>5</sup>)

Type	Kleur (hoe mensen het zien)	Spectrum	Ultraviolet?
Lage Druk Natriumlamp	Geel-oranje	Nauw spectrum	Nee
Hoge druk natriumlamp	Geel-oranje	Breed spectrum	Beperkt
Led (light-emitting diodes)	Elke kleur mogelijk, maar bevat meestal meer blauw licht dan natriumlampen	Breed spectrum	Nee
Kwikdamplamp	Blauw-wit	Gemiddeld spectrum	Ja
Metaal-Halide lamp	Blauw-wit	Breed spectrum	Ja (minder dan kwikdamp)
Fluorescentielamp (TL-lamp)	Blauw-wit	Breed spectrum	Ja (minder dan kwikdamp)



Lichtkleur wordt vaak uitgedrukt in een **spectrum** (bv. 400-470 nm), maar soms ook in de **piek van het spectrum** (bv. piek 350 nm). Daarnaast wordt soms de term kleurtemperatuur gebruikt. **Kleurtemperatuur** (Correlated Colour Temperature (CCT)), **uitgedrukt in Kelvin (K)** is een ruwe voorstelling van de kleur van licht in één getal. Deze maat wordt vooral gebruikt bij licht- en lampdesign. Lichtbronnen met een gelijkaardige kleurtemperatuur kunnen echter toch een verschillend spectrum hebben, en de maat wordt daarom minder gebruikt in wetenschappelijke studies. Ondanks deze tekortkoming kan het wel een nuttige maat zijn in beleid en wordt de maat af en toe gebruikt in deze rapporten.

Blauwachtig licht (korte golflengte) heeft een hogere kleurtemperatuur. Roodachtig licht (langere golflengte) heeft een lagere kleurtemperatuur. Warm licht is ongeveer 2700 K, neutraal wit licht ongeveer 4000 tot 5000 K en blauwachtig wit licht is 6000 K (zie **Figuur 6**).



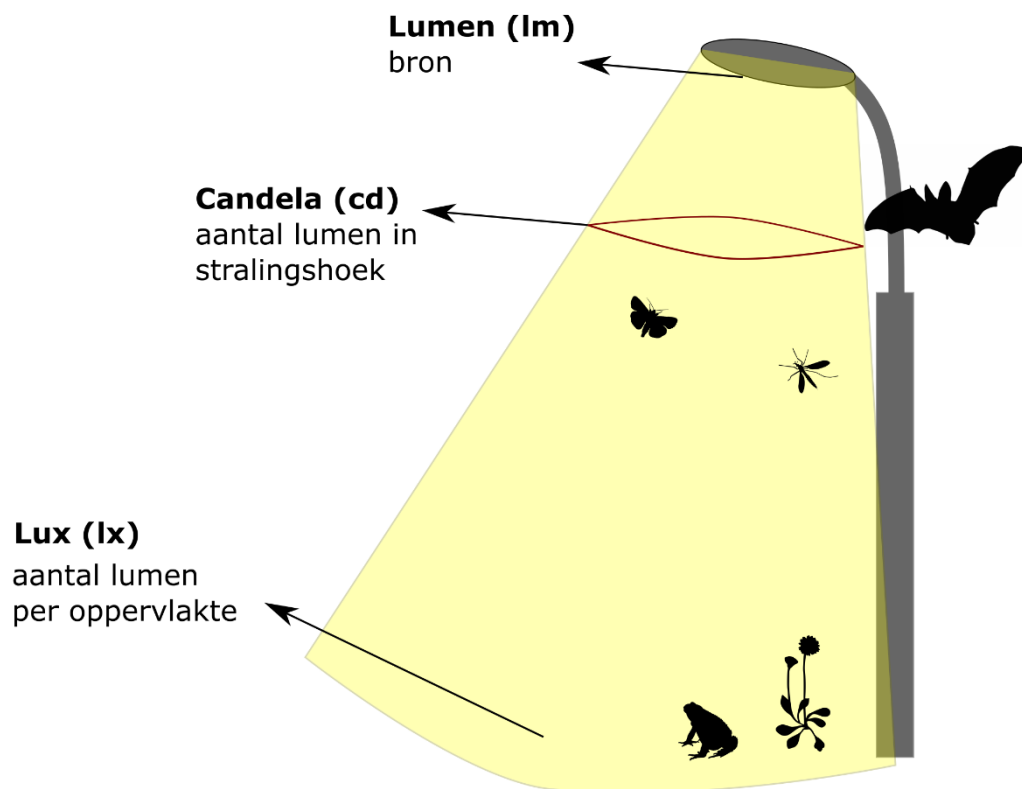
Figuur 6: Kleurtemperatuurschaal, uitgedrukt in Kelvin. (bron: <https://ultra-vision.com.au/>; creative common license)



### 1.4.2 Lichtintensiteit

Lichtintensiteit, of de sterkte van het licht, is naast kleur een belangrijke eigenschap die het effect van licht op biodiversiteit en de mens mee kan bepalen. In de wetenschappelijke literatuur worden verschillende maten gebruikt, soms door elkaar, wat het vergelijken van studies niet altijd eenvoudig maakt. **Tabel 2** en **Figuur 7** geven een overzicht van de eenheden, die ook in dit rapport gebruikt worden. Een belangrijke opmerking hierbij is dat deze waarden gebaseerd zijn op menselijke lichtgevoeligheid, en daarom niet altijd overeenkomen met wat dieren als sterk verlicht kunnen ervaren als ze voor andere golflengtes gevoelig zijn (zie ook **Figuur 5**). Een andere opmerking ter interpretatie bij **Figuur 7**: stel dat je de lichtbundel verdubbelt, dan heeft een dubbele lichtbundel een grotere lichtstroom (in lumen) maar dezelfde lichtsterkte (in candela) als een enkele lichtbundel.

**Figuur 8** toont visueel hoe de verlichtingssterkte van straatverlichting en helderheid van de nachthemel ten gevolge artificiële verlichting ('skyglow') zich verhoudt tot die van natuurlijke lichtbronnen.



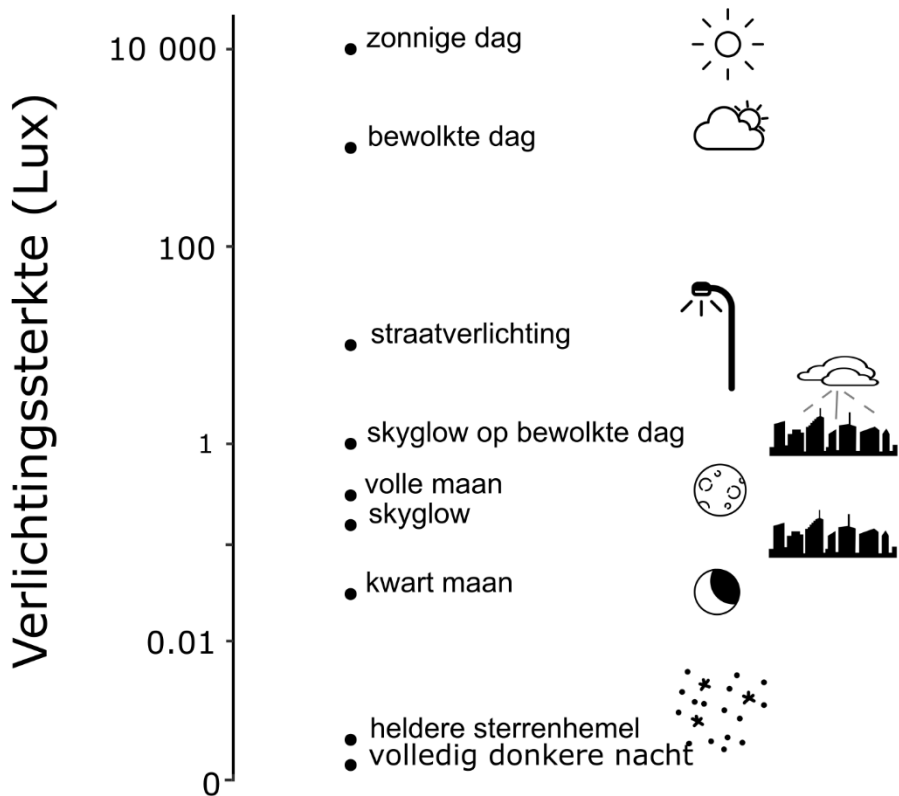
Figuur 7: Grafische uitleg van de verschillende maten voor lichtintensiteit: verlichtingssterkte (in lux; lx (of lumen/m<sup>2</sup>), lichtsterkte (in candela; cd) en lichtstroom (in lumen; lm).

Tabel 2: eenheden voor lichtintensiteit

Naam	Korte uitleg	Eenheid	omzetting	opmerkingen
Lichtsterkte (luminositeit)	Hoeveelheid licht die door een lichtbron in een bepaalde richting uitgestraald wordt. (=stralingshoek = steradiaal=sr). Dit is een maat voor lichtdichtheid.	Candela (Cd)	1 cd = 1 lm/1 sr	Eigenschap van een lichtbron
Lichtstroom	Hoeveelheid zichtbaar licht die door een lichtbron per tijdseenheid uitgestraald wordt. Deze maat is afhankelijk van het vermogen van de bron en de kleur van het licht.	Lumen (lm)	1 lm = 1 cd · sr = 1 cd x 1 sr	Eigenschap van een lichtbron
Verlichtingssterkte (illuminantie)	Ontvangen lichthoeveelheid per oppervlakte-eenheid	Lux (lx)	1 lx = 1 lm / m <sup>2</sup>	Eigenschap van een omgeving, licht kan afkomstig zijn van meerdere lichtbronnen.
Bestralingssterkte per stralingshoek	Vermogen per oppervlakte-eenheid per ruimtehoek	Watt / m <sup>2</sup> / sr		Deze maat wordt voornamelijk gebruikt bij satellietbeelden, en is niet makkelijk om te zetten naar andere maten.

*Nota: deze eenheden zijn gebaseerd op menselijke lichtgevoeligheid, en komen daarom niet altijd overeen met wat dieren als sterk verlicht kunnen ervaren als ze voor andere golflengtes gevoelig zijn.*





Figuur 8: Vergelijking van de verlichtingssterkte van straatverlichting en skyglow met die van natuurlijke lichtbronnen (gebaseerd op <sup>6</sup>). Let op het gebruik van een logaritmische schaal.

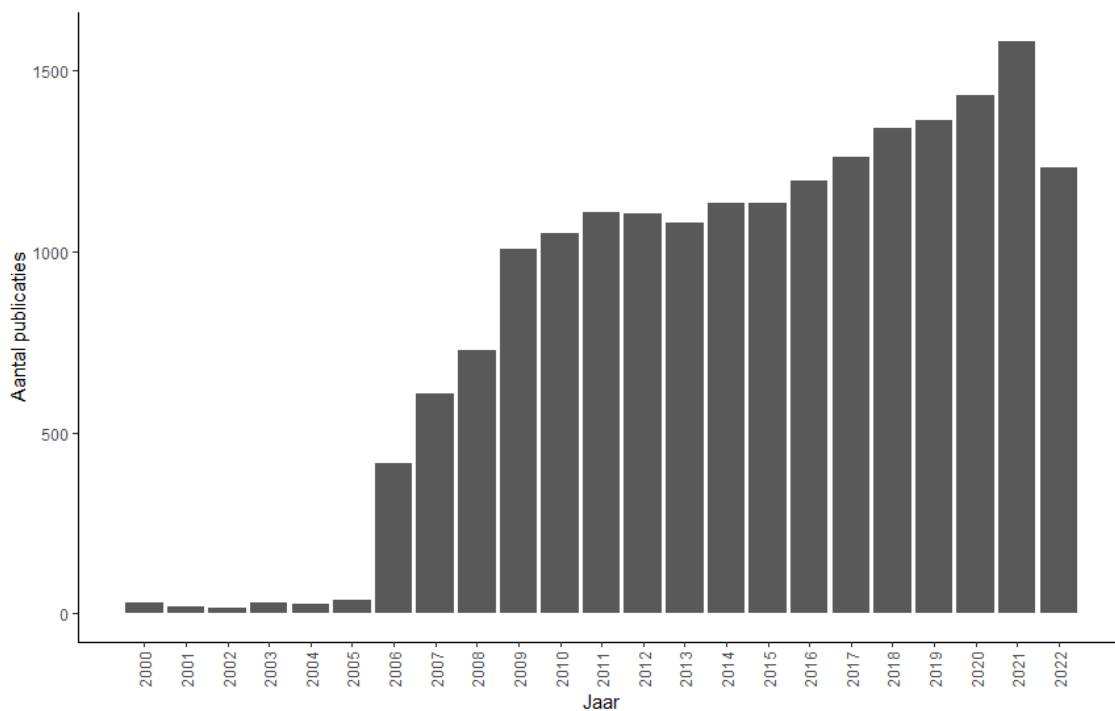


## 2 SYSTEMATISCHE LITERAATUURSTUDIE

### 2.1 INLEIDING

Nachtelijke verlichting is een relatief recent fenomeen, en de effecten op dieren en planten kregen pas de laatste jaren meer en meer wetenschappelijke aandacht. Wetenschappelijke studies hiernaar namen dan ook sterk toe (zie **Figuur 9**). Door deze grote hoeveelheid studies is het moeilijk om een goed overzicht te krijgen van de huidige wetenschappelijke kennis. Een literatuurstudie is dan ook aangewezen. Er zijn **verschillende methodes van literatuurstudie**, zoals een gewone literatuurstudie, systematische reviews, en meta-analyses. In dit geval kozen we voor een **systematische review**. Bij deze methode wordt op een formele en vooraf bepaalde manier de literatuur doorzocht en studies geselecteerd. Op deze manier is de studie herhaalbaar in de toekomst. Dergelijke reviews vertrekken steeds van een onderzoeksvraag en rapporteren duidelijke en eenduidige criteria voor de in- of exclusie van studies.

Soms wordt een systematische literatuurstudie gecombineerd met een meta-analyse, een methode waarbij statistische resultaten van verschillende studies gecombineerd worden in een nieuwe, samenvattende analyse. Bij het begin van de studie werd ingeschat dat een meta-analyse niet mogelijk was gezien het beperkte aantal studies per groep.



Figuur 9: aantal wetenschappelijke publicaties per jaar op de databank van Web of Science. Zoekterm: zie tabel 3 (algemeen deel), onderzoeksvelden: *ecology and environmental science, biodiversitiy conservation, evolutionary biology, plant sciences, zoology en entomology..*



## 2.2 ONDERZOEKSVRAAG

In deze literatuurstudie wordt **het effect van nachtelijk kunstlicht op biodiversiteit** onderzocht. Hiervoor doorzochten we de literatuur **per taxonomische groep**: (1) insecten en andere geleedpotigen, (2) vogels, (3) vleermuizen, (4) zoogdieren (exclusief vleermuizen), (3) vogels, (4) amfibieën en reptielen, (5) vissen, (6) planten. Per soortgroep bespreken we de **effecten op activiteit en gedrag, fysiologie, de effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten** en tenslotte **de huidige kennis rond mitigatie**.

## 2.3 ZOEKSTRATEGIE EN WERKWIJZE

We begonnen onze zoekstrategie door wetenschappelijke studies te verzamelen uit de **Web of Science** databank (<https://www.webofscience.com>), een commerciële multidisciplinaire databank van wetenschappelijke vakliteratuur. Per soortgroep of thema werd een specifieke zoekterm gebruikt (zie **Tabel 3** voor een overzicht). Verder werden bijkomende relevante artikels geselecteerd uit de referentie-lijsten van studies (*'snowballing'*) en uit de lijst van de studies die naar deze artikels verwezen (*'reverse snowballing'*). Voor dit laatste werd ook gebruik gemaakt van **Google Scholar** (<https://scholar.google.com>), om ook **grijze literatuur**<sup>A1</sup> te selecteren (maar door de methode enkel grijze literatuur die bronnen gebruikt).

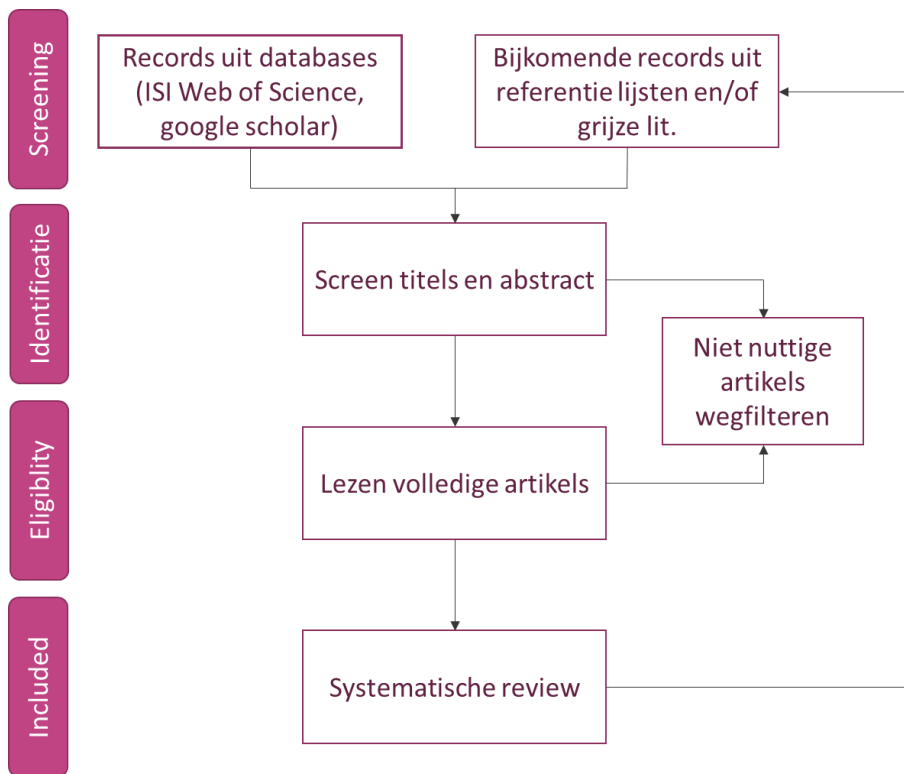
Bijkomend werd ook gebruik gemaakt van twee andere belangrijke bijkomende bronnen. In de eerste plaats gaf het **boek 'Ecological Consequences of Artificial Night Lighting'**<sup>7</sup> uit 2006 een aantal thematische overzichten. Deze bron gebruikt veelal oudere literatuur die niet steeds makkelijk te vinden was met de eerder beschreven methode. Verder zochten we bijkomende studies via de databank van **Conservation evidence** (<https://www.conservationevidence.com>), een project van de Universiteit van Cambridge (Groot-Brittannië) met samenvattingen van wetenschappelijke literatuur over de resultaten van natuurbeschermingsacties.

**Figuur 10** geeft een systematisch overzicht van de zoek en selectiemethode. Gevonden artikels werden eerst gescreend op titel en abstract (samenvatting). Relevante artikels werden verder bekeken en volledig gelezen. Volgende criteria werden hierbij in acht genomen:

- De studie gaat over nachtelijke verlichting
- De studie is relevant voor wild-levende soorten of realistische situaties (dus geen studies over huisdieren, vee of landbouwgewassen.
- De studie is relevant voor soorten die inheems zijn in België
- De kwaliteit van de studie is aanvaardbaar (bv. steekproefgrootte, studie-opzet, adequate data-analyse)

---

<sup>A1</sup> Onder 'grijze literatuur' verstaan we artikels die niet opgenomen zijn in de traditionele databanken van wetenschappelijke vaktijdschriften. Voorbeelden zijn rapporten, beleidsstudies, doctoraats- of masterscripties, conferentiebijdragen.



Figuur 10: systematische voorstelling van de zoekmethode, selectie en verwerking.



Tabel 3: Zoektermen per soortgroep of thema gebruikt in Web of Science. De zoekterm bestond uit twee delen: een deel dat altijd hetzelfde was over Nachtelijke verlichting en een specifiek deel per soortgroep of thema. Er werd hierbij gebruik gemaakt van operatoren: AND betekent dat beide termen (aangeduid met ") aanwezig moesten zijn; OR betekent dat één van de termen aanwezig moest zijn; haakjes bepalen volgorde; \* is een 'wildcard' die voor elk ander karakter kan staan.

Soortgroep of thema	Zoektermdeel over nachtelijke verlichting	Specifiek zoektermdeel	Datum
Insecten en andere geleedpotigen	("Light Pollution" OR "Artificial Light at Night" OR "ALAN" OR "Night Light*") AND ...	... ("Insect*" OR "Insecta" OR "Arthropod*" OR "Arthropoda")	15 januari 2023
Amfibieën en Reptielen		... ("Amphibian*" OR "Amphibia" OR "Reptile*" OR "Reptilia")	15 januari 2023
Vogels		... ("Bird*" OR "Aves")	15 januari 2023
Zoogdieren		... ("Mammal*" OR "Mammalia")	15 januari 2023
Vleermuizen		... ("Bat*" OR "Chiroptera")	15 januari 2023
Planten		... ("Plant*" OR "Plantae" OR "Vegetation*")	15 januari 2023
Ecosysteemdientsten		... ("Ecosystem service*" OR "Ecosystem function*")	15 maart 2023



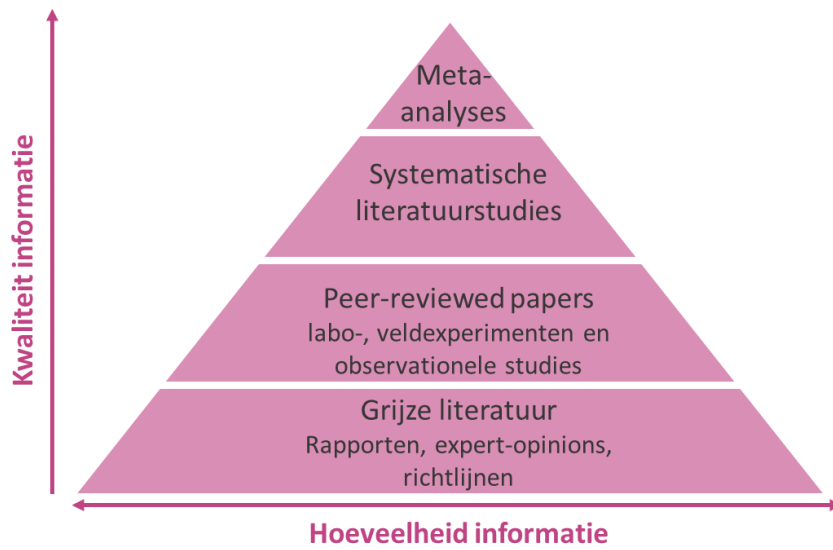
## 2.4 KWALITEITSCONTROLE EN INTERPRETATIE VAN DE DATA

Geselecteerde artikels werden gelezen en geïnterpreteerd, en er werd een **synthese** opgesteld. In deze synthese wordt gerefereerd naar een selectie van bronnen (sommige studies werden enkel gelezen maar er wordt niet naar verwezen in de teksten). Hierbij werd bijzondere aandacht geschonken aan **overeenkomstige resultaten** (bv. gelijkaardige effecten van een bepaalde lichtkleur gevonden in meerdere studies) en **tegengestelde resultaten** (bv. een studie die wel een effect van een bepaald type lichtkleur vindt vs. Een studie die dit niet vindt). Waar mogelijk wordt hier ook een interpretatie aan gegeven. Verder hadden we bijzondere aandacht voor **effecten op beleidsrelevante soorten, zoals soorten van Europese richtlijnen** en voor **kennis over mitigatie-mogelijkheden**.

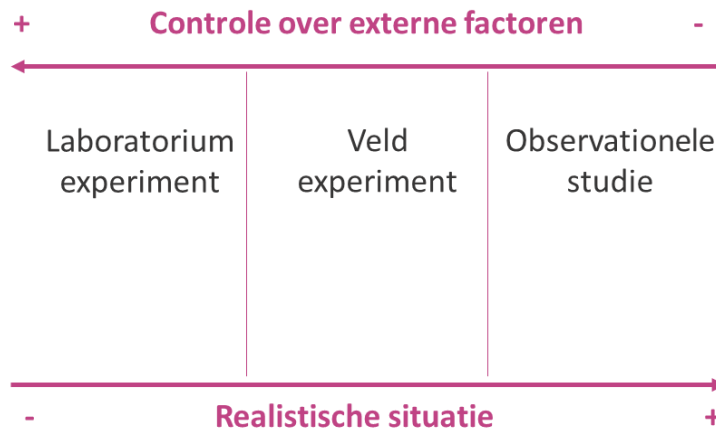
Bij interpretatie en synthese van de geselecteerde studies werd rekening gehouden met een aantal factoren:

- Het **type studie**: eerdere (vaak soortgroep-specifieke) systematische reviews of meta-analyses bevatten vaak erg veel nuttige informatie (zie ook **Figuur 11**). Ook moet rekening gehouden worden met het verschil tussen observationele studies, veldexperimenten en labo-experimenten. Een experiment in het lab biedt veel controle over de omstandigheden, en dus een grote zekerheid dat het waargenomen effect aan de gemanipuleerde factoren is toe te schrijven. Een dergelijke onderzoeksopzet is echter ook erg artificieel, en kan daarom niet makkelijk te vertalen zijn naar natuurlijke omstandigheden. Bij een observationele studie in de vrije natuur is dit dan weer omgekeerd (zie ook **Figuur 12**). Verschillende onderzoeksopzetten zijn dus complementair, maar moeten voorzichtig geïnterpreteerd worden.
- Ook de **kwaliteit** van de studie. Studies van mindere kwaliteit (zoals studies met kleine steekproefgrootte, slecht opgezette experimenten of anekdotische waarnemingen) worden meestal niet besproken. Enkel indien ze erg relevant waren worden ze besproken, maar de beperkingen worden steeds geduid, en ze wegen minder zwaar door in de getrokken conclusies.
- **Geografische of soortgroep-specifieke** factoren. Aangezien de literatuurstudie zich focust op Vlaanderen en West-Europa, werden studies vanuit andere regio's enkel meegenomen indien ze ook relevant waren voor deze regio. Zo bekeken we bv. geen studies over zeeschildpadden aangezien deze groep hier niet voorkomt.

De **resultaten van deze literatuurstudie worden samengevat** in dit document. In een eerste deel bespreken we de **verschillende soortgroepen** (deel 3 op pg. 27). Waar mogelijk geven we steeds alle gekende informatie over onderzochte licht, zoals type (led, natriumlamp, etc), kleur (kleurtemperatuur of golflengte-bereik) en lichtintensiteit (in lux of lumen). In een tweede deel maken we de **synthese over de soortgroepen heen**. Hierbij bespreken we effecten op verschillende habitats en ecosysteemdiensten (deel 4 op pg. 109). Tenslotte geven we advies voor beleid en beheer, en bespreken we noden voor bijkomend onderzoek (deel 5 op pg. 120).



Figuur 11: Systematische voorstelling van verschillen in kwaliteit en hoeveelheid bij verschillende types studies



Figuur 12: Systematische voorstelling van belangrijke punten bij verschillende studieopzetten. Veel controle over externe factoren geeft een grote zekerheid dat de waargenomen effecten aan de gemanipuleerde factoren toe te schrijven zijn, maar zijn weinig realistisch. Verschillende onderzoeksopzetten zijn dus complementair.

## 3 BESPREKING VAN DE VERSCHILLENDE SOORTGROEPEN

### 3.1 INSECTEN EN ANDERE GELEEDPOTIGEN

#### Kernpunten

- Veel studies over insecten en andere geleedpotigen
- Veel effecten gevonden van nachtelijke verlichting, zowel op individuele geleedpotigen als op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten
- Effecten hangen sterk af van soort tot soort, veralgemeningen zijn daarom moeilijk
- Effecten hangen af van lichtkleur en lichtintensiteit (hoe hoger de lichtintensiteit en hoe meer blauw licht het licht bevat hoe heeft groter effect), maar ook weinig intens licht (< 1 lux) en rood/amberkleurig licht heeft op sommige groepen grote effecten
- Effecten waargenomen van 50 tot 75m van de lichtbron

#### 3.1.1 Inleiding

##### Geleedpotigen

Geleedpotigen (Insecten, spinnen, mijten, duizend- en miljoenpoten en kreeftachtigen) zijn de **soortenrijkste diergroep**. In België werden reeds meer dan 35.000 soorten vastgesteld (<https://www.species.be>). Deze diverse groep vervult **belangrijke functies in het ecosysteem** (bv. basispositie in het voedselweb, belangrijke rollen in decompositie en bestuiving) en levert tal van **ecosysteemdiensten** (bv. bestuiving van landbouwgewassen, controle van pestsoorten, behoud bodemstructuur). Andere soorten zijn dan weer maatschappelijk belangrijk als vector voor ziektes (bv. steekmuggen of teken) of wegens schade aan landbouwgewassen. Wereldwijd zijn ongeveer 60% van geleedpotigensoorten 's nachts actief <sup>8</sup>.

Veel soorten insecten en andere geleedpotigen gaan sterk achteruit <sup>9</sup>. Naast belangrijke factoren zoals habitatverlies en habitatversnippering, pesticidengebruik en klimaatsverandering, wijzen een aantal recente studies ook op **de rol van nachtelijk kunstlicht in de achteruitgang van insecten** en andere geleedpotigen <sup>10,11</sup>. Zo vonden twee studies in Nederland en Engeland dat nachtvlinders die sterker aangetrokken zijn tot licht, sterker achteruitgaan dan andere soorten <sup>12,13</sup>.

##### Hoe nemen geleedpotigen licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting te verstaan, is het belangrijk te begrijpen hoe geleedpotigen licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar gespecialiseerde literatuur <sup>14</sup>. Ondanks hun kleine hersenen en kleine ogen beschikken geleedpotigen in het algemeen over een goed ontwikkeld zicht <sup>15</sup>. Bij geleedpotigen komen **twee types ogen** voor, namelijk facetogen, samengesteld uit vele deelloogjes (ommatidia), en enkelvoudige ogen bestaand uit één lens.



**Facetogen** komen voor bij de meeste insecten (Insecta) en kreeftachtigen (Crustacea). Facetogen bestaan uit deelloogjes (ommatidia) die elk bestaan uit een cornea, lens, fotoreceptorcellen en pigmentcellen. Het aantal deelloogjes varieert van enkele bij pissebedden tot vele tienduizenden bij libellen. Elk deelloogje is via zenuwen verbonden met het brein, en bezorgt hieraan een beeldelement. Het brein vormt dan een beeld van al deze onafhankelijke beeldelementen.

Het tweede type ogen zijn **enkelvoudige ogen**. Het meest voorkomende enkelvoudige oogtype is de ocellus. Bij sommige groepen zoals spinachtigen (Arachnida) is dit het enige type ogen dat aanwezig is. Het aantal ocelli varieert sterk binnen deze groep van één paar (bij hooiwagens) tot zeven paar (bij schorpioenen). Spinnen hebben drie tot vier paar ogen, waarvan de primaire ogen een beweegbare retina hebben en meer detail kunnen vormen, terwijl de andere secundaire ogen meestal enkel beweging detecteren. De meeste spinachtigen zien niet erg goed, maar actieve jagende soorten, zoals wolfspinnen en springspinnen, hebben wel een goed zicht, ook bij lage lichtintensiteiten. Ocelli komen ook voor bij verschillende insectengroepen, waar ze complementair zijn met de facetogen. Op de achterkant of de voorkant van het hoofd van o.a. vliesvleugeligen, vliegen, libellen, juffers en sprinkhanen zijn één tot drie ocelli aanwezig. Ocelli kunnen lichtintensiteit al bij lagere intensiteiten waarnemen en reageren sneller, terwijl facetogen beter zijn in het detecteren van verschillende lichtspectra, vormen en beweging.

Bij sommige groepen binnen de geleedpotigen komt ook een ander type enkelvoudige ogen voor, namelijk stemata. Deze ogen zijn vermoedelijk evolutionair afgeleid van facetogen, die opnieuw enkelvoudig geworden zijn. Bij veel groepen insecten komen ze enkel voor in larvale stadia (bv. vlinders), maar bij andere groepen zoals springstaarten, vlooien en duizendpoten komen ze ook voor bij adulten.

Naast de ogen beschikken sommige soorten ook nog over **andere organen om licht waar te nemen**, onder meer rechtstreeks in de hersenen en rond de reproductieve organen.

Binnen geleedpotigen is er een enorme diversiteit in de gevoeligheid voor verschillende lichtspectra of kleuren <sup>16</sup>. Bij **de meeste soorten** zijn drie types fotoreceptoren aanwezig in de ogen, met **gevoeligheid** in zeer korte **ultraviolette golflengtes** (UV, 300-400 nm), korte golflengtes (**blauw**, 400-480 nm) en iets langere golflengtes (**groen**, 480-600 nm). Veel soorten zijn dus minder gevoelig voor lange golflengtes (d.w.z. geel en roodkleuren). Sommige soorten hebben echter maar één type fotoreceptoren die slechts voor een nauw spectrum gevoelig zijn, terwijl andere soorten meer dan drie types fotoreceptoren hebben (in extremis tot 15 <sup>17</sup>). Door het grote aantal fotoreceptoren behoort het spectrum waarvoor sommige soorten vlinders en vliesvleugeligen gevoelig zijn tot het breedste van alle diersoorten (van minder dan 300 nm (in UV) tot meer dan 700 nm (in infrarood)) <sup>16</sup>. Binnen één soort bevatten verschillende delen van het facetoog vaak verschillende types fotoreceptoren gevoelig voor andere spectra. Verder komen geslacht-specifieke verschillen in gevoeligheid van ogen voor bepaalde spectra ook vaak voor.

Tenslotte is het belangrijk te vermelden dat naast ogen ook andere lichtgevoelige organen aanwezig kunnen zijn, en die een andere gevoeligheid kunnen hebben. Zo wordt de diapauze van bepaalde nachtvlinders voornamelijk geregeld door rode spectra die rechtstreeks door het brein waargenomen worden <sup>18</sup>.

Geleedpotigen die 's nachts actief zijn kunnen licht al waarnemen bij uiterst lage intensiteiten <sup>15,19</sup>. Een extreem voorbeeld is de tropische bij *Megalopta genalis*, die licht kan waarnemen wanneer minder dan 5 fotonen per seconde invallen <sup>15</sup>. Daarvoor hebben deze soorten verschillende aanpassingen waardoor ze 's nachts helderder zien, maar ook trager en met een grover beeld. Zo is de bouw van de facetogen van nachtelijk levende insecten aangepast om

////////////////////////////////////

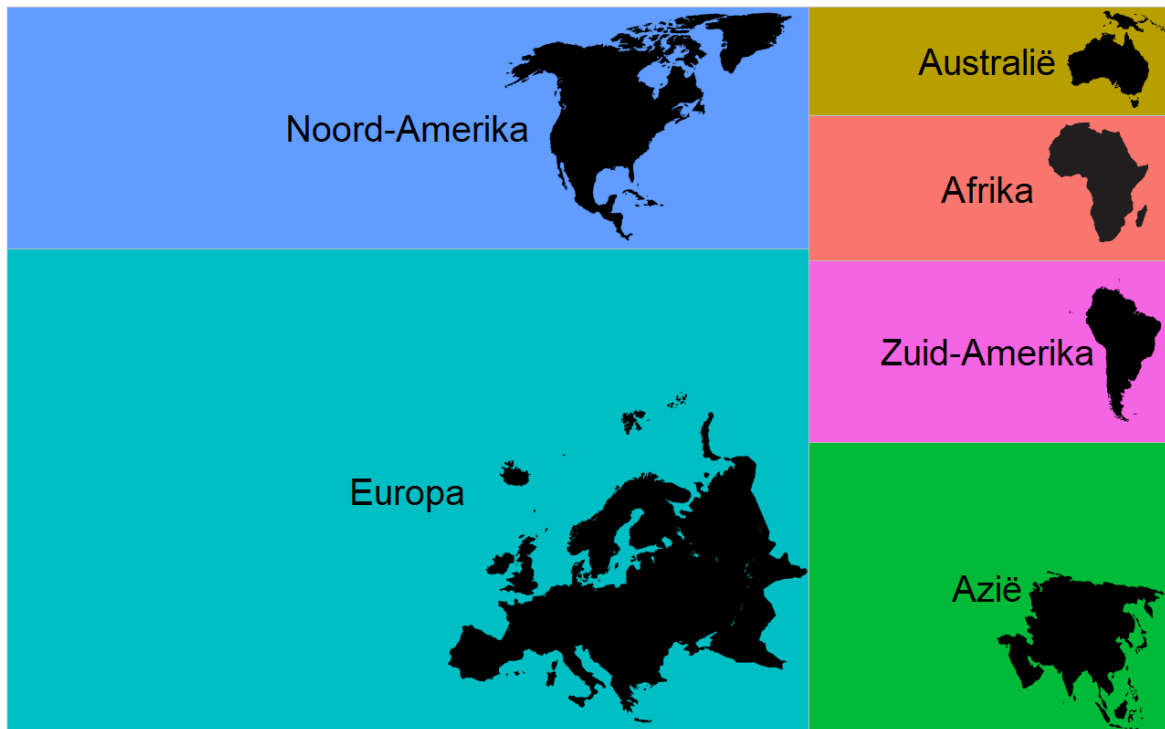
maximaal licht op te vangen. Verder reageren de fotoreceptoren trager dan bij overdag levende soorten, zodat er meer tijd is om het weinige licht op te vangen. Tenslotte hebben zo'n soorten ook aanpassingen in de delen van de hersenen verantwoordelijk voor het verwerken van visuele informatie, waarbij de beelden gevormd worden over een grote tijd en ruimte om maximaal gebruik te maken van licht.

### 3.1.2 Literatuur onderzoek

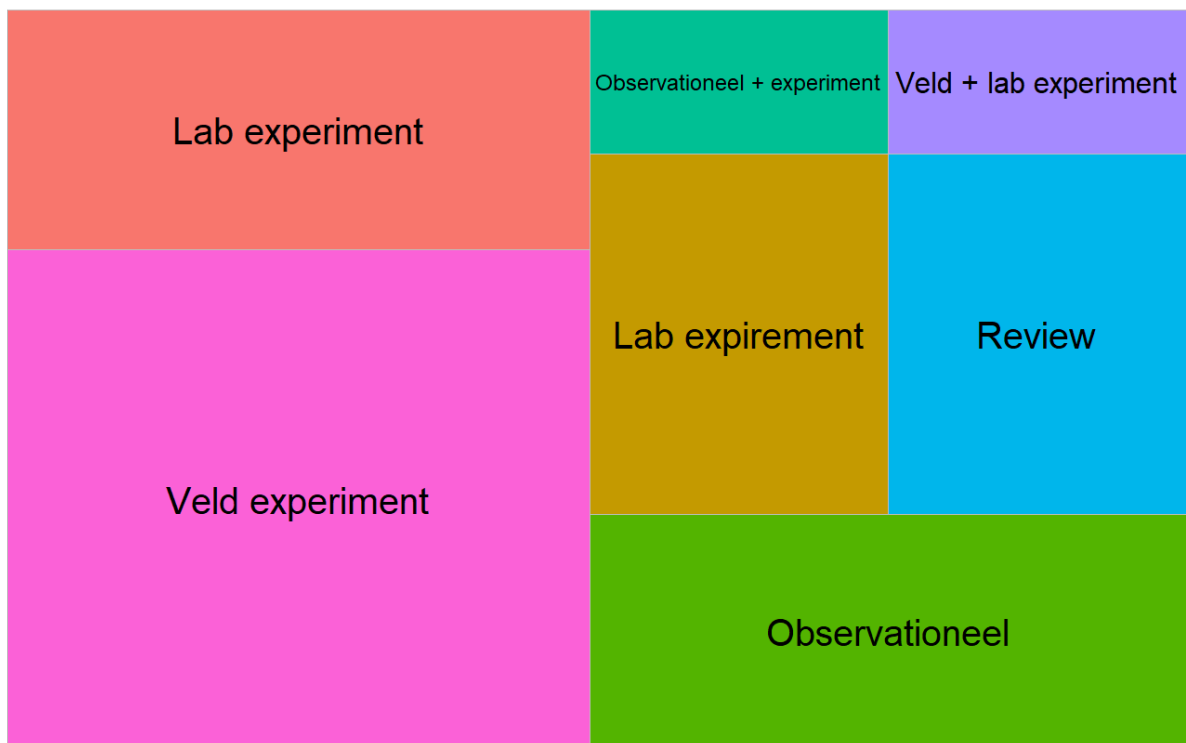
De literatuurstudie leverde 286 studies op, waarvan 206 gevonden werden via systematische zoektocht met kernwoorden en 80 bijkomende studies via referenties, grijze literatuur en andere. ). In de geraadpleegde literatuur was een duidelijke geografische bias naar studies uit Europa en Noord-Amerika (figuur 1a). De meeste van deze studies bestonden uit veldexperimenten, gevolgd door labexperimenten en reviews (figuur 1b). Ook taxonomisch was er een grote bias, waarbij de nachtvlinders de meest onderzochte groep waren, gevolgd door kevers (voornamelijk glimwormen) (1c). De meeste studies onderzochten effecten op gemeenschapsniveau, en een minderheid keek naar effecten op specifieke soorten (meestal modelsoorten). De meeste studies hadden betrekking op gedrag (voornamelijk aantrekking tot licht), maar ook effecten op fysiologie, interacties tussen soorten (bv. predatie) en ecosysteemdiensten (bestuiving, vector van ziektes) werden onderzocht. Hoewel er een aantal hoogkwalitatieve studies voorhanden zijn, blijkt uit de literatuur toch dat veel potentiële lichteffecten weinig onderzocht zijn. Zo waren er slechts 13 studies voorhanden die langer dan één seizoen onderzochten <sup>20</sup>, en dat kan een probleem zijn voor interpretatie. Bijvoorbeeld, in een vijfjarig veldexperiment werd gevonden dat de sterke daling in het aantal nachtvlinders zich pas manifesteerde na twee jaar <sup>21</sup>.



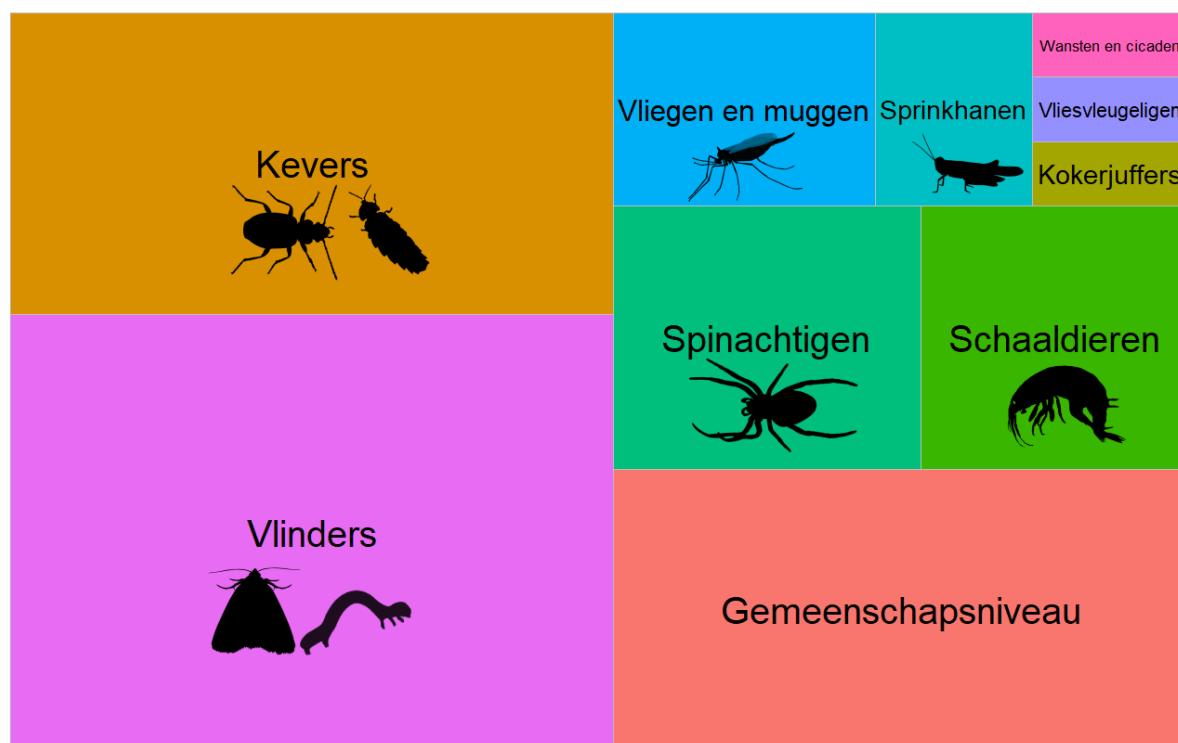
a) Aantal studies per werelddeel



b) type van de studie



### c) Aantal studies per order



Figuur 13: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie en (c) onderzochte orde

### 3.1.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele geleedpotigen

#### Fototaxis en effecten op beweging

Het is een algemeen bekend fenomeen dat licht een aantal soorten insecten en andere geleedpotigen aantrekt (positieve fototaxis). Het grootste aandeel van de studies gevonden in de literatuur onderzochten dan ook aantrekking tot licht. Dit fenomeen is het meest onderzocht bij (adulte) nachtvlinders, maar ook andere groepen zoals kevers, wantsen, vliegen en muggen, spinnen en eendagsvliegen zijn vaak in grote aantallen te vinden rondom licht. Ook larvale stadia, zoals rupsen van bepaalde nachtvlinders, kunnen tot nachtelijk licht aangetrokken zijn <sup>22</sup>.

Aantrekking tot licht hangt af van een aantal factoren:

- Het **spectrum** en type licht speelt een belangrijke rol. In het algemeen trekt verlichting die een piek van uitstraling heeft in het UV spectrum een groter aantal en een grote diversiteit aan geleedpotigen aan <sup>23</sup>. Uit een meta-analyse blijkt dat zulke verlichting (bv. metal-haloïde en kwikdamlampen) 300 tot 500% meer insecten aantrekken dan 'traditionele' HPS-verlichting (Hogedruknatriumlampen) <sup>24</sup>. Tegelijk blijkt uit deze analyse dat over het algemeen led-verlichting 40% minder insecten aantrekken dan HPS-verlichting. Tussen koud-witte led-verlichting (4000 – 6500 K) en warm-wit led-verlichting (2700-3500 K) werd in deze meta-analyse geen verschil gevonden. Het is

belangrijk te onthouden dat door de grote diversiteit binnen geleedpotigen, elk spectrum aantrekkelijk is voor bepaalde soorten. Zo bleek uit een veldexperiment in Peru dat amberkleurige leds (2200 K) in het algemeen minder insecten aantrokken dan witte leds (3000K) of gele leds (2700 K), maar sommige soortgroepen zoals kniptorren (Elateridae) net het meeste aantrokken<sup>25</sup>.

- Ook **lichtintensiteit** speelt een grote rol. In het algemeen blijkt uit de literatuur dat feller licht meer individuen aantrekt dan zwakker licht. Er is echter amper data voorhanden over de grenswaarden van lichtintensiteiten waar nog geen effecten gevonden worden (zie ook verder).
- De **afstand** waarop individuen aangetrokken zijn tot nachtelijk licht is voornamelijk onderzocht bij UV-licht en nachtvlinders. Uit veldexperimenten waarbij gemerkte individuen losgelaten werden nabij UV lampen blijkt de afstand voor aantrekking over het algemeen klein te zijn, met waarden van 10 tot 30 m<sup>26-28</sup>. In oudere literatuur wordt op basis van berekeningen over de gevoeligheid van de ogen, soms waarden tot 500 m gegeven (zie eerdere samenvatting<sup>23</sup>), maar dergelijke waarden zijn nog niet in het veld aangetoond. Verschillende families reageren anders, waarbij spinneruilen (Erebidae) van verder komen (tot ca. 27 m) dan spanners (Geometridae; ca. 23 m) en uilen (Noctuidae; ca. 10m) (Actinic licht, spectrum 420 nm)<sup>29</sup>, al moet vermeld worden dat het type verlichting hier erg specifiek is (lagere intensiteit, voornamelijk UV). Een studie bij een rivier in Duitsland vond sterk verhoogde aantallen aquatische insecten bij HPS straatverlichting (5600 lm, 2000 K, HPS, 3,5 m hoog) tot op een afstand van 40 m van het water, maar niet meer bij 75 m afstand<sup>30</sup>. De afstand van waarop geleedpotigen naar nachtelijk licht komen is wellicht soort- en contextafhankelijk.
- **Habitatcontext** kan ook een rol spelen, maar is minder onderzocht. Een studie uit de VS suggereert dat de hoeveelheid begroeiing rondom een verlichtingsbron de aantrekking voor nachtvlinders kan verminderen<sup>31</sup>, maar andere studies vinden geen verschil in aantrekking in stedelijke habitats en op het platteland<sup>23</sup>. Het is wel duidelijk beschreven dat het aantal andere lichtbronnen in de omgeving aantrekking tot een bepaalde lichtbron kunnen verminderen. Zo is het aantal nachtvlinders aangetrokken tot nachtvlinderlampen minder groot bij (volle) maanlicht, ook al is de activiteit vermoedelijk even hoog<sup>23</sup>.

De aantrekking tot licht **varieert tussen soortgroepen** (zie ook review<sup>23</sup>). Sommige soorten of families komen erg weinig op licht af, en het is onduidelijk of ze dan neutraal reageren op licht, of juist licht mijden. Merckx & Slade tonen aan dat het aandeel van nachtvlinders die nabij UV licht vliegt (op een afstand van 1m) en die vervolgens aangetrokken wordt afhangt van de familie (van ca. 55% bij spinneruilen (Erebidae) tot ca. 10% bij uilen (Noctuidae)<sup>29</sup>. Ook worden bij nachtvlinders vaak meer mannelijke exemplaren gevangen, maar een aantal studies wijzen erop dat dit vermoedelijk eerder komt door een grotere vliegactiviteit van mannetjes, dan door verschillen in gevoeligheid tussen geslachten<sup>26</sup>.

Het is waarschijnlijk dat verlichting veel soorten geleedpotigen ook afstoot in plaats van aantrekt<sup>32</sup>. Dergelijke **negatieve fototaxis** wordt ook bij veel andere diergroepen waargenomen (bv. vele vleermuissoorten<sup>33</sup>), maar dit is moeilijk te onderzoeken, zeker bij geleedpotigen die moeilijk individueel opgevolgd kunnen worden. We vonden acht studies die negatieve fototaxis



onderzochten in lab of veldomstandigheden<sup>34-40</sup>, en verlichting wordt in twee reviews ook gesuggereerd als methode om pestinsecten te verjagen in de landbouw<sup>41,42</sup>. Andere veldstudies vinden indirect bewijs voor negatieve fototaxis door het ontbreken van bepaalde soorten in verlichte delen van veldexperimenten in vergelijking met donkere controle sites<sup>43</sup>. Een recente studie waarbij grote nachtvlinders (pijlstaarten en spinners) gevolgd werden via harmonische radar toonde aan dat straatverlichting (HPS, 2000 K) op 3,5m hoge palen ervoor zorgde dat de nachtvlinders onregelmatig begonnen vliegen en tot stilstand kwamen, maar dat slechts 4% van de individuen naar licht vlogen<sup>44</sup>. Bij spinners zorgden het licht voor een sterke barrière-werking.

## Directe sterfte

Insecten en andere geleedpotigen die aangetrokken worden tot licht kunnen hierdoor sterven. Individuen die in aanraking komen met warme lampen kunnen **zichzelf ernstig beschadigen** (bv. aan een warme lamp) of kunnen zo lang rondom het licht bewegen dat ze door **uitputting** sterven. De aanwezigheid van dode individuen nabij verlichting kan op zijn beurt dan weer opportunistische aaseters, zoals aaskevers en naaktslakken aantrekken die daardoor dus profiteren van verlichting<sup>45,46</sup>.

We vonden slechts twee oudere studies die directe mortaliteit rondom verlichting onderzochten. Een oudere studie vergeleek het aantal aangetrokken insecten met het aantal dode insecten dat 's morgens gevonden werd, en kwam tot het besluit dat 10 tot 76% van de aangetrokken insecten stierven<sup>47</sup>, maar het is onduidelijk over welk type verlichting het hier gaat. In vele studies wordt de waarde van Eisenbeis<sup>23</sup> geciteerd, die inschatte dat 33% van de insecten die aangetrokken worden tot licht sterven, maar het is in deze review niet vermeld hoe tot dit cijfer gekomen wordt, of voor welk type verlichting deze waarde zou gelden.

Er kan aangenomen worden dat directe sterfte het hoogste is bij verlichting die warm wordt, en lager is bij andere verlichting (zoals leds), al kunnen aangetrokken dieren daar nog steeds sterven door uitputting.

Directe sterfte kan ook veroorzaakt worden door fysiologische effecten van licht. Het werd aangetoond dat in lab-omstandigheden blauwe led verlichting (400-470 nm) zorgt voor sterfte van eieren, larven en adulten van fruitvliegen (*Drosophila melanogaster*), steekmuggen (*Culex pipiensmolestus*) en meelkevers (*Tribolium confusum*)<sup>48</sup>. Dit gebeurt vermoedelijk door een toegenomen productie van reactieve zuurstofcomponenten als reactie op blauw licht. De blootstelling aan blauw licht in labo-omstandigheden is echter niet makkelijk te vergelijken met verlichting in veldomstandigheden.

## Fysiologische effecten van licht

Nachtelijk kunstlicht kan ervoor zorgen dat fysiologische processen verstoord worden. Melatonine lijkt hier een zeer belangrijke rol te spelen<sup>49-51</sup>. Dit hormoon komt voor bij vele organismen, en de productie ervan wordt geregeld door duisternis. Melatonine speelt een belangrijke rol in verschillende hormonale processen, in het functioneren van het immuunsysteem en bij celherstel. Fysiologische veranderingen kunnen dan effecten hebben op biologische timing, reproductief succes en ontwikkeling (zie verder), en zelfs directe sterfte veroorzaken.



## Verstoorde Timing

Activiteiten zoals reproductie, foerageren, ontwikkeling, migratie en andere zijn bij het overgrote deel van de geleedpotigen gesynchroniseerd in dagelijkse, maandelijks of jaarlijkse cycli. Naast temperatuur is licht (bv. daglengte) een belangrijk signaal voor dit circadiaans<sup>A2</sup>, circamensueel<sup>A2</sup> of circaännueel<sup>A2</sup> ritme. Nachtelijk kunstlicht kan ervoor zorgen dat individuen de daglengte verkeerd inschatten en kan daardoor de interne klok ontregelen. Dergelijke verstoring van de tijdsregeling kan leiden tot verminderde reproductie, verstoorde ontwikkeling en verstoorde interacties tussen soorten (zie verder). Het effect van nachtelijk kunstlicht op timing hangt af van de lichtintensiteit, kleurenspectra en de duur van de verlichting<sup>18</sup>.

## Verminderde voortplanting en reproductief succes

12 studies onderzochten het effect van nachtelijke verlichting op de voortplanting van insecten, meestal op nachtvlinders, en vonden meestal negatieve effecten. Zo vermindert het aantal bevruchte vrouwtjes van de Kleine wintervlinder (*Operophtera brumata*) op verlichte eiken met 50% bij rode led-verlichting, en met 70 à 75% bij groene en witte led-verlichting<sup>52</sup>. Dergelijke verminderde reproductie kan door verschillende (niet-exclusieve) factoren verklaard worden:

- Aantrekking tot licht kan ervoor zorgen dat individuen **minder tijd kunnen spenderen** aan voortplanting<sup>53</sup>.
- Als individuen afgaan op zicht om soortgenoten te vinden, kan verlichting ervoor zorgen dat ze er **niet in slagen elkaar te lokaliseren**. Dit fenomeen is vooral goed beschreven bij verschillende soorten glimwormen, waar de vrouwtjes mannetjes lokken met lichtsignalen<sup>54-57</sup>. Dergelijke effecten kunnen al optreden bij zeer lage lichtintensiteiten (minder dan 0,18 lx<sup>54,56</sup>) en vrouwtjes vertonen geen reactie om weg te kruipen van het licht naar plekken waar ze wel vindbaar zijn voor mannetjes<sup>58</sup>.
- Verlichting kan **fysiologische processen** die normaal enkel 's nachts plaatsvinden ontregelen en daardoor reproductie verminderen<sup>24</sup>. Zo veranderde nachtelijke verlichting de chemische samenstelling van feromonen door vrouwtjes van de Kooluil (*Mamestra brassicae*) bij alle geteste kleuren led licht (rode, groene en gele leds) en was de feromoon productie 30% lager bij groene leds (niet bij de andere geteste kleuren)<sup>59</sup>. Lage intensiteiten van 10 lx verminderen ook het leggen van eitjes en het aantal eitjes bij fruitvliegen<sup>60,61</sup> en meelmotten (*Plodia interpunctella*)<sup>62</sup>. Bij mannetjes is dan weer voor verschillende nachtvlindersoorten in labexperimenten aangetoond dat nachtelijke verlichting de spermaproductie beperkt en dus zorgt voor steriliteit<sup>24</sup>.

---

<sup>A2</sup> circadiaans = tussen dagen, circamensueel = tussen maanen en circaännueel = tussen jaren.





**Figuur 14: Nachtelijke verlichting heeft niet alleen op adulte geleedpotigen een grote invloed, maar ook op larvale stadia. Rupsen van een Kooluil (*Mamestra brassicae*) hebben een lager gewicht bij blauwe en witte leds, wat hun latere overleving in gevaar brengt – foto Rens Hendrickx (Creative Common licentie).**

### **Verstoorde ontwikkeling**

Nachtelijk kunstlicht kan de ontwikkeling van insecten verstoren. Afhankelijk van de soort worden zowel versnelde<sup>63,64</sup> als vertraagde ontwikkeling (bv. bij krekels<sup>65</sup> of een ontwikkeling die leidt tot een slechtere conditie<sup>66,67</sup> beschreven. Het effect op ontwikkeling kan afhangen van het spectrum van licht<sup>63,67</sup>. Bv. bij rode led-verlichting werd er geen effect waargenomen op de ontwikkeling van rupsen van de Kooluil (*Mamestra brassicae*), maar bij blauwe en witte leds (7 lx) hadden rupsen een lager gewicht, wat hun latere overleving in gevaar brengt.

Nachtelijk kunstlicht verstoort ontwikkeling wellicht op verschillende manieren:

- Verlichting kan ervoor zorgen dat nachtactieve individuen **niet foerageren**. Veel rupsen zijn bv. nachtactief, en eten enkel bij duisternis<sup>24</sup>.
- Verlichting kan ook de ontwikkeling verstoren door **fysiologische processen te ontregelen**.
- Verlichting kan zorgen dat individuen de **timing verkeerd inschatten**. Zo is aangetoond dat bladluizen en bladmineerders het seizoen verkeerd inschatten bij nachtelijk kunstlicht en hun ontwikkeling daardoor anders verloopt<sup>68,69</sup>. Dit kan potentieel negatieve effecten hebben op zowel de plant (die langere periode van hoge vraat te verdragen krijgt), als op de geleedpotige (die te laat een levensstadium bereikt om de koude winter te overleven).



### 3.1.4 Effecten op Populaties, gemeenschappen en soortinteracties bij geleedpotigen

Het is duidelijk aangetoond dat nachtelijke verlichting een groot negatief effect kan hebben op individuele geleedpotigen. Negatieve effecten op populaties, gemeenschappen en soortinteracties zijn minder duidelijk in de literatuur. Niet alle impact op individuele geleedpotigen leidt namelijk noodzakelijk tot negatieve effecten op populatie- of gemeenschapsniveau of op verstoorde soortinteracties, maar toch lijkt het uit de beschikbare literatuur zeer waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook effecten heeft op deze niveaus <sup>70</sup>.

#### Effecten op insect-populaties

We vonden enkel studies die het effect van nachtelijke verlichting op populatiedynamiek onderzochten bij nachtvinders; studies op andere geleedpotigen ontbreken. Observationele studies geven een gemengd beeld. Twee publicaties uit Nederland <sup>12</sup> en Engeland <sup>13</sup> tonen aan dat nachtvinders die meer aangetrokken worden tot licht 's nachts, sterker achteruit gaan dan soorten die niet aangetrokken worden tot licht. Deze studies wijzen op een rol van nachtelijke verlichting in de achteruitgang van nachtvlinderpopulaties, maar de studies hebben ook beperkingen. Zo werd aantrekking tot licht niet kwantitatief bepaald maar kwalitatief beoordeeld door experts, en er waren slechts een beperkt aantal soorten die niet in de categorie 'aangetrokken tot licht' geplaatst werden (43 van de 481<sup>12</sup>). Andere studies vinden geen duidelijk effect van verlichting op nachtvlinderpopulaties. In 32 sites in een stedelijke onderzoeksgebied in de VS was er geen verband tussen diversiteit en abundantie van nachtvlinderpopulaties en nachtelijke verlichting <sup>31</sup>. In Engeland vonden onderzoekers geen verschil in trends van nachtvinders tussen sites met toegenomen nachtelijke verlichting en sites die donker gebleven waren<sup>71</sup>.

Recent toonden twee hoogkwalitatieve experimentele studies overtuigend negatieve effecten van kunstlicht op de populatie van nachtvinders aan. Zo vergeleken van Grunsven en collega's gedurende vijf jaar het effect van verschillende lichtkleuren met een duistere controle-site op verschillende plekken in Nederland. De eerste jaren werd geen effect gevonden, maar na twee jaar leidde zowel groen, wit als rood licht tot een lokale populatie-afname van ca. 15% in vergelijking met de duisternis-situatie<sup>21</sup>. Bij een studie in Engeland vonden Boyes en collega's dan weer dat straatverlichting tot een sterke afname van rupsen leidt <sup>72</sup>. De onderzoekers namen 47% minder rupsen waar bij verlichte houtkanten, en 33% minder bij verlichte grasbermen, in vergelijking met duistere equivalenten.

Ook studies die **evolutionaire aanpassingen** aantonen bewijzen dat nachtelijk kunstlicht grote impact kan hebben op populaties. Zo blijkt dat bij de Kardinaalsmutsstippelmot (*Yponomeuta cagnagella*) individuen uit populaties in stedelijke gebieden (en dus met veel nachtelijke verlichting) geëvolueerd zijn om minder naar licht te komen <sup>73</sup>. De kans dat een individu uit zo'n stedelijke populatie naar licht kwam was zo'n 30% lager dan bij individuen uit populaties op het platteland. Dit patroon kan vermoedelijk verklaard worden doordat individuen die veel naar licht komen in sterk verlichte gebieden een mindere overlevingskans hebben, en deze eigenschap dus uit de populaties wordt weggeselecteerd. Een gelijkaardig evolutionair patroon werd ook aangetoond bij een spinnensoort (de Huissteatoda *Steatoda triangulosa*), waarbij stedelijke populaties licht niet vermijden in tegenstelling tot populaties op het platteland <sup>74</sup>.



Nachtelijke verlichting wordt soms gebruikt als methode om de populaties van schadelijke soorten in de landbouw te onderdrukken <sup>41,42</sup>. Licht kan zowel gebruikt worden om bepaald gedrag (eileg, vraat) te verminderen, als in vallen om individuen te doden en zo de populatie te verkleinen. Maar bij de inzet van licht als insectenbestrijdingsmiddel wordt meestal een zeer hoge dichtheid en intensiteit aan verlichting gebruikt (bv. 50 lux op gewashoogte over het hele perceel), en dit is vermoedelijk niet vergelijkbaar met het ecologische effect van bv. straatverlichting <sup>24</sup>.

### Effecten op het gemeenschapsniveau

Zeven studies onderzochten de effecten van nachtelijk kunstlicht op gemeenschapsniveau. Deze studies vonden plaats in relatief eenvoudige habitats als graslanden of aquatische systemen en vergeleken de geleedpotigengemeenschap van sites die experimenteel verlicht werden (voor enkele dagen tot meerdere jaren) met donkere controle sites. Vaak werd waargenomen dat nachtelijk kunstlicht functionele groepen verandert, met een verhoogde abundantie van aaseters en predatoren (bv. sommige spinnen, hooiwagen, kevers en pissebedden) <sup>43,45,75-78</sup>. Een andere studie vond geen dergelijk effect <sup>79</sup>. Dergelijke veranderingen in gemeenschapssamenstelling en functionele groepen kunnen belangrijke gevolgen hebben voor het functioneren van het ecosysteem.

### Soortinteracties: verhoogde predatie

Geleedpotigen die aangetrokken worden tot artificiële lichtbronnen lopen waarschijnlijk een groter risico op predatie. Meerdere studies tonen aan dat **rondom lichtbronnen vaak grotere aantallen predatoren** foerageren, waaronder predatore geleedpotigen <sup>43,45,76,80,81</sup>, vogels <sup>82</sup>, vlemmuizen <sup>83</sup>, ratten <sup>84</sup> en andere soorten (bv. gekko's <sup>85</sup>). Zo kunnen licht-tolerantere vlemmuisoorten intensief foerageren op de zwermen van insecten rond verlichting, en kan hun dieet meer grotere insecten of andere soorten bevatten dan van individuen van dezelfde vlemmuisoort die in duisternis foerageren <sup>86</sup>. Ook sommige soorten webbouwende spinnen kunnen een voorkeur vertonen om hun web te bouwen nabij verlichting <sup>87</sup> of vangen er meer insecten dan in onverlichte plekken <sup>88</sup> (maar niet altijd <sup>89</sup>). Naast dergelijke nachttactieve insectivoren zijn er ook waarnemingen van predatoren die normaal dagactief zijn, maar rond licht 's nachts foerageren op de aangetrokken geleedpotigen, zoals springspinnen <sup>90</sup> en sociale wespen <sup>91</sup>.

Verlichting zorgt niet alleen dat er grote densiteiten aan prooien zijn voor insectivoren, maar ook dat deze makkelijker te vangen zijn. Zo **verstoort** licht het **anti-predator gedrag** (ontwijkende vluchtbewegingen) dat nachtvlinders in duisternis vertonen als reactie op vlemmuizengeluiden <sup>92-95</sup>.

De aantrekking van geleedpotigen 's nachts kan ook zorgen **voor meer predatie overdag**. Veel insecten bleven overdag bewegingsloos in de buurt van de lichtbron die hen 's nachts aantrok, en kunnen dan gemakkelijk ten prooi vallen aan dagactieve predatoren. Bv. als nachtvlinderlampen vaak op dezelfde plaats opgesteld worden, leren zangvogels vlug dat er rondom de lampen 's morgens een grote dichtheid aan prooien te vinden is. We vonden enkel een studie uit Venezuela <sup>96</sup>, maar het is waarschijnlijk dat dit fenomeen vaker voorkomt.

Hoe een dergelijke verhoogde predator-dichtheid rondom verlichting invloed heeft op de populaties van prooi-soorten en predatorsoorten is niet goed gekend. Het is belangrijk te





onthouden dat sommige predatore soorten net licht vermijden (bv. veel vleermuisoorten<sup>97</sup>), of zelf sterk aangetrokken worden tot licht en daardoor zelf ook niet kunnen prederen op andere soorten <sup>76</sup>. Hoewel bijna alle studies meer predatoren rondom verlichting vinden dan in duisternis, zijn er **weinig studies die predatiedruk zelf onderzoeken** (d.w.z. kans op predatie voor een individu). Mcmunn en collega's toonden in een meerjarig veldexperiment aan dat in verlichte plekken de nachtelijke predatiedruk op geïmmobiliseerde vliegen door geleedpotigen bijna vier keer hoger was <sup>80</sup>, terwijl een andere studie op geïmmobiliseerde rupsen tussen verlichte en onverlichte plekken geen verschil vond <sup>98</sup>.

### Soortinteracties: gewijzigd parasitisme

Nachtelijke kunstverlichting kan ook andere interacties tussen soorten beïnvloeden. In een uitgebreid experiment vonden onderzoekers dat lage intensiteiten van Led-verlichting (0.1-5 lx) de hoeveelheid bladluizen die geparasiteerd werden door parasitaire wespen verdubbelde <sup>68,81</sup>. Dit komt vermoedelijk doordat de normaal dagactieve wespen ook 's nachts konden zoeken naar de bladluizen. Echter, wanneer de lichtintensiteit te hoog wordt, worden de parasitaire wespen zelf aangetrokken tot het licht en kunnen ze niet meer op zoek gaan naar prooien, vergelijkbaar met wat bij sommige predatore insecten waargenomen werd<sup>76</sup>. Twee andere studies op andere parasitaire wespen en bladluizen vonden dan weer geen effect van lichtintensiteit, maar wel dat parasitisme hoger was bij blauw dan bij rood licht <sup>99,100</sup>.

### Soortinteracties: Plant-geleedpotige interacties

Verlichting kan de interacties tussen geleedpotigen en planten op vele manieren beïnvloeden, zoals rechtstreeks via het gedrag van de insecten, of indirect via 'bottom-up' effecten op kwaliteit van nectar of bladeren <sup>66,68,101</sup>, of via 'top-down' effecten via het aantal en het gedrag van predatoren of parasieten <sup>81,102</sup>. Nachtelijk kunstlicht kan ook de timing van zowel planten als geleedpotigen verstoren (zie eerder). Hierdoor kan een mismatch ontstaan, waardoor bv. bestuivers te vroeg op het jaar actief worden, terwijl planten nog niet bloeien<sup>10</sup>.

Uit het literatuuronderzoek kwamen 7 studies die **herbivorie (vraat aan planten)** onderzochten. De meeste studies beschrijven een toename aan herbivorie <sup>69,80,103</sup> maar sommige studies vinden geen effect <sup>104</sup>. Boom en collega's vonden dat effecten afhangen van het lichtspectrum, met enkel verhoogde herbivorie bij groene en witte spectra, maar niet bij rood licht <sup>103</sup>. Verlichting kan ook effect hebben buiten het direct verlichte gebied. Zo is de herbivorie door de Gewone sileneuil (*Hadena bicruris*) het hoogste op donkere delen enkele meters naast de verlichte delen<sup>105</sup>. Dit kan vermoedelijk verklaard worden doordat deze nachtvlinder enerzijds aangetrokken wordt tot licht, maar anderzijds wel een voorkeur heeft voor eiafzet in duisternis. Beleid en beheer moeten dus rekening houden met het feit dat verlichting een impact heeft op een groter gebied dan enkel het direct verlichte deel.

Uit het literatuuronderzoek kwamen 6 studies die het effect van verlichting op **bestuiving** van planten door insecten onderzochten. Ook hier lijkt het effect context- en soortafhankelijk, met meestal verlaagde bestuiving <sup>106-109</sup> bij verlichting, maar ook neutrale effecten <sup>103</sup> en verhoogde bestuiving (vermoedelijk door aantrekking van bestuivers) <sup>110</sup>. Bijzonder interessant is de observatie dat verlichting ook dagactieve bestuivers kan beïnvloeden (met afhankelijk van de plantensoort zowel verhoogde als verlaagde bestuiving overdag bij planten die 's nachts verlicht worden <sup>106</sup>).



### 3.1.5 Effecten op Europees beschermde soorten geleedpotigen

Doordat de meeste onderzoeken focussen op effecten op gemeenschapsniveau of effecten op modelsoorten is in de literatuur weinig informatie te vinden over soort-specifieke effecten van nachtelijke verlichting op Europees of Vlaams beschermde soorten. In Vlaanderen komen twee nacht-actieve keversoorten en één nachtvlindersoort voor die opgenomen zijn op de bijlagen van de Europese habitatrichtlijn. **Vliegend hert** (*Lucanus cervus*) lijkt niet bijzonder aangetrokken tot licht, maar wordt in het buitenland sporadisch waargenomen vliegend rond lantaarnpalen en wordt zeer zelden gevangen in lichtvallen <sup>111</sup>. In Vlaanderen zijn er enkele populaties in woonwijken met straatverlichting, maar daar zijn er echter geen waarnemingen gekend van dieren die op licht afkomen (mondelinge mededeling A. Thomaes). **Vermiljoenkever** (Habitatrichtlijn bijlage 2) is eveneens nachtactief, maar is niet aangetrokken tot lichtvallen <sup>112</sup>. **Spaanse vlag** (*Euplagia quadripunctaria*) is zowel overdag als 's nachts actief, en is 's nachts aangetrokken tot UV-licht <sup>113</sup>. Populaties komen regelmatig voor in stedelijke milieus, vermoedelijk voor het warme microklimaat dat hier heerst. Het feit dat deze populaties goed stand houden, ook al is er in zo'n omgeving veel kunstlicht aanwezig, zou erop kunnen wijzen dat de soort minder gevoelig is voor verlichting. Verlichting wordt niet als specifieke bedreiging genoemd in de literatuur, maar specifieke studies ontbreken.

Het is belangrijk in gedachten te houden dat negatieve effecten van nachtelijke verlichting op insecten en andere geleedpotigen onrechtstreeks grote effecten kunnen hebben op andere beleidsrelevante soorten, zoals bv. vleermuizen (via voedselaanbod).

### 3.1.6 Kennis rond mitigatie

Hoewel veel studies effecten van nachtelijke verlichting op insecten en geleedpotigen beschrijven, is de kennis rond mitigatie-mogelijkheden van zulke effecten beperkt. Meerdere factoren zorgen er bovendien voor dat dergelijke studies moeilijk te interpreteren zijn. Een eerste factor is dat de meeste studies focussen op aantrekking of activiteit van adulte dieren, terwijl andere levensstadia of processen als paring mogelijk belangrijker zijn (bv. het larvale stadium leeft vaak langer en foerageert meer). Een tweede factor is dat vele studies aannemen dat een lage aantrekking tot verlichting gelijkstaat aan een lage ecologische impact, wat niet noodzakelijk het geval is. Zo kunnen er evengoed weinig geleedpotigen waargenomen worden bij een type verlichting omdat deze juist activiteit onderdrukt, en dus wel een grote ecologische impact heeft. Een derde factor is dat het relatieve belang van verschillende negatieve effecten van licht voor geleedpotigen nog niet duidelijk is <sup>24</sup>. Als bijvoorbeeld een belangrijk probleem is dat individuen de tijd van het jaar verkeerd inschatten waardoor de timing van fundamentele processen als ontwikkeling of diapauze niet meer afgestemd is op de omgevingsomstandigheden, zal het uitschakelen van kunstlicht gedurende een deel van de nacht dit effect niet oplossen. Als individuen daarentegen vooral in de problemen komen omdat ze aangetrokken worden tot licht en er dan minder tijd is voor normale processen als foerageren en paren, kan het uitschakelen van verlichting tijdens een deel van de nacht wel degelijk een belangrijk deel van de oplossing zijn. Het belang van dergelijke processen is nog niet duidelijk, en zal – gezien de grote diversiteit aan geleedpotigen – ook afhangen van de soort en van de context.



De gerapporteerde kennis rond mitigatie dient dus met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden.

### **Afstand houden van kwetsbare biotopen**

Studies die onderzoeken van welke afstand insecten en andere geleedpotigen naar verlichting komen kunnen een eerste inzicht geven in de minimale afstand waarop verlichting best geplaatst kan worden van kwetsbare biotopen zoals natuurreservaten of wetlands. In de literatuur zijn vooral studies te vinden van UV-lampen of lampen die gebruikt worden voor insectenmonitoring of pestcontrole. We vonden echter geen studies over de aantrekkingsafstand van nieuwere verlichtingstechnologieën zoals led licht.

Uit veldexperimenten op nachtvlinders blijkt dat de afstand waarop nachtvlinders naar UV-licht komen over het algemeen klein is, met waarden van 10 tot 30 m <sup>26-28</sup>. Een studie bij een rivier in Duitsland vond sterk verhoogde aantallen aquatische insecten bij HPS straatverlichting (5600 lm, 2000 K, HPS, 3,5 m hoog) tot op een afstand van 40, maar niet meer bij 75 m afstand <sup>30</sup>. Om aantrekking te vermijden lijkt het dus aangewezen dat **de lichtbundel minstens 75 m van kwetsbare biotopen verwijderd is.**

### **Type verlichting en kleurspectra**

Niet alle types verlichting hebben hetzelfde effect op insecten. In de literatuurstudie vonden we 16 studies die verschillende types verlichting met elkaar vergeleken. Over het algemeen worden de meeste insecten aangetrokken door verlichting met een groot aandeel UV. In een meta-analyse werd ingeschat dat zulke verlichting (bv. metal-haloïde en kwikdamlampen) 300 tot 500% meer insecten aantrekken dan ‘traditionele’ HPS-verlichting <sup>24</sup>. Tegelijk blijkt uit deze analyse dat led-verlichting 40% minder insecten aantrekken dan HPS-verlichting. Tussen koudwitte led-verlichting (4000 – 6500 K) en warmere witte led-verlichting (2700-3500 K) werd in deze meta-analyse geen verschil gevonden. Dit komt mogelijk omdat de standaard warm-witte led-verlichting nog steeds vrij veel blauw licht kan bevatten.

Het is dus aangewezen om verlichting te vermijden die veel korte golflengtes uitstraalt, en waar mogelijk steeds te kiezen voor verlichting met langere golflengtes, maar het is belangrijk te onthouden dat door de grote diversiteit binnen geleedpotigen, elk spectrum bepaalde soorten lokt. Zo bleek uit een veldexperiment in Peru <sup>25</sup> dat amberkleurige leds (2200 K) in het algemeen minder insecten aantrok dan witte leds (3000K) of gele leds (2700 K), maar sommige soortgroepen zoals kniptorren (Elateridae) net het meeste aantrok.

Naast aantrekking heeft licht bovendien ook effecten op geleedpotigen via andere manieren. Zo vonden van Grunsven en collega’s dat ook rood nachtelijk kunstlicht op lange termijn voor een sterke afname van nachtvlinders zorgt (ca. – 15%), en dat deze afname niet significant verschillend was van wit licht, ook al trekt wit licht meer insecten aan <sup>21</sup>.

### **Positionering van licht**

Er is weinig onderzoek voorhanden naar de effecten van positionering van straatverlichting op insecten, maar in landbouw worden zowel opwaarts schijnende als naar beneden schijnende verlichting gebruikt voor pestcontrole <sup>10,41,42</sup>. Het effect is wellicht soortspecifiek: naar beneden



schijnende verlichting heeft een effect op bodem-bewonende soorten <sup>76</sup>, terwijl opwaarts schijnende verlichting effect heeft op vliegende soorten. Aangezien vliegende insecten licht gebruiken om de hoek van hun vleugels te bepalen, en zich dus te positioneren in de driedimensionale ruimte, kan naar boven schijnend licht ze ruimtelijk desoriënteren <sup>10</sup>. Hoewel we geen studies vinden die het effect van spots testen, lijkt het niet aangewezen om naar boven schijnende verlichting te gebruiken. Verlichting wordt best zodanig gepositioneerd dat er zo weinig mogelijk licht verstrooid wordt.

## Lichten dimmen

21 studies onderzochten effecten van verschillende lichtintensiteit. In het algemeen is het versturende effect evenredig met de lichtintensiteit, maar ook bij lage lichtintensiteiten worden effecten waargenomen. Zo kunnen mannetjes van de grote glimworm (*Lampyris nocticluca*) al bij lichtintensiteiten vanaf 0,18 lx er niet in slagen om vrouwtjes te vinden <sup>54,57,57</sup>. Bovendien kunnen zeer lage lichtintensiteiten (< 1 lx) ook interacties tussen soorten, zoals parasitisme of predatie, beïnvloeden <sup>81</sup>.

In een studie in Zwitserland werden de aantallen van vliegende insecten bij straatverlichting met 'slimme' led-lampen in stedelijke omgeving vergeleken <sup>114</sup>. De onderzoekers vergeleken een situatie waarbij de straatverlichting tot ca. 35% van het niveau gedimd werden als er geen verkeer was (dus 65% gedimd), en led-lampen die de hele nacht continu bleven branden. De verkeer-gestuurde situatie leidde tot 35% minder licht op een gemiddelde nacht, met vooral na 23u minder licht. De waargenomen effecten op insecten hingen af van de insecten-groep. Bij de verkeers-gestuurde situatie werden significant minder Wantsen (Heteroptera) gevangen. Ook de gevangen aantallen van vliesvleugeligen, vlinders, eendagsvliegen en steenvliegen waren opvallend lager. Echter, bij vliegen en kevers, de twee meest talrijke insectengroepen, werd geen statistisch significant verschil vastgesteld. Dit komt vermoedelijk doordat die groepen vooral vroeger op de avond actief zijn.

In een uitgebreid meerjaarlijks veldexperiment in Groot-Brittannië vergeleken Davies en collega's de effecten van diverse verlichtingsstrategiën met led-lampen op bodem-bewonende spinnen en kevers <sup>43</sup>. Het dimmen van witte led-verlichting tot 50% (ca. 14 lx) leidde nog steeds tot zeer grote verschillen in de geleedpotigengemeenschap in vergelijking met een duisternis-situatie.





**Figuur 15: lichten dimmen kan helpen om negatieve effecten tegen te gaan, maar ook laag intens licht (<1 lux) zorgt voor problemen bij sommige soorten. Zo kunnen Grote glimwormen (*Lampyris noctiluca*) elkaar al niet meer vinden bij zo'n lage lichtintensiteiten – foto: Christophe Quintin (Creative Common licentie).**

### **Duur van verlichting beperken**

Drie studies onderzochten het effect van de duur van verlichting (al dan niet in combinatie met andere factoren). Een lab-experiment op de Grote glimworm (*Lampyris noctiluca*) vond dat de reactie van vrouwtjes op licht afhangt van de duur van verlichting<sup>115</sup>: in tegenstelling tot langere verlichting was er bij de kevers die slechts kort (15min) aan kunstlicht werden blootgesteld geen verschil in gedrag met dieren die in de duisternis bleven. Hieruit zou volgen dat korte verlichting (bv. aangestuurd door verkeerssensoren) mogelijk een succesvolle mitigatiestrategie zou zijn voor deze soort.

Hoewel beperkt onderzocht, is de verlichting een deel van de nacht uitschakelen eveneens een veelbelovende mitigatie-strategie voor insecten. In een uitgebreid meerjaarlijks veldexperiment in Groot-Brittannië vergeleek men de effecten van diverse verlichtingsstrategieën met led-lampen op bodem-bewonende spinnen en kevers<sup>43</sup>. Uit dit onderzoek bleek een combinatie van tegelijk (1) de led-verlichting altijd te dimmen tot 50% en (2) de led-verlichting uit te schakelen tussen 0u en 4u het minste effect had. Enkel deze combinatie kwam in aanmerking voor mitigatie. In een veldexperiment in Groot-Brittannië op Avondkoekoeksbloem (*Silene latifolia*), een soort die door nachtvlinders bestoven wordt, werd geen verschil in bestuiving waargenomen tussen duisternis en planten die enkel voor 0u verlicht werden (met zowel LED of HPS)<sup>108</sup>. Het is echter belangrijk te onthouden dat een deel van de soorten enkel actief zijn in de schemering of het eerste deel van de nacht<sup>24</sup>, en een dergelijke strategie dus niet de effecten op alle soorten kan mitigeren.



## 3.2 VOGELS

### Kernpunten

- Veel studies over vogels
- Veel effecten gevonden van nachtelijke verlichting, zowel op individuele vogels als op populaties en interacties tussen soorten
- Nachtelijke verlichting met veel blauw en groen licht heeft een groter negatief effect dan rood of amber licht.
- Knipperende lichten hebben minder effect

### 3.2.1 Inleiding

#### Vogels

Onder de gewervelde dieren zijn vogels de talrijkste, en bij veel mensen ook populairste, soortgroep in België. In ons land werden 462 vogelsoorten waargenomen ([www.belgianrbc.be](http://www.belgianrbc.be)), maar een groot deel van deze soorten zijn dwaalgasten. Bij de broedvogels werden 178 genoteerd, waaronder 17 uitheemse of exotische soorten. Bij de inheemse soorten werden 92 soorten opgenomen in één van de bedreigingscategorieën van de recente rode lijst<sup>116</sup>. Andere soorten zijn dan weer maatschappelijk belangrijk als invasieve exoot (bv. Halsbandparkiet (*Psittacula krameri*), Nijlgans (*Alopochen aegyptiaca*)) of wegens schade bij landbouw (bv. ganzen).

Een aantal vogelsoorten zijn typisch nachtactief, zoals uilen, nachtzwaluwen en sommige moerasvogels. Maar ook andere soorten zijn vaak nachtactief in bepaalde omstandigheden. Zo vind de migratie van vele kleine zangvogelsoorten grotendeels 's nachts plaats.

#### Hoe nemen vogels licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting te verstaan, is het belangrijk te begrijpen hoe vogels licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar vakliteratuur<sup>117,118</sup>.

Vogels hebben over het algemeen een bijzonder goed zicht. Hun ogen lijken sterk op die van reptielen en zijn groot in vergelijking met hun lichaam. Vogels kunnen hun ogen dan ook niet bewegen, en moeten daarom hun kop bewegen. Op hun netvlies hebben ze een hoge dichtheid aan fotoreceptoren (tot 1 000 000 receptoren per mm<sup>2</sup> bij roofvogels in vergelijking met 200 000 receptoren per mm<sup>2</sup> bij mensen). Net als bij andere gewervelde dieren gaat het hier om twee types, namelijk de staafjes en de kegeltjes. Staafjes zijn zeer lichtgevoelig en laten het oog toe te zien bij lage lichtintensiteit, maar geven geen scherp afgeleend beeld. Kegeltjes geven een scherper beeld, maar zijn minder efficiënt bij lage lichtintensiteiten. De verhouding tussen kegels en staafjes verschilt naargelang de leefwijze van de soort. Uilen hebben bijna uitsluitend staafjes, terwijl deze maar 10% uitmaken bij sommige dagactieve soorten zoals gierzwaluwen.

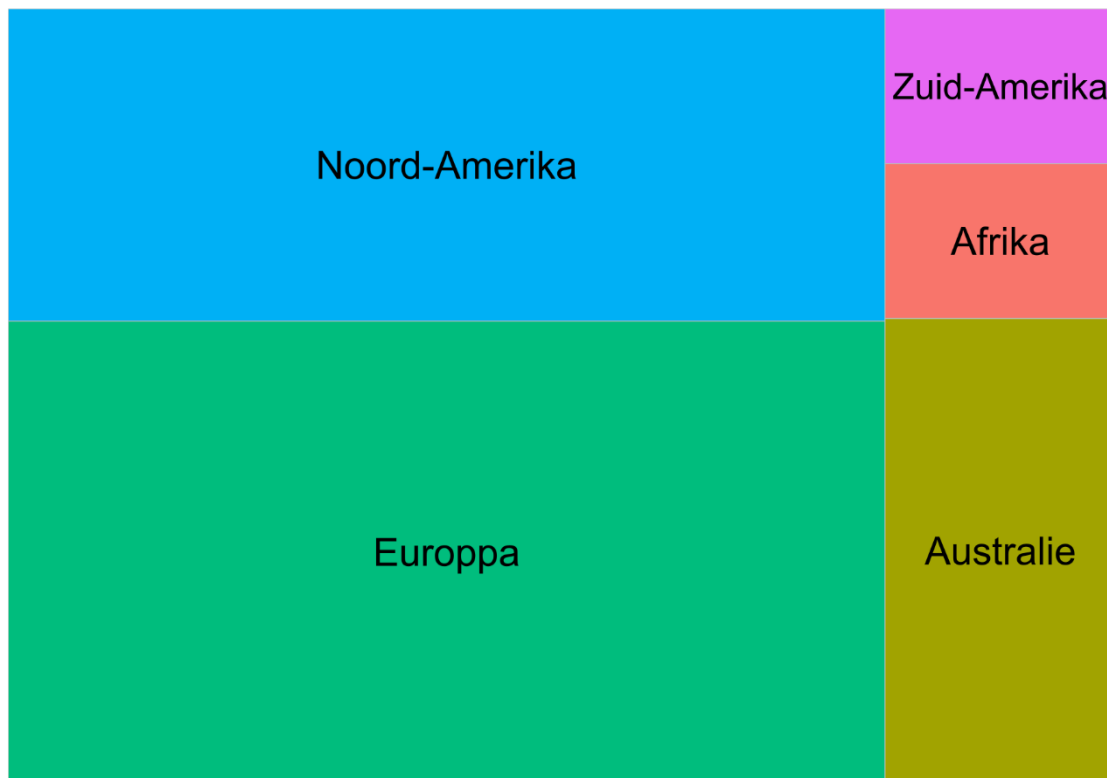


Vogels hebben een tetrachromatisch zicht. Ze hebben types kegeltjes voor lange (rood), medium (groen), korte (blauw) en ultraviolette golflengtes (300-400 nm). Veel soorten kunnen dus ook UV-licht waarnemen. In de fotoreceptoren hebben vogels ook oliedruppeltjes die carotenoïde pigmenten bevatten en die werken als filters om potentiële schade door UV licht te vermijden. Naast een hogere hoeveelheid staafjes hebben nachttactieve vogels vaak ook grotere en meer buisvormige ogen, die toelaten om licht al waarnemen bij zeer lage intensiteiten.

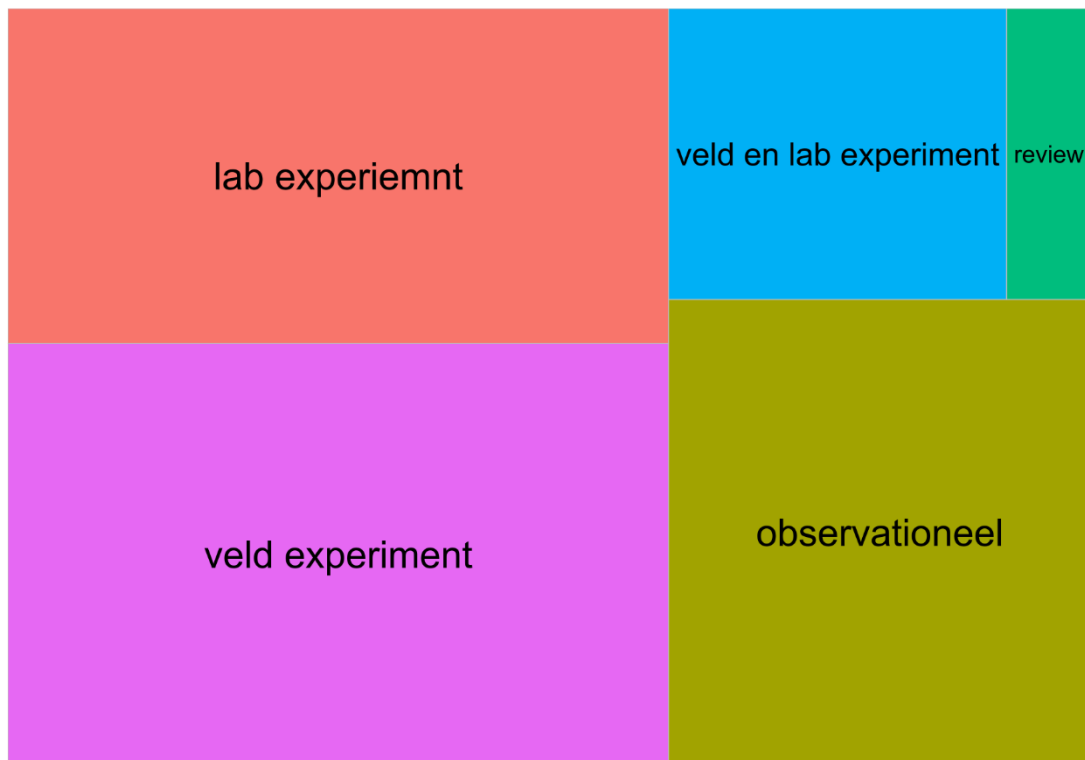
### 3.2.2 Literatuur onderzoek

De literatuurstudie leverde 512 studies op. Voor 493 van deze studies werd gebruik gemaakt van een dataset van een recente, systematische zoektocht van diverse databanken via kernwoorden, referenties en grijze literatuur<sup>119</sup>. Zoals bij andere groepen, was er ook bij vogels een sterke bias in de beschikbare literatuur. De meeste van deze studies bestonden uit observationele studies en veld experimenten (figuur 16a). In de geraadpleegde literatuur was een duidelijke geografische bias naar studies uit Noord-Amerika en Europa (figuur 16b). Ook taxonomisch was er een grote bias, waarbij de zangvogels en zeevogels de meest onderzochte groepen waren (16c).

a) Aantal studies per werelddeel



b) type van de studie



c) Aantal studies per orde



Figuur 16: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie en (c) onderzochte orde (zeevogels = Procellariiformes; watervogels = Anseriformes).





### 3.2.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele vogels

#### Fototaxis en effecten op beweging

Sommige vogels worden aangetrokken tot nachtelijk kunstlicht. Dit fenomeen is reeds lang gekend. Uit rapporten blijkt dat in de 19<sup>de</sup> eeuw grote vuren aangestoken werden door kustbewoners om vogels aan te trekken en die te kunnen vangen<sup>120</sup>. Gezien de meeste studies over de aantrekking van verlichting op vogels observationeel van aard zijn, is er in de literatuur weinig bekend over welke verlichting (soort lamp, intensiteit, spectrum) vooral invloed heeft op de aantrekking en afstoting. Het lijkt er echter op dat vooral verlichting met veel licht in het blauwe spectrum vogels aantrekt (zie ook verder).

Aantrekking tot licht is vooral beschreven **tijdens de trekperiode**. Veel vogelsoorten, bv. zangvogels, en waadvogels, trekken 's nachts. Nachtelijk kunstlicht kan er voor zorgen dat trekkende individuen minder snel vliegen, veranderen van vliegrichting en rond de verlichtingsbron blijven cirkelen en uiteindelijk op de grond terecht komen (zie ook samenvatting <sup>121</sup>). In die zin is het beter te stellen dat migrerende vogels **'gevangen' kunnen worden door nachtelijke verlichting** in plaats van 'aangetrokken' kunnen worden. Een bekend voorbeeld is het herdenkingsmonument voor de aanslagen van 9/11 in New York ('tribute in light'), waarbij twee grote lichtstralen (door breedspectrum xenon spots) de hemel inschijnen. In deze lichtstralen komen honderdduizenden vogels gevangen te zitten <sup>122</sup>. Waarom migrerende vogels aangetrokken worden tot kunstlicht is nog niet helemaal duidelijk. Tijdens nachtelijke migratie is zicht belangrijk <sup>123</sup> en vogels kunnen zich oriënteren op natuurlijke lichtbronnen <sup>121</sup>. Fel kunstlicht kan ervoor zorgen dat ze relatief zwak licht (zoals van sterren) niet meer kunnen waarnemen, en daardoor gedesoriënteerd raken <sup>119</sup>. Trekvogels maken ook gebruik van een intern magnetisch kompas, en de werking daarvan kan ook afhangen van het beschikbare licht <sup>124,125</sup>. Er is ook bewijs dat de aantrekking tot licht tijdens de trekperiode ook afhangt van de leeftijd (sterker bij jonge, onervaren dieren), de soort (vooral soorten die roepen lijken gevoelig), en de weeromstandigheden (vooral veel aantrekking als de trekomstandigheden moeilijk zijn, zoals bij mist of lage wolken, of bij grenzen tussen hoge en lagedrukgebieden). Aantrekking tot licht bij migrerende vogels is vooral beschreven in Noord-Amerika, maar het speelt ook in Europa <sup>119</sup>.

Het gevolg van aantrekking tot kunstlicht kan zijn dat de migrerende dieren op de grond terechtkomen, bv. op terrein dat niet geschikt is om de dag door te brengen en weer energie op te doen, of sterven door uitputting, aanvaringen (bv. met gebouwen) of predatie (zie ook verder) <sup>126</sup>.

Een tweede groep waarbij aantrekking tot licht beschreven wordt in de literatuur zijn **zeevogels** zoals stormvogels en pijlstormvogels. Bij deze soortengroepen lijkt het vooral te gaan om jonge dieren, die op de grond terecht komen bij kunstlicht tijdens hun eerste vlucht, en zo sterven <sup>127</sup>. Meeuwen kunnen dan weer aangetrokken worden tot licht om opportunistisch te foerageren <sup>128-130</sup>.

Naast aantrekking tot licht, worden sommige vogels ook **afgestoten door verlichting**. Dit fenomeen is moeilijker te onderzoeken, en er is nog relatief weinig over bekend. Een studie met lichtloggers in Nederland toonde aan dat Koolmezen (*Parus major*) die broeden in verlichte nestkasten 's nachts verlichting vermijden en vermoedelijk verder van hun kast slapen dan



individuen die in duisternis broeden<sup>131</sup>. Ook blijkt dat nachtactieve vogels als Kerkuil (*Tyto alba*) of Nachtzwaluw (*Caprimulgus europaeus*) minder voorkomen op verlichte plaatsen<sup>132,133</sup>.

### Directe sterfte

Licht kan zorgen voor directe sterfte bij vogels. Tijdens de migratie kunnen nachtelijk trekkende vogels botsen met hoge verlichte gebouwen, en hierbij sterven<sup>134,135</sup>. In de VS wordt geschat dat het hier gaat om 365 tot 988 miljoen vogels per jaar<sup>136</sup>. Lao en collega's<sup>134</sup> tonen bij een observationele studie in Noord-Amerika aan dat hoe meer een gebouw verlichte ramen heeft (type verlichting niet gespecificeerd), hoe hoger het aantal slachtoffers is, en dat licht 's nachts uitgeschakeld moet worden in hoge gebouwen om slachtoffers te vermijden. Aantrekking tot verlichting kan ook voor directe sterfte zorgen bij stormvogels en pijlstormvogels<sup>127</sup>. Daarnaast kan aantrekking tot verlichting er ook voor zorgen dat vogels naar de grond komen en de dag doorbrengen in ongeschikt habitat (bv. industriegebieden), waar onvoldoende voedsel, vervuiling of predatie kunnen zorgen voor sterfte<sup>126,137</sup>.

### Fysiologische effecten

In de literatuurstudie vonden we 38 studies die fysiologische effecten van nachtelijke verlichting op vogels onderzochten. Vaak gaat het hier om experimentele studies in het lab op modelsoorten of pluimvee, en zijn de effecten niet steeds makkelijk te vertalen naar veldsituaties.

Meerdere studies vinden dat verlichting **melatonine**, het slaaphormoon, vermindert, bv. bij Huismus<sup>138</sup> (LED, 3000 K, 5 lux) en Merel (*Turdus merula*)<sup>139</sup> (fluorescentielamp, breed spectrum, 0.3 lux).

Naast melatonine, vonden andere studies dat nachtelijk kunstlicht andere hormonen beïnvloedt, zoals verhoogde concentraties van het **stresshormoon corticosterol** bij Koolmezen<sup>140</sup> (breedspectrum wit LED, 3 lux) en Merel<sup>141</sup> (observationele studie, geen specificaties over welke type verlichting). Ouyang en collega's toonden aan dat het effect van verlichting op stresshormonen kan afhangen van de kleur van het licht, met 40% hogere waarden bij wit licht (en in mindere mate rood) licht in vergelijking met groen licht (zie ook verder)<sup>142</sup>.

Nachtelijk kunstlicht heeft ook **negatief effect op reproductie-fysiologie**. Bij Merels kan het zorgen voor een vroegere piek van testosteron<sup>143</sup> (fluorescentielamp, breed spectrum, 0.3 lux), maar chronische blootstelling aan licht kan net zorgen dat testosteron niet meer piekt<sup>144</sup>. Nachtelijk kunstlicht (warm witte LED) zorgt ook voor grotere teelballen bij Koolmezen<sup>145</sup>. In deze studie hing het effect af van de intensiteit, met een klein effect vanaf 0.5 en 1.5 lux, en een groot effect bij 5 lux (10 tot 30 maal grotere teelballen in vergelijking met duisternis).

Tenslotte werd aangetoond dat nachtelijk kunstlicht de **werking van het immuunsysteem kan verminderen**, bv. bij Huismus<sup>138</sup> (LED, 3000 K, 5 lux). Bij Koolmees werd bij wit licht (8 lux) een verhoogde kans op infectie met bloedparasieten, vermoedelijk door een verminderde weerstand, waargenomen<sup>146</sup>.





**Figuur 17: Nachtelijk kunstlicht beïnvloedt de fysiologie van Koolmezen (*Parus major*) negatief. Zo slapen Koolmezen onrustig in de buurt van straatverlichting en - foto Irene van Schroyen Lantman**

### **Verstoorde timing**

De dagelijkse en seizoenale timing van dieren is afgestemd op de omgeving, en blootstelling aan nachtelijk kunstlicht kan ervoor zorgen dat die verstoord wordt, wat mogelijk negatieve effecten kan hebben op conditie en overleving. We vonden 15 studies die effecten op timing onderzochten.

Ten eerste kan verlichting **dagelijkse timing en slaapritme** verstoren. Nachtelijk kunstlicht kan zorgen voor minder slaap, meer gefragmenteerde slaap en verhoogde beweging 's nachts (bv. bij Koolmees<sup>146,147</sup>, Stadsduiven (*Columba livia*)<sup>148</sup>, Australische eksters (*Cracticus tibicen*)<sup>148</sup> en Merels<sup>139</sup>. Effecten werden al waargenomen vanaf 0.3 lux<sup>139</sup>.

Ten tweede kan verlichting ook de **timing van het broedseizoen** verstoren. Nachtelijk kunstlicht zorgt ervoor dat vogels vroeger beginnen zingen, zowel vroeger op de dag als vroeger op het seizoen<sup>149-152</sup>. Bij verlichting leggen mezen ook vroeger eieren (1.5 dagen bij Pimpelmees (*Cyanistes caeruleus*)<sup>151</sup>, 3 tot 5 dagen bij Koolmezen<sup>153,154</sup>.

Tenslotte kan verlichting ook zorgen voor een verstoorde timing **tijdens migratie**. Bij een studie op Purperzwaluwen (*Progne subis*) die uitgerust werden met lichtloggers bleek dat individuen die blootgesteld werden aan veel licht gemiddeld 8 dagen vroeger vertrokken uit hun overwinteringsgebieden, en dus vroeger toekwamen op hun broedgebied<sup>155</sup>.



### 3.2.4 Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten vogels

Het is aangetoond dat nachtelijke verlichting een negatief effect kan hebben op individuele vogels. Negatieve effecten is op populaties, gemeenschappen zijn amper beschreven, en effecten op soort-interacties zijn beperkt beschreven in de literatuur, maar toch lijkt het uit de beschikbare literatuur zeer waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook effecten heeft op deze niveaus.

#### Effecten op populaties

De effecten van nachtelijke verlichting op populaties zijn slechts beperkt onderzocht, maar sommige studies beschrijven dergelijke grote effecten, bv. bij jonge zeevogels die op de grond terechtkomen of bij nachtelijke trekvogels die sterven na een botsing, dat effecten op populaties zeer waarschijnlijk zijn <sup>121</sup>. La Sorte en collega's vonden dat in Noord-Amerika, de abundantie van 40 nachtelijk migrerende vogelsoorten gecorreleerd is met nachtelijke verlichting (bepaald via satelietdata), maar het effect hangt af van het seizoen<sup>137</sup>. Tijdens de winter en zomer is nachtelijke verlichting gecorreleerd met een lagere abundantie, terwijl tijdens de trekperiode (en dan vooral in het najaar) nachtelijke verlichting net gecorreleerd is met een hogere abundantie bij deze soorten.

#### Effecten op het gemeenschapsniveau

We vonden 5 observationele studies in het literatuuronderzoek die effecten van nachtelijke verlichting op de gemeenschap van vogels bekeken. De twee studies in Europa vonden geen effect van verlichting (bepaald op satelietdata of niet gespecificeerd) op soortenrijkdom of functionele diversiteit van vogels <sup>156,157</sup>. Een studie uit Noord-Amerika vond dat nachtelijke verlichting (bepaald via satelietdata) de soortenrijkdom van nachtelijk migrerende vogels beïnvloed, maar het effect hangt af van het seizoen <sup>158</sup>. Tijdens de winter en zomer zorgt nachtelijke verlichting voor een lagere soortendiversiteit (50% toename in licht zorgt voor respectievelijk 3% en 2% minder soorten). Tijdens de trekperiode in het voorjaar en het najaar zorgt nachtelijke verlichting net voor een hoger aantal soorten (50% toename in licht zorgt voor respectievelijk 2% en 5% meer soorten). Tenslotte vond een studie uit Mexico een negatief effect van de aanwezigheid van verlichtingspalen op zeldzame soorten, maar linkt dit eerder aan competitie met opportunistische soorten die nesten in zo'n verlichtingspalen, zoals Huismussen, dan aan verlichting <sup>159</sup>.

#### Soortinteracties: verhoogde predatie

Sommige vogelsoorten kunnen opportunistisch foerageren bij nachtelijke verlichting. In de literatuur vonden we 69 studies die predatie beschreven door vogels. Het gaat hier om een hele reeks van vogelsoorten, van Gierzwaluwen (*Apus apus*), waadvogels, meeuwen en roofvogels, en een hele reeks aan prooi-soorten, van insecten, vissen en vleermuizen tot andere vogels. De meeste van deze zijn observationeel en anekdotisch, en het is niet duidelijk wat de invloed is op de predator en prooi-soortpopulaties.



### 3.2.5 Effecten op Europees beschermde soorten

Doordat de meeste onderzoeken focussen op effecten op gemeenschapsniveau of effecten op modelsoorten is in de literatuur maar beperkte informatie te vinden over soort-specifieke effecten van nachtelijke verlichting op Europees of Vlaams beschermde soorten. In Vlaanderen komen 94 soorten voor die opgenomen zijn op de bijlage 1 van de Vogelrichtlijn.

Een belangrijke soort is de **Nachtzwaluw** (*Caprimulgus europaeus*), een schaarse broedvogel in heidegebieden en open bossen op zandgrond. Een studie in Zwitserland vond op voormalige broedplaatsen twee tot vijf keer hogere lichtintensiteit in vergelijking met bezette broedplaatsen, terwijl andere factoren als prooibeschikbaarheid schijnbaar niet verschilden<sup>132</sup>. Deze resultaten zijn opmerkelijk, aangezien de soort net actiever is bij feller maanlicht<sup>160</sup>, maar maanlicht heeft dus niet hetzelfde effect als kunstlicht. Siervo & Erhardt suggereren in hun studie dat op broedplaatsen van nachtzwaluw de lichtintensiteit maximaal 0.005 lux zou mogen zijn<sup>132</sup>. Hoewel niet onderzocht in deze studie, stellen de auteurs dat lampen met veel blauw en wit licht zeker vermeden moeten worden.

Bij **Slechtvalk** (*Falco peregrinus*), een broedvogel in voornamelijk stedelijk gebied, werden positieve effecten genoteerd van kunstlicht. Zo vonden verschillende studies, onder meer in België, dat de soort jaarrond 's nachts kan jagen op vogels die aangetrokken of 'gevangen' zijn in monumentenverlichting<sup>161-164</sup>. In Gent werden bij een koppel slechtvalken op de Sint-Baafs kathedraal de proisoorten bepaald, waaronder ook zeldzame soorten die 's nachts trekken als **Geoorde fuut** (*Podiceps nigricollis*), **Kwartelkoning** (*Crex crex*) en **Porseleinhoen** (*Porzana porzana*)<sup>164</sup>, al is het niet bekend of deze predatie een invloed heeft op populaties van deze proisoorten.

Bij andere vogelrichtlijnsoorten werd in de literatuur geen effect gevonden. Wel zijn er studies die wijzen op een verhoogde jachtactiviteit van uilen zoals **Oehoe** (*Bubo bubo*) bij volle maan<sup>165</sup>, waarbij sommige auteurs de hypothese vermelden dat dit mogelijk ook het geval is bij kunstlicht<sup>166</sup>. Kunstlicht en maanlicht zijn echter sterk verschillend, en deze hypothese is nog niet getest.





**Figuur 18:** studies suggereren dat de Nachtzwaluw (*Caprimulgus europaeus*) last ondervindt van nachtelijk kunstlicht. Voormalige broedplaatsen in Zwitserland hebben twee tot vijf keer hogere lichtintensiteit in vergelijking met bezette broedplaatsen– foto: Michiel Lathouwers (Creative Common licentie).



### 3.2.6 Kennis rond mitigatie

Hoewel enkele studies effecten van nachtelijke verlichting op vogels beschrijven, is de kennis rond mitigatie-mogelijkheden van zulke effecten relatief beperkt.

#### Type verlichting en kleurenspectra

Niet alle **types verlichting** hebben hetzelfde effect op vogels. In de literatuurstudie vonden we 8 studies die verschillende types verlichting met elkaar vergeleken. De **conclusies zijn niet eenduidig**, maar in het algemeen lijkt kunstlicht met veel licht in het blauwe spectrum meer negatieve effecten te hebben. Effecten van verschillende types lampen lijken wel soort specifiek. Een studie in Nieuw-Zeeland die vergeleek hoe de timing veranderde als HPS lampen (6.02 lux) vervangen werden door led-licht (4000K, 3.6 lux), vond dat twee van de drie onderzochte vogelsoorten later begonnen zingen (respectievelijk 3 en 15min later) bij led-licht, terwijl een derde geen effect vertoonde <sup>167</sup>. Een experimentele studie op pijlstormvogels in Australië vond dat metalhalide lampen 1.6 keer meer vogels aantrokken dan led-lampen (geen verdere info) en 1.9 keer meer dan HPS lampen (geen verdere info) <sup>168</sup>.

We vonden 19 studies die naar het effect keken van **kleurenspectrum** bij wildlevende vogels, maar de effecten zijn niet eenduidig. In het 'licht op natuur'-project van de Universiteit van Wageningen werd het effect van verschillende lichtkleuren op diverse aspecten van de **broedecologie** van vogels onderzocht (rode, witte en groene LED, ongeveer 8 lux; en duisternis). Er werd geen effect gevonden van licht van verschillende kleuren op de start van vogelzang 's morgens <sup>169</sup>. Ook werd geen eenduidig effect gevonden van de verschillende lichtkleuren op het broedsucces (overleving en conditie van de jongen) bij Koolmees of Bonte vliegenvanger (*Ficedula hypoleuca*) <sup>154</sup>. Wel werd waargenomen dat wit en groen licht zorgen dat Koolmezen vroeger eieren legden, terwijl rood licht niet verschilde van duisternis <sup>153</sup>. De timing van eileg is belangrijk omdat deze moet overeenkomen met de piek in rupsen, en dus voedselbeschikbaarheid en overleving (zeker in jaren met weinig voedsel). Ook werden fysiologische effecten tijdens het broedseizoen waargenomen, waarbij vooral wit licht een negatief effect heeft. Volwassen Koolmezen die broeden bij wit licht waren dubbel zo actief 's nachts, en hebben meer kans op infectie met bloedparasieten (vermoedelijk door een verminderde weerstand) <sup>146</sup>. De hoeveelheden stress-hormonen waren ook bijna 40% hoger bij wit licht in vergelijking met groen licht en duisternis (rood licht verschilde in deze studie niet significant met andere kleuren of duisternis) <sup>142</sup>. Koolmezen nabij wit en groen licht verbruikten wel minder energie dan individuen die broeden nabij duisternis (rood licht verschilde opnieuw niet significant van andere kleuren of van duisternis) <sup>170</sup>. De auteurs van deze laatste studie vermoeden dat dit komt doordat er meer insecten aangetrokken worden door wit en groen licht, en de vogels dus minder moeten werken voor voedsel. **Effecten van lichtkleur tijdens het broedseizoen zijn dus niet eenduidig.**

Tijdens **migratie** vinden vier studies minder aantrekking bij groen of blauw licht, maar vier recentere studies vinden net dat rood licht minder verstrend is. Oudere labexperimenten vonden dat Roodborsten (*Erithacus rubecula*) normaal oriëntatiegedrag vertoonden bij wit licht en groen licht (571 nm), maar dat hun oriëntatie verstoord was bij rood licht (633 nm) <sup>124,125</sup>. Dit komt ook overeen met twee veldstudies in Nederland. Van de Laar beschrijft een observationele studie op een olieboorplatform in de Noordzee, waar het grootste deel van de bestaande witte

lampen vervangen werden door 'groene lampen met weinig licht in het rode spectrum'<sup>171</sup>. Het aantal trekvogels (voornamelijk zangvogels, waadvogels en watervogels) aangetrokken tot het boorplatform uitgerust met groen licht was 50 tot 90% lager dan verwacht op basis van vorige jaren en tellingen op andere plaatsen. Deze studie werd niet gepubliceerd in een wetenschappelijk vakblad, en in het rapport worden geen gedetailleerde specificaties gegeven over de gebruikte lampen. Bovendien bevat het rapport geen statistische analyses. Een tweede studie op het Waddeneiland Ameland in Noord-Nederland vergeleek experimenteel verschillende kleuren en intensiteiten van licht tijdens de najaarstrek<sup>172</sup>. Metaal-Halide lampen werden uitgerust met filters in verschillende kleuren. Bij groene (piek tussen 520 en 540 nm) en blauwe (piek rond 450 nm) lichtkleuren werden minder vogels aangetrokken (respectievelijk 13% en 3% van de voorbijvliegende vogels werd aangetrokken) dan bij witte (meerdere pieken tussen 400 en 850 nm) of rode (piek tussen 800 en 850 nm) lichtkleuren (respectievelijk 61% of 54%). Deze studie heeft echter een zeer lage sample-size en corrigeert niet voor verschillen in lichtintensiteit tussen de verschillende kleuren. De twee veldstudies die aanwijzen dat groen licht beter is, zijn dus van mindere kwaliteit. Vier recentere veldexperimenten vinden net een omgekeerd resultaat. In een uitgebreid veldexperiment met LED verlichting op een Duits Waddeneiland werd de aantrekkingskracht van migrerende zangvogels getest<sup>173</sup>. Deze studie vindt dubbel zoveel zangvogels bij blauw (piek 470 nm), groen (piek 530 nm), geel (mix groen en rood) en wit (mix van alle andere kleuren) licht in vergelijking met rood licht (piek 627 nm) en duisternis. Ook in studies in Noord-Amerika<sup>174</sup> en Azië<sup>175,176</sup> werd waargenomen dat rood licht trekvogels het minste verstoort, en blauw of groen licht net vogels aantrekt. **Rood licht lijkt dus aangewezen voor trekvogels.**

**Fysiologische effecten** van verschillende lichtkleuren werden onderzocht in 4 studies. Kernbach en collega's stelden Huismussen (*Passer domesticus*) bloot aan verschillende types LED licht (alle 5 lux): van blauw (5000 K), wit (3000 K) tot amber (1800 K), en vergeleken infecties van het Westnijlvirus<sup>138</sup>. Dieren blootgesteld aan amberkleurige verlichting hadden een even hoge overleving (75%) als de controle-groep die duistere nachten hadden, terwijl overleving 25% lager lag bij dieren blootgesteld aan blauwe en witte led-verlichting. Een veldexperiment bij Zwarte zwanen (*Cygnus atratus*) vond dan weer dat bij amber licht (LED, 2100 K) zwanen significant minder rusten 's nachts (gemiddeld ongeveer 3u) ten opzichte van duisternis (gemiddeld ongeveer 3,5u rust), maar er geen invloed was van verlichting op melatonine concentraties<sup>177</sup>. Rusteloosheid onder wit licht (LED, 3700 K) was variabel, en verschilde niet significant van duisternis of amber. De intensiteit van de verlichting in deze studie was relatief laag (0.1 lux verder weg tot 10 lux direct onder de lamp), en mogelijk zochten de zwanen de plekken met het minst licht op, zeker bij wit licht. Effecten lijken wel soortspecifiek. Zo werd gevonden dat amber licht (LED, 2140 K, 18 lux) en wit licht (LED, 4190 K, 18 lux) evenzeer de slaap van duiven (*Columba livia*) verstoorden, terwijl amber niet verstorend was voor Australische eksters (*Cracticus tibicen*)<sup>148</sup>. In het algemeen heeft **verlichting met minder blauw licht zoals amber of rood licht dus minder negatieve effecten op fysiologie.**

### Flikkerend licht

Vele studies, voornamelijk uit Noord-Amerika, tonen aan dat **flikkerend licht veel minder aantrekkelijk is voor vogels tijdens nachtelijke migratie in vergelijking met continu licht**<sup>121,174,178,179</sup>. Veel van deze studies zijn echter moeilijk te interpreteren doordat er niet gecorrigeerd werd voor kleur, lichtintensiteit of locatie van de verlichte masten. Er zijn echter ook enkele veldexperimenten die ook deze bevinding ondersteunen. Voor Europa is vooral de studie van Rebke en collega's<sup>173</sup> relevant, waar bij migrerende vogels langs de Duitse kust





aangetoond werd dat er bij flikkerend led-licht (30 flashes per minuut) – in contrast met continue licht – geen verschil was in voorbijvliegende vogels in vergelijking met duisternis. Dit resultaat werd bekomen bij elk onderzocht kleur licht (blauw (piek 470 nm), groen (piek 530 nm), rood (piek 627 nm), geel (mix groen en rood) of wit (mix van alle andere kleuren)) en de twee onderzochte lichtintensiteiten (6800 lux of 3400 lux). Naast flikkerend licht had enkel continue rood licht in deze studie geen negatief effect (zie eerder). Vooral als licht moet dienen als waarschuwing (bv. op hoge masten, gsm-antennes of windturbines) is flikkerend licht een goede optie <sup>178</sup>.

### Positionering van licht

Amerikaanse wetenschappers onderzochten het effect van verlichting (welk type is niet gespecificeerd) bij een surfresort in Hawaï te positioneren zodat er geen licht naar boven scheen. Deze simpele aanpassing zorgde voor 40% minder aangetrokken stormvogels en pijlstormvogels (van 444 naar 272 individuen)<sup>180</sup>.

### Lichten dimmen

Over het algemeen heeft **feller nachtelijk licht meer negatieve effecten** dan minder intens licht, en dus is lichten dimmen een mogelijk interessante mitigatievorm<sup>121</sup>. Bij Koolmezen werd vastgesteld dat vogels blootgesteld aan 0.05 lux nachtelijke verlichting (witte LED) ongeveer een half uur voor zonsopgang actief werden, terwijl dit bij een blootstelling van 1.5 lux ongeveer 2 uur vroeger was, en bij 5 lux zelfs 5u vroeger <sup>181</sup>. Er is echter weinig gekend over de waarde van lichtintensiteit waarop er geen ecologische effecten meer zijn. Effecten op slaap en hormonenhuishouding werden reeds vastgesteld vanaf blootstelling aan 0.3 lux ‘s nachts effect <sup>139</sup>.

### Duur van verlichting beperken

Het effect van een deel van de nacht de verlichting uit te schakelen is slechts beperkt onderzocht, maar lijkt een veelbelovende mitigatie-vorm. Van Doren en collega's tonen aan dat binnen de 20 minuten na het uitschakelen van verlichting van het '9/11 lights tribute'-monument, de 'gevangen' vogels opnieuw hun normaal gedrag vertonen en verder vliegen<sup>122</sup>. Deze auteurs suggereren dan ook om verlichting helemaal uit te zetten op nachten waarop hoge trekactiviteit verwacht wordt, en/of nachten met omstandigheden waarbij veel dieren aangetrokken worden (lage wolken, mist, etc – zie ook eerder). Bij Pijlstormvogels en Stormvogels werd beschreven dat de aantrekking tot licht voornamelijk 1 tot 4u na zonsondergang plaats vindt, en suggereren de auteurs om verlichting in die periode uit te schakelen <sup>180</sup>.



## 3.3 VLEERMUIZEN

### Kernpunten

- Veel studies over vleermuizen
- Alle studies vonden effecten, voornamelijk op gedrag
- Vleermuizen zijn lichtschuw, al kunnen enkele soorten onder bepaalde omstandigheden wel jagen rondom licht.
- Effecten hangen af van lichtkleur en lichtintensiteit (hoe hoger de lichtintensiteit en hoe meer blauw licht het licht bevat hoe heeft groter effect), maar ook weinig intens licht (<1 lux) en rood/amberkleurig licht heeft negatieve impact.
- Effecten waargenomen van 50 van de lichtbron
- Effecten waargenomen vanaf 1 lux

### 3.3.1 Inleiding

#### Vleermuizen

Hoewel vleermuizen tot de zoogdieren behoren, bespreken we de soortgroep in een apart hoofdstuk in deze literatuurstudie. Dit enerzijds omdat de effecten van nachtelijk kunstlicht op de soortgroep erg veel onderzocht worden en anderzijds omdat alle soorten beleidsrelevant zijn. Alle 21 soorten vleermuizen die in Vlaanderen voorkomen zijn namelijk opgenomen op de bijlage IV van de Europese habitatrichtlijn, en 7 zijn ook opgenomen op de bijlage II. De groep bevat veel bedreigde soorten (slechts 7 soorten opgenomen in de categorie 'momenteel niet bedreigd' in de laatste rode lijst <sup>182</sup>).

#### Hoe nemen vleermuizen licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting te verstaan, is het belangrijk te begrijpen hoe vleermuizen licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar vakliteratuur <sup>183</sup>.

Vleermuizen kunnen over het algemeen goed zien 's nachts. Hoewel echolocatie zeer belangrijk is voor deze soortgroep, wordt deze informatie vaak gecombineerd met visuele informatie <sup>184</sup>. Sommige soorten, zoals de Europese Gewone grootoorvleermuis (*Plecotus auritus*) gebruiken ook alleen visuele informatie om prooien te vinden <sup>185</sup>. Net als bij andere zoogdieren bevatten de ogen van vleermuizen twee types lichtgevoelige cellen: de staafjes en de kegeltjes. Staafjes zijn zeer lichtgevoelig en laten het oog toe te zien bij lage lichtintensiteit, maar geven geen scherp afgelijnd beeld. Kegeltjes geven een scherper beeld, maar zijn minder efficiënt bij lage lichtintensiteiten.

Kegeltjes zijn lichtgevoelig voor een bepaald deel van het lichtspectrum. De meeste vleermuizen beschikken over twee types: de S-kegeltjes en de M/L kegeltjes. De S-kegeltjes zijn bij sommige vleermuizen gevoelig voor UV <sup>186,187</sup>, terwijl die bij andere soorten, net als bij andere zoogdieren, voor blauw of violet licht gevoelig zijn. De M/L kegeltjes zijn gevoelig voor groen licht (M) of geel-rood licht (L).



De meeste vleermuizen hebben een dichromatisch zicht (samengesteld uit twee kleuren) (een trichromatisch zicht werd vastgesteld bij één soort *Haplonycteris fischeri*<sup>188</sup>). In vergelijking met bv. vogels, reptielen of insecten kunnen vleermuizen een kleiner deel van het lichtspectrum waarnemen<sup>189</sup>.



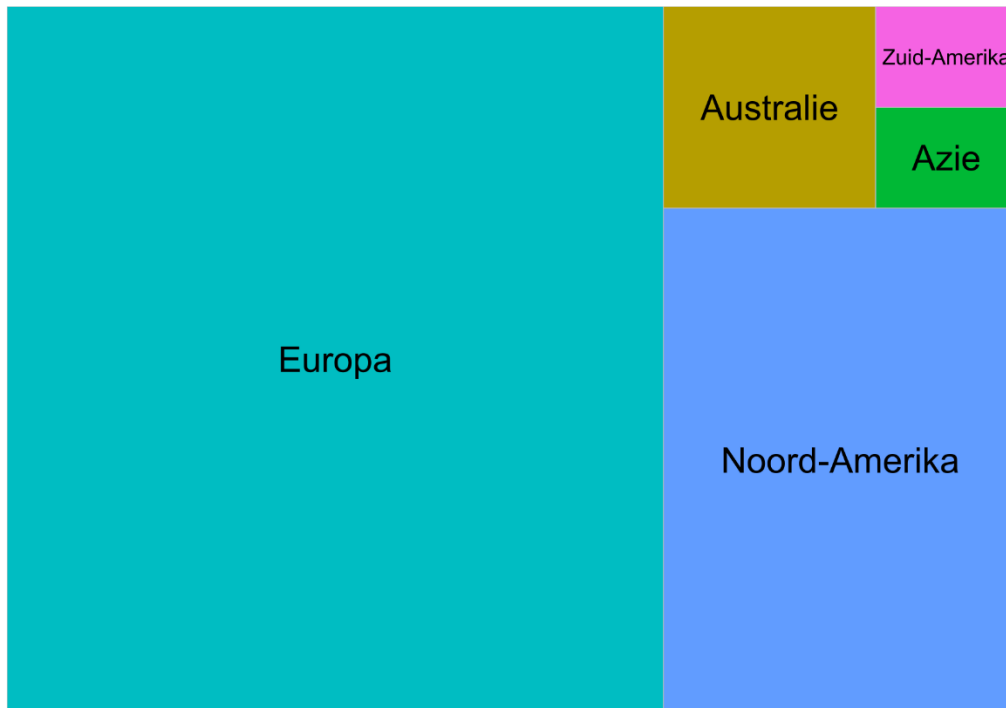
**Figuur 19: Ondanks wat vaak gedacht wordt, zijn vleermuizen niet blind. Ook Europese soorten, zoals de Gewone grootoorvleermuis (*Plecotus auritus*) kunnen puur op basis van zicht jagen. Foto: René Janssen.**

### 3.3.2 Literatuur onderzoek

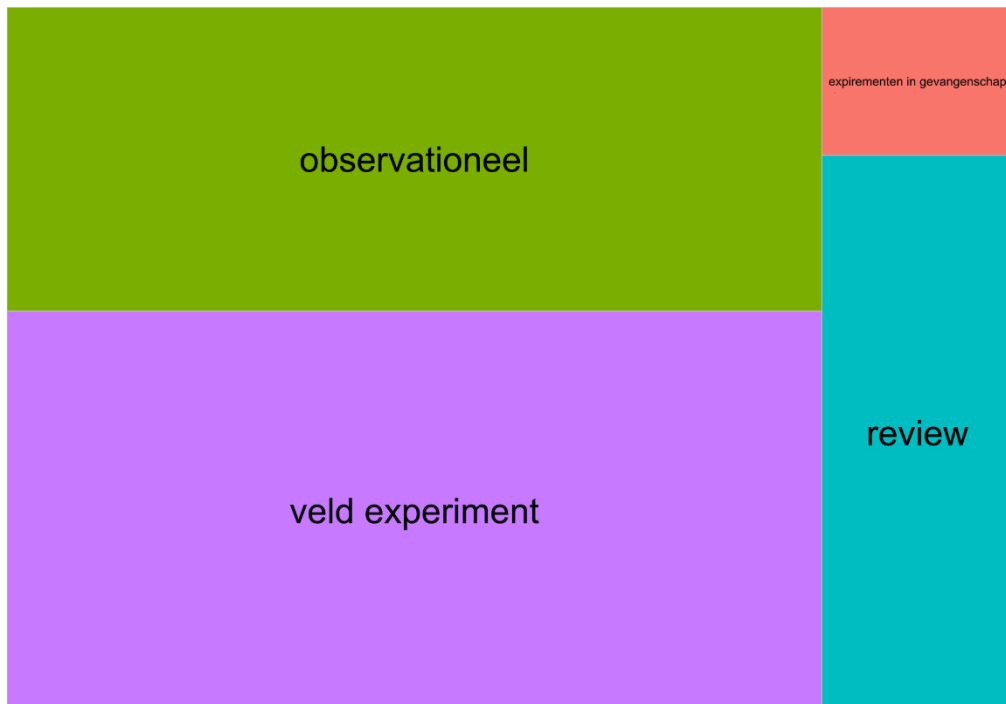
De literatuurstudie leverde 161 studies op, waarvan 113 werden gevonden via systematische zoektocht met kernwoorden en de overige studies via referenties, grijze literatuur en andere. Over het algemeen zijn (zeer) veel studies beschikbaar voor vleermuizen. Het gaat meestal om veldexperimenten of observationele studies, meestal op gedrag en (jacht)activiteit. Er zijn zeer weinig studies naar fysiologische effecten, of studies die plaatsvonden over een langere termijn.



a) Aantal studies per werelddeel



b) type van de studie



Figuur 20: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie.



### 3.3.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele vleermuizen

#### Effecten op beweging, gedrag en activiteit

De effecten van nachtelijk kunstlicht op vleermuizen werden onderzocht tijdens verschillende onderdelen van het gedrag:

- **Foerageergactiviteit:** het effect van nachtelijke verlichting op foerageeractiviteit en -gedrag werd onderzocht in 96 studies, en hieruit blijkt een sterk soortspecifiek effect. Sommige soorten, voornamelijk soorten die snel vliegen en aangepast zijn aan foerageren in halfopen tot open landschap, kunnen opportunistisch foerageren op insecten die aangetrokken worden door licht. Traag-vliegende soorten, aangepast aan gesloten landschap, zijn over het algemeen lichtschuw<sup>97,190</sup>. In een veldexperiment in Noord-Amerika werd aangetoond dat verlichting (LED, 5500K) ervoor zorgt dat vleermuizen meer nachtvinders en kevers in hun dieet hadden, al waren de effecten soort specifiek<sup>86</sup>. Vermoedelijk kan dit voor een aantal soorten voordelen opleveren. Zo wordt ingeschat dat Noordse vleermuis (*Eptesicus nilsonii*) dubbel zo snel aan zijn energiebehoefte kan voldoen bij het foerageren rond verlichting in vergelijking met bij het foerageren in duisternis<sup>191</sup> (doordat rond verlichting zowel meer insecten als meer grote insecten te vinden zijn). Dit wordt ook ondersteunt door data uit Noord-Amerika, waar in gebieden met veel verlichting Grote bruine vleermuizen (*Eptesiscus fuscus*) 50% minder tijd spenderen bij het foerageren in vergelijking met dieren die in duistere gebieden leven<sup>192</sup>. Maar naast deze 'positieve' effecten is een aantal andere soorten echter sterk lichtschuw, en foerageert niet rondom verlichting<sup>193,194</sup>. Sommige soorten zijn altijd lichtschuw, terwijl andere soorten verlichting enkel vermijden vroeg op de avond (bv. Laativlieger (*Eptesicus serotinus*)<sup>195</sup>) of in bepaalde landschappen (bv. Ruige dwergvleermuis (*Pipistrellus nathussi*) reageert enkel in bossen positief op verlichting en vermijdt licht in open landschap<sup>196</sup>). Over het algemeen kan gesteld worden dat **de effecten van verlichting op foerageergedrag en activiteit sterk soort- en contextafhankelijk zijn, met licht-opportunistische soorten en lichtschuwe soorten.**
- **Vliegroutes:** vleermuizen gebruiken routes om zich doorheen het landschap te verplaatsen, van verblijfplaats naar jachtgebied en terug. Tien studies onderzochten het effect van licht op dergelijke routes. Alle studies vinden negatieve effecten<sup>33,194,197,198</sup>. Bij typisch lichtschuwe soorten als *Myotis* soorten en Kleine hoefijzerneuzen (*Rhinolophus hipposideros*) word waargenomen dat er al effecten zijn vanaf 3.6 lux<sup>198</sup>, en – bij hoefijzerneuzen – ook voor rood licht (55 lux, piek rond 625 nm)<sup>194</sup>. Het is belangrijk erop te wijzen dat ook bij soorten die tijdens het foerageren opportunistisch van licht gebruik kunnen maken, negatieve effecten gevonden worden van verlichting op vliegroutes<sup>199–201</sup>. Bij Gewone dwergvleermuis (*Pipistrellus pipistrellus*) werd bv. in het Oost-Vlaamse Ename waargenomen dat dieren op vliegroute, net na zonsondergang, de onverlichte kant van een bomenrij kiezen terwijl dezelfde soort later op de avond rondom dezelfde straatlantaarns foerageerde<sup>202</sup>. In deze studie maakten dieren omwegen tot 400m om open verlichte plekken op de vliegroute (100m waar geen bomen waren) te vermijden. In een uitgebreide veldstudie in Groot-Brittannië werd gevonden dat de neiging van Gewone dwergvleermuis om op vliegroute open stukken over te steken af hing van de verlichting<sup>200</sup>. Korte open afstanden (20-40 m) worden tot ongeveer 30 lux, terwijl langere open afstanden (60-80m)



enkel overvlogen worden bij verlichting van minder dan 10 lux. Over het algemeen blijkt dus dat **verlichting langs vliegroutes zorgt voor verlies aan connectiviteit bij alle soorten.**

- **Kolonies en verblijfplaatsen:** vijf studies onderzochten het effect van verlichting bij kolonies en verblijfplaatsen. Bij het verlaten van kolonies vermijden vleermuizen licht, vermoedelijk als om predatie te vermijden<sup>203</sup>. Alle studies vonden een sterk negatief effect van verlichting bij kolonies. Bij een veldexperiment bij gebouw-bewonende kolonies in Hongarije werd gevonden dat Ingekorven vleermuizen (*Myotis emarginatus*), Kleine vale vleermuizen (*Myotis blythii*) en Grote hoefijzerneuzen (*Rhinolophus ferrumequinum*) pas uitvliegen eens verlichting (type niet gespecificeerd) gedoofd is<sup>204</sup>. Bij Kleine dwergvleermuis (*Pipistrellus pygmaeus*) werd bij kolonies in Groot-Brittannië vastgesteld dat er 30 tot 85% minder dieren uitvlogen bij verlichting (halogeen lamp, met filters), met vooral een sterk effect bij wit en blauw licht<sup>205</sup>. **Verlichting bij verblijfplaatsen zorgt dus voor verlies van dit deel van het habitat**, met mogelijke gevolgen voor vleermuispopulaties (zie verder).
- **Winterverblijfplaatsen:** winterverblijfplaatsen vormen een zeer belangrijk onderdeel van het habitat van vleermuizen. Naast een plek voor winterslaap, worden deze ook gebruikt als 'zwermplek' in het najaar, waarbij de dieren er komen paren. Winterverblijfplaatsen zijn dus ook belangrijk voor genetische uitwisseling. Er is nog zeer weinig gekend over effecten van nachtelijke verlichting op winter- en zwermverblijfplaatsen. Bij een observationele studie bij tien forten rond Antwerpen werd vastgesteld dat bij delen die verlicht werden (zowel door natriumlampen (straatverlicht) als door spots als monumentenverlichting (geen verdere specificaties)) er geen zwermactiviteit waar te nemen was van *Myotis*-, *Plecotus*- en *Pipistrellus*-soorten. Bij één locatie werd waargenomen dat bij het aansteken van verlichting de zwermactiviteit onmiddellijk stopte<sup>206</sup>. Ondanks het gebrek aan studies, lijkt **het zeer waarschijnlijk dat verlichting bij winterverblijfplaatsen ook voor het verlies van dit deel van het vleermuishabitat zorgt**<sup>5</sup>.





**Figuur 21:** alle vleermuizen zijn in zekere mate lichtschuw. Ook soorten die soms opportunistisch foerageren rond verlichting, zoals de Laatvlieger (*Eptesicus serotinus*) vermijden verlichting op vliegroutes of tijdens de schemering. Foto: René Janssen.

Naast deze factoren tonen verschillende studies tonen ook aan dat het effect van nachtelijke verlichting op vleermuizen ook van de **landschapscontext** afhangt. Bij een studie in het zuiden van Frankrijk (regio Valence) werd vastgesteld dat effecten (zowel positief als negatief) vooral uitgesproken zijn buiten stedelijk gebied (bos, wetland en landbouwlandschap), en dat **in stedelijk gebied er minder effecten** (zowel positief als negatief) waar te nemen waren van licht<sup>207</sup>. Bij een observationele onderzoek in Berlijn werd gevonden dat effecten van licht (zowel positief als negatief) vooral waar te nemen zijn **in gebieden met veel bomen**<sup>208</sup>. Voor licht-opportunistische Dwergvleermuizen werd waargenomen dat de soort in vergelijking met duisternis 11 keer meer voorkwam bij verlichting bij hoge boom-dekking (50% bomen) en slechts 1.4 keer meer voorkwam bij verlichting bij lage boom-dekking (25% bomen). Bij lichtschuwe *Myotis* soorten werden in vergelijking met duisternis 22 keer minder waargenomen bij verlichting bij hoge boom-dekking, en 6 keer minder bij verlichting bij lage boomdekking. Deze auteurs benadrukken dat verlichting vooral in boomrijke gebieden vermeden moet worden.

### **Fysiologische effecten van licht**

We vonden slechts één studie die fysiologische effecten van nachtelijk kunstlicht bekeek. Het effect van nachtelijk kunstlicht (LED, 4000K) op  $\beta$ -hydroxybutaan zuur, een fysiologische marker die gelinkt is aan foerageersucces bij vleermuizen, werd bij verschillende Noord-Amerikaanse soorten onderzocht<sup>209</sup>. Op verlichte sites werd bij een soort die foerageert rond licht, namelijk de Rode vleermuis (*Lasiurus borealis*), verhoogde waarden gevonden vroeg op de avond. Bij

onverlichte sites was dit niet het geval. Bij vier andere lichtschuwe soorten werd zowel op verlichte als onverlichte sites geen verhoogde waardes gevonden. Deze studie toont dus aan dat de Rode vleermuis meer foerageer succes heeft rondom licht, terwijl dit voor de lichtschuwe soorten niet het geval is.

## Reproductie

Directe effecten op reproductie werden onderzocht in één studies. Bij een studie in Hongarije werd de groei van juveniele Ingekorven vleermuizen en Kleine vale vleermuizen vergeleken tussen kolonies op gebouwen die langs buiten verlicht waren, en kolonies op gebouwen zonder verlichting (de studie geeft geen informatie over het type verlichting) <sup>204</sup>. Hieruit bleek dat juveniele vleermuizen van op donkere kolonies groter en zwaarder waren. Recent lange termijn onderzoek op Bechsteins vleermuis (*Myotis bechsteinii*) toont aan dat de grootte van jonge dieren effecten op lange termijn kan hebben voor de populatie, zoals effecten naar voortplantingssnelheid en sterfte <sup>210</sup>. Blootstelling aan verlichting op kolonies kan dus mogelijk grote effecten hebben. Anderzijds heeft de studie een relatief kleine sample size (3 en 6 kolonies voor de Ingekorven vleermuis en Kleine vale vleermuis respectievelijk), en zijn er veel factoren die groei kunnen beïnvloeden. Meer onderzoek op het effect van verlichting op reproductie is dus nodig.

Verlichting kan ook indirecte effecten op reproductie. Bij de Noord-Amerikaanse *Myotis grisescens* werd vastgesteld dat hoe groter de afstand die jonge vleermuizen moeten afleggen tussen hun verblijfplaats en hun foerageergebied, hoe hoger de sterfte <sup>211</sup>. Zoals eerder gesteld kan verlichting vliegroutes sterk beïnvloeden <sup>200,202</sup>, en kunnen dieren omwegen maken om verlichting te vermijden.

### 3.3.4 Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten

Het is aangetoond dat nachtelijke verlichting een negatief effect kan hebben op individuele vleermuizen. Negatieve effecten op populaties, gemeenschappen en soort-interacties zijn zeer beperkt beschreven in de literatuur.

#### Effecten op populaties

We vonden slechts twee studies, beiden uit Zweden, die op langere tijdsschaal het effect van verlichting op vleermuispopulaties onderzocht. Bij Gewone grootoorvleermuis werd gevonden dat het aantal kerken waar kolonies aanwezig waren (60% in de jaren 1980) afgenomen was tot ca. 40% in 2016 <sup>212</sup>. Bij alle verlaten kolonieplaatsen was in de tussentijd monumentenverlichting geplaatst (type niet gespecificeerd). Het is in deze niet duidelijk of de dieren verhuisd zijn naar alternatieve plaatsen (waardoor de populatie stabiel kan blijven maar er dus sprake is van habitatverlies), of dat de kolonies weldegelijk helemaal verdwenen zijn (en er dus sprake is van een populatie-afname). Ook in Vlaanderen zijn verschillende voorbeelden bekend van kolonies die verlaten werden na het aanbrengen van verlichting (bv. Ingekorven vleermuis – Moelingen <sup>213</sup>; Grijs grootoorvleermuis (*Plecotus austriacus*) – Weelde (Van Gorp F mondelinge mededeling)).





Een tweede studie bij Noordse vleermuis in Zuid-Zweden toont een sterke achteruitgang tussen 1988 en 2017 <sup>214</sup>. In deze periode ging de soort op onverlichte delen met 59%, en op verlichte plekken met 85% achteruit. De auteurs linken deze achteruitgang met de omzetting van kwikdamplampen (die veel insecten aantrokken) naar natriumlampen, aangezien Noordse vleermuis vaak foerageert rondom verlichting.

Ondanks deze beperkte onderzoeken lijkt het op basis van de eerder besproken studies zeer waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting populatie-afnames veroorzaakt bij vleermuizen door verlies aan populatiegrootte van prooien (zie hoofdstuk over geledpotigen), verlies aan jachthabitat, verblijfplaatsen en verlies aan connectiviteit.



**Figuur 22: Een studie in Zweden vond het aantal verblijfplaatsen van de Gewone grootoorvleermuis (*Plecotus auritus*) op kerkzolders sterk af sinds de jaren '80. Bij alle verlaten kolonieplaatsen was in de tussentijd monumentenverlichting geplaatst. Foto: René Janssen.**

### **Interacties tussen soorten: interacties met insecten**

Verlichting zorgt voor gewijzigde interacties tussen vleermuizen en insecten. Niet alleen zijn insecten aangetrokken tot licht in grote densiteiten aanwezig, maar licht **verstoort** ok het **anti-predator gedrag** (ontwijkende vluchtbewegingen) die nachtvinders in duisternis vertonen als reactie op vleermuizengeluiden <sup>92-95</sup>.



## Interacties tussen soorten: competitie

Aangezien sommige soorten opportunistisch kunnen profiteren van verlichting, en andere soorten net zeer lichtschuw zijn, kan verlichting mogelijk competitie-verhouding tussen soorten veranderen. Een veelgeciteerde studie uit Zwitserland stelt dat dit het geval zou kunnen zijn voor de Gewone dwergvleermuis (die opportunistisch foerageren rond licht) en de Kleine hoefijzerneus (*Rhinolophus hipposideros*) (een zeer lichtschuwe soort) <sup>215</sup>, maar de studie zelf geeft helemaal geen data die deze hypothese ondersteunt. Een recente studie in Italië vergeleek het voorkomen van Gewone dwergvleermuis en Kuhls dwergvleermuis (*Pipistrellus kuhli*) <sup>216</sup>. Uit een combinatie van radio-tracking en habitat-modellering blijkt dat Kuhls dwergvleermuis meer verlichting gebruikt, en Gewone dwergvleermuis juist minder verlichting gebruikt als Kuhls dwergvleermuis aanwezig is, wat vermoedelijk wijst op **competitie**.

### 3.3.5 Effecten op Europees beschermde soorten

Alle in Vlaanderen voorkomende vleermuissoorten zijn opgenomen op de bijlagen van de Europese habitatrichtlijn. Doordat het effect van nachtelijk kunstlicht op vleermuizen relatief goed onderzocht is in Europa, is veel informatie te vinden over soort-specifieke (of soortgroep-specifieke) effecten van nachtelijke verlichting op Europees of Vlaams beschermde soorten. Nachtelijk kunstlicht heeft negatieve effecten op alle soorten, ook al zijn er een aantal soorten die opportunistisch kunnen foerageren rondom licht.

Tabel 4 geeft een overzicht per soortgroep, inclusief referenties naar relevante studies.

////////////////////////////////////

Tabel 4: Samenvatting van de effecten van nachtelijk kunstlicht op verschillende onderdelen van vleermuisactiviteit voor soortgroepen die voorkomen in Vlaanderen. Rood duid negatieve effecten aan, groen positieve effecten. Referenties zijn niet exhaustief

Soortgroep	Zomer-verblijfplaats	Vliegroutes	Jachtgebied	drinkplaats	Winter- en zwerm-verblijfplaats
Dwergvleermuizen ( <i>Pipistrellus spec.</i> )	Lichtschuw <sup>5,202</sup>	Lichtschuw 200,202 maar zie 194	Opportunistisch <sup>193,194</sup> maar zie 217	Lichtschuw <sup>218</sup>	? (vermoedelijk lichtschuw)
Myotis soorten ( <i>Myotis spec.</i> )	Lichtschuw <sup>204,219</sup>	Lichtschuw 204,219	Lichtschuw 193,196	Lichtschuw <sup>218</sup>	Lichtschuw 5,206
Grootoorvleermuizen ( <i>Plecotus spec.</i> )	Lichtschuw <sup>212</sup>	Lichtschuw 212	Lichtschuw 193,196	Lichtschuw <sup>218</sup>	Lichtschuw 5,206
Mopsvleermuis ( <i>Barbastella barbastellus</i> )	Vermoedelijk Lichtschuw <sup>5</sup>	Lichtschuw <sup>5</sup>	Lichtschuw <sup>5</sup>	Lichtschuw <sup>218</sup>	Vermoedelijk lichtschuw <sup>5</sup>
Rosse en Bosvleermuis ( <i>Nyctalus spec.</i> )	Lichtschuw <sup>5</sup>	Lichtschuw 201	Opportunistisch <sup>5,196</sup> - maar zie 201	Lichtschuw <sup>218</sup>	? (vermoedelijk lichtschuw)
Laatvlieger ( <i>Eptesicus serotinus</i> )	Lichtschuw <sup>202</sup>	Lichtschuw 195,202	Opportunistisch <sup>5,202</sup> maar zie 195	Lichtschuw <sup>218</sup>	? (vermoedelijk lichtschuw)
Hoefijzerneuzen ( <i>Rhinolophus spec.</i> )	Lichtschuw <sup>204</sup>	Lichtschuw 33,194	Lichtschuw 33,194	Lichtschuw <sup>218</sup>	Lichtschuw 5

////////////////////////////////////

### 3.3.6 Kennis rond mitigatie

#### Type verlichting en kleurspectra

Zeven gevonden studies vergelijken het effect van verschillende types lampen. **Tabel 5** geeft een overzicht van de verschillende studies.

Tabel 5: bespreking van studies die effecten van verschillende types lampen bespreken.

Type verlichting	Studie	Resultaat
Metal halide vs. Natrium (LPS)	220	Ca. 50% hogere activiteit van licht-opportunistische soorten bij metal halide lampen
Natrium (LPS) vs. LED	198	Het negatief effect van LED en Natriumlampen op Kleine hoefijzerneus is even groot
	221,222	Effect hangt af van intensiteit: bij felle verlichting (> ca. 50 lux) minder activiteit van Gewone dwergvleermuis bij LED; bij minder felle verlichting (< ca. 50 lux) meer activiteit bij LED.
Kwikdamp <sup>A3</sup> vs. LED	223	Lichtschuwe <i>Myotis</i> soorten werden 4 à 5 keer meer waargenomen bij LED, Gewone dwergvleermuis werd 45% minder waargenomen bij LED.
	208	Meer jachtactiviteit van licht opportunistische soorten bij kwikdamp-verlichting
	214	Omzetting van kwikdamplampen naar LED wordt gelinkt met achteruitgang van Noordse vleermuis

Bij lichtschuwe soorten wordt minder duidelijke effecten gevonden. In Duitsland werd bij een veldexperiment gevonden dat lichtschuwe *Myotis* soorten 4,5 maal meer waargenomen werden bij Led-verlichting in vergelijking met kwikdamplampen <sup>223</sup>. Bij een observationele studie in Berlijn werd geen verschil waargenomen tussen UV-rijke lampen (metalhalide en kwikdamplampen) en LED lampen: beide types hadden een sterk negatief effect op *Myotis* soorten <sup>208</sup>. Stone en collega's vinden geen verschil tussen het effect van LED lampen en dat van natriumlampen op vliegrouetes van Kleine hoefijzerneuzen <sup>198</sup>. Bij licht-opportunistische soorten is er wel een verschil, waarbij jachtactiviteit vooral hoog is bij lamptypes die meer insecten

<sup>A3</sup> Er zijn in Vlaanderen nauwelijks nog kwikdamplampen in gebruik voor openbare verlichting. Hogedruk kwikdamplampen zijn door Europese regelgeving reeds in 2012 verboden (mogen niet meer geproduceerd en ingevoerd worden in Europa). Lagedruk kwikdamplampen (TL en spaarlampen) zijn nooit veel gebruikt in openbare rijwegverlichting en deze lamptypes worden in 2023 ook verboden door Europese regelgeving.



aantrekken (UV en blauw licht) <sup>208,223</sup>. In Zweden wordt de achteruitgang van Noordse vleermuis (tussen 1988 en 2016; op onverlichte delen -59%, en op verlichte plekken -85%) gelinkt met de omzetting van kwikdamplampen naar natriumlampen en LED verlichting <sup>214</sup>.

Acht gevonden studies vergelijken het effect van verschillende lichtkleuren. **Effecten van lichtkleur hangen af van soort, en van het gedrag.** Bij **foerageren** blijkt uit een grootschalig veldexperiment in Nederland geen significant verschil in activiteit voor lichtschuwe soorten (*Myotis*- en *Plecotus*-soorten) en licht-opportunistische soorten (dwergvleermuizen (*Pipistrellus spec*), Laatvliegers en *Nyctalus* soorten) tussen rood licht en duisternis <sup>193</sup>. Bij wit en groen licht werden in deze studie hogere foerageer-activiteit vastgesteld van dwergvleermuizen. Het is echter niet zo dat rood licht geen enkel negatief effect heeft op vleermuizen: ook licht-opportunistische soorten wijzigen hun gedrag en vliegen dichterbij vegetatie nabij rood licht, en dat voor een afstand van ongeveer 9 m van de lichtbron <sup>217</sup>.



**Figuur 23: Myotis-soorten, zoals deze Franjestaart (*Myotis nattereri*) zijn zeer lichtschuw. Bij rood licht worden ze wel foeragerend waargenomen. Foto: René Janssen.**

Op **vliegroutes** is het patroon minder duidelijk. Een studie bij Watervleermuis (*Myotis daubentonii*), een erg lichtschuwe soort, vond geen verschil in voorkeur tussen duisternis, rood, wit of groen licht op een vliegroute in een tunnel onder een weg (LED, 5 lux) <sup>224</sup>. Bij een studie in Engeland werd een houtkant met vliegroute verlicht met verschillende LED lichten: rood (piek rond 625 nm), wit (brede piek tussen 450 en 650 nm), groen (piek rond 550 nm) en oranje (piek ca 600 nm). De onderzoekers namen waar dat Kleine hoefijzerneus ook rood licht vermeed, terwijl *Myotis* soorten oranje, wit en groen licht vermeden, maar in even grote aantallen langs vlogen in rood licht als bij duisternis <sup>194</sup>. Een andere studie, die niet in een wetenschappelijk

tijdschrift werd gepubliceerd, vond vergeleek het effect van amber, groen en wit licht op een vliegroute van Meervleermuis (*Myotis dasycneme*), een erg lichtschuwe soort <sup>225</sup>. Deze onderzoekers vonden dat Meervleermuizen op vliegroute groen en wit licht vermijden, maar even vaak langs vlogen bij amberkleurig licht (590 nm, 1700 K) als bij duisternis.

Bij **verblijfplaatsen** van Kleine dwergvleermuis werd onderzocht wat het effect van verschillende lichtkleuren is (wit, blauw en rood licht - halogeen lamp, met filters). Bij elk type verlichting vlogen niet alle dieren van de kolonie uit, maar het effect bij wit en blauw licht (ca 85% minder uitvliegende dieren) dan bij rood licht (ca 30% minder uitvliegende dieren) <sup>205</sup>.

Twee studies op dezelfde plek in Letland vonden dat vleermuizen aangetrokken zijn tot licht **tijdens migratie**. Bij een eerste studie werd een groene laser (piek 520 nm) afgewisseld met periodes van duisternis. Bij het groene licht werd 50% meer activiteit van de Ruige dwergvleermuis (*Pipistrellus nathusii*) vastgesteld <sup>226</sup>. Kleine dwergvleermuis (*Pipistrellus pygmaeus*) vertoonde dezelfde trend. Een tweede studie onderzocht in dezelfde opzet het effect van rood licht, warm wit licht en duisternis. Deze keer vonden de onderzoekers dat Kleine dwergvleermuizen actiever zijn bij rood licht (LED, 1.8 lux, piek 623 nm) dan bij warm wit licht (LED, 1.8 lux, piek 576 nm) of duisternis <sup>227</sup>. Ruige dwergvleermuizen vertoonden dezelfde trend. Beide studies vonden echter plaats op één locatie, en testten het effect van één enkele lichtbron. Er is dus meer onderzoek nodig om conclusies te kunnen trekken over effecten van lichtkleur op migratie.

Over het algemeen kan gesteld worden dat **rood licht, en mogelijk ook (smalbandig) amber licht, minder tot veel minder effecten heeft op vleermuizen, maar dat dit niet alle negatieve effecten kan mitigeren.**

#### **Afstand houden van kwetsbare biotopen**

Twee studies onderzochten tot welke afstand licht effect heeft op vleermuizen. In een veldexperiment in Frankrijk werden negatieve effecten waargenomen op *Myotis* soorten tot op 25m en voor Laativlieger tot op 50m voor een natriumlamp (16 lux direct onder de lamp) <sup>228</sup>. Bijzonder is ook dat *Myotis* soorten in deze studie de omgeving van lampen ook bleven vermijden als deze uitgezet werden. Mogelijk bleven ze op basis van vroegere ervaringen die locaties vermijden.

Een andere studie reconstrueerde de vluchtpaden van vleermuizen op basis van batdetectors, en vonden dat vleermuizen tussen de 15 m bij wit licht en 9 m bij rood licht een afwijkend pad beginnen nemen het licht vermijden, wat overeenkomt met een lichtsterkte van 1 lux <sup>217</sup>.

Ondanks het beperkt onderzoek kan gesteld worden dat **verlichting tot een afstand van 50m negatieve effecten heeft.**

#### **Verlichting dimmen**

Vanaf welke intensiteit verlichting effect heeft op vleermuizen is niet goed onderzocht. Effecten voor Kleine hoefijzerneus treden op vanaf 3,6 lux<sup>198</sup>. In een veldexperiment in Frankrijk konden negatieve effecten op *Myotis* soorten waargenomen worden vanaf de categorie 0.1 tot 1 lux (natriumlamp) <sup>228</sup>. Bij de soorten die opportunistisch foerageren rond licht (Gewone dwergvleermuis en Bosvleermuis (*Nyctalus leisleri*)) werd in deze studie een hoge foerageeractiviteit waargenomen tussen 1 en 5 lux, maar was bij lichtintensiteiten boven de 5 lux de activiteit 50% stuk lager. Op basis van vluchtpaden van vleermuizen blijkt dat vleermuizen licht



vermijden vanaf een lichtsterkte van 1 lux, en dit zowel bij rood als wit licht <sup>217</sup>. Ondanks het beperkt onderzoek kan de **1 lux** dus **als bovengrens beschouwd worden**.

### Een deel van de nacht verlichten

Drie studies onderzochten of verlichting tijdelijk doven negatieve effecten op vleermuisactiviteit kon voorkomen, en vonden gemengde resultaten. Azam en collega's vergelijken in een veldexperiment in Frankrijk vleermuisactiviteit bij natriumlampen (gemiddeld 32 lux) die uitgeschakeld werden tussen middernacht en 5u <sup>229</sup>. Gekeken over de hele nacht, was de activiteit van Grootoorvleermuizen drie keer hoger als de lampen uitgeschakeld werden om 0u dan bij volledig verlichte nachten, en was de activiteit even hoog als bij duisternis. Ook Myotis-soorten werden meer waargenomen, maar het resultaat was niet statistisch niet significant, mogelijk wegens het lage aantal waarnemingen van deze soortgroep.

In een latere studie van dezelfde onderzoekers werd gevonden dat Myotis soorten de omgeving van lampen ook bleven vermijden als deze uitgezet werden <sup>228</sup>. Mogelijk bleven ze op basis van ervaringen eerder op de avond die locaties ook vermijden eens het licht gedoofd werd.

Een studie in Engeland bekeek de activiteit bij Grote hoefijzerneus gedurende de nacht, en toont aan dat de soort vooral vroeg op de avond jaagt <sup>230</sup> (iets wat ook bij andere soorten waargenomen wordt <sup>231</sup>). Bij Grote hoefijzerneus werd berekend dat om 50% van de foerageerperiode in duisternis te kunnen laten doorgaan, verlichting al moet uitgeschakeld worden om 23u (over de onderzoeksperiode april tot juni).

Uit deze studies blijkt dus dat **een deel van de nacht verlichten waarschijnlijk wel kan helpen**, zeker naar **herstel van connectiviteit**, maar **onvoldoende is om het verlies aan foerageerhabitat** te mitigeren.

### Vegetatie rondom verlichting

Enkele studies suggereren dat vegetatie (bomen, struiken) de negatieve effecten van straatverlichting kunnen afschermen <sup>83,202,232</sup>. In een observationele studie in Berlijn werd gevonden dat licht-opportunistische Dwergvleermuizen vooral actiever waren rond licht als er veel bomen aanwezig zijn in de directe omgeving <sup>208</sup>. Barré en collega's tonen aan dat zowel lichtschuwe soorten als licht-opportunistische soorten dichter bij (tot zelfs in) de vegetatie vliegen nabij licht, en dus wel kunnen omgaan met verlichting als er voldoende dekking is <sup>217</sup>.

Een andere studie vond dan weer dat lichtschuwe vleermuizen bij verlichting (55 lux) langs de donkere zijde van een dichte houtkant vliegen (waar het dan maar 0.7 lux gemeten werd) <sup>194</sup>.

Uit deze studies blijkt dus dat **een dens vegetatiescherm mogelijk kan helpen, zeker om vliegroutes te herstellen**. Aangezien het inheemse bomen en struiken gebruikt worden, kan dit in de winter, najaar en zomer niet effectief zijn als de bladeren afgevallen zijn.



## 3.4 OVERIGE ZOOGDIEREN

### Kernpunten

- Weinig studies over zoogdieren (buiten vleermuizen)
- Vooral fysiologische effecten gevonden van nachtelijke verlichting
- Nachtelijke verlichting heeft een negatief effect
- Aanwijzingen dat lichtkleur uitmaakt: licht met rood of amber kleur heeft minder groot effect
- Weinig gekend over mitigatie-mogelijkheden
- Uitzetten van nachtelijke verlichting lijkt niet te leiden tot meer verkeersslachtoffers
- Uitzetten van nachtelijke verlichting lijkt niet te leiden tot meer schadegevallen

### 3.4.1 Inleiding

#### Overige zoogdieren

Naast vleermuizen zijn er nog 46 soorten landzoogdieren in België (<https://www.species.be>). Ook deze groep bevat meerdere beleidsrelevante soorten. Zo zijn er veel bedreigde zoogdiersoorten (ca. 50% van deze soorten werd opgenomen op de recentste rode lijst <sup>182</sup>). Andere soorten zijn dan weer maatschappelijk belangrijk als te bestrijden exoot (bv. Wasbeer (*Procyon lotor*), Muntjak (*Muntiacus reevesi*)) of wegens schade bij landbouw (bv. Everzwijn (*Sus scrofa*)). Wereldwijd zijn ongeveer 80% van de zoogdiersoorten 's nachts actief, waarvan respectievelijk 69% uitsluitend 's nachts en 2,5% uitsluitend tijdens de schemering actief <sup>233</sup>. Bovendien verleggen soorten die in onverstoorde gebieden zowel dag- als nachtactief zijn – zoals herten, vossen en everzwijnen – hun activiteit meer naar de nachtelijke uren in gebieden met veel menselijke activiteiten zoals recreatie of bewoning <sup>234</sup>.

#### Hoe nemen zoogdieren licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting te verstaan, is het belangrijk te begrijpen hoe zoogdieren licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar vakliteratuur <sup>235,236</sup>.

De ogen van zoogdieren bevatten twee types lichtgevoelige cellen: de staafjes en de kegeltjes. Staafjes zijn zeer lichtgevoelig en laten het oog toe te zien bij lage lichtintensiteit, maar geven geen scherp afgeleend beeld. Kegeltjes geven een scherper beeld, maar zijn minder efficiënt bij lage lichtintensiteiten.

Kegeltjes zijn lichtgevoelig voor een bepaald deel van het lichtspectrum. De meeste soorten zoogdieren beschikken over twee types. De S-Kegeltjes zijn gevoelig voor korte golflengtes, en de M/L kegeltjes zijn gevoelig voor middellange of lange golflengtes. Door de aanwezigheid van verschillende types kegeltjes kunnen zoogdieren kleuren onderscheiden. De S-kegeltjes zijn bij sommige zoogdieren gevoelig voor UV, maar bij de meeste zoogdieren voor blauw of violet licht. De M/L kegeltjes zijn gevoelig voor groen licht (M) of geel-rood licht (L).



De meeste zoogdieren hebben een dichromatisch zicht, en kunnen, in vergelijking met bv. vogels, reptielen of insecten, een kleiner deel van het spectrum waarnemen (ongeveer van 370 tot 600 nm<sup>189</sup>).

Zoogdieren die 's nachts actief zijn hebben verschillende aanpassingen om licht al waar te nemen bij zeer lage intensiteiten. Zo hebben ze meestal grotere ogen met wijde pupillen om meer licht binnen te laten. Hun ogen hebben meer staafjes, die al gevoelig zijn voor lage lichtintensiteit. De meeste soorten hebben ook een lichtreflecterende laag van cellen direct achter of soms in het netvlies, het zogenaamde tapetum lucidum. Door de reflectie van deze laag wordt de hoeveelheid licht die op het netvlies valt groter waardoor een lichtsterker beeld ontstaat. Het veroorzaakt opvallend oplichtende ogen als deze in het donker worden beschenen. Door deze structurele aanpassingen aan zicht in de duisternis kunnen nachttactieve zoogdiersoorten tijdelijk verblind worden bij plotse felle verlichting<sup>237</sup>.



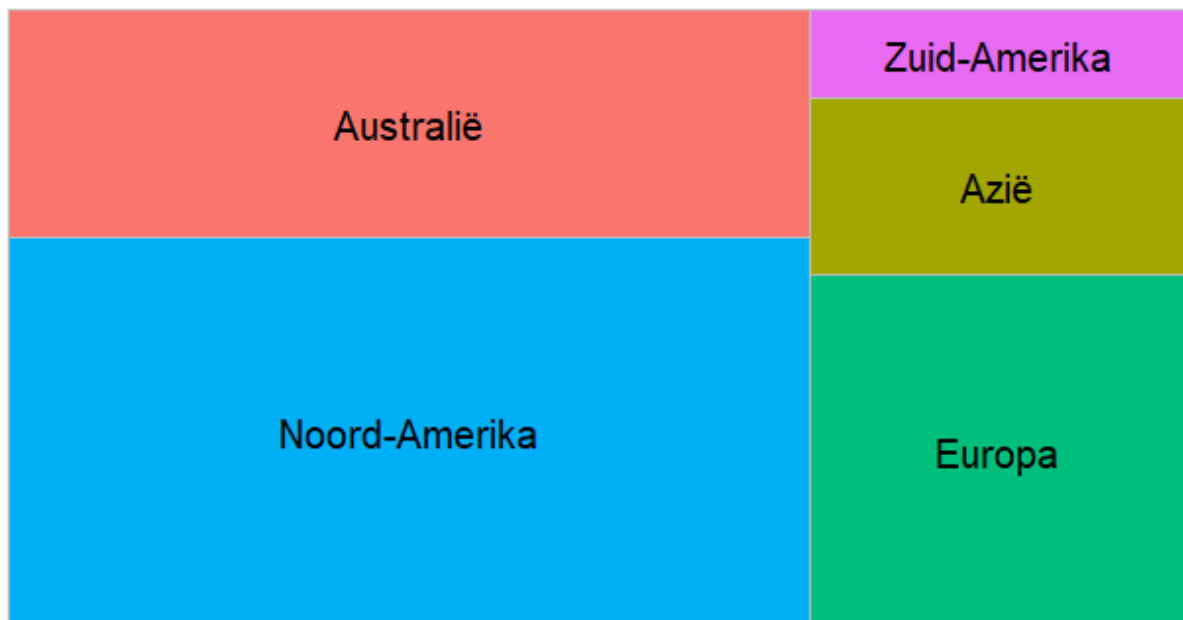
**Figuur 24:** Sommige nachttactieve zoogdieren, zoals deze Vos (*Vulpes vulpes*) hebben een lichtreflecterende cellaag direct achter of soms in het netvlies, het zogenaamde tapetum lucidum. Door de reflectie van deze laag wordt de hoeveelheid licht die op het netvlies valt groter waardoor een lichtsterker beeld ontstaat 's nachts. Foto: Giuseppe ME. (Creative Common licentie).

### 3.4.2 Literatuur onderzoek

De literatuurstudie leverde 65 studies op, waarvan 33 gevonden werden via systematische zoektocht met kernwoorden en de overige studies via referenties, grijze literatuur en andere. Er was een sterke bias in de beschikbare literatuur. De meeste van deze studies bestonden uit lab experimenten en veldexperimenten (figuur 25a). In de geraadpleegde literatuur was een duidelijke geografische bias naar studies uit Noord-Amerika, en in mindere mate Australië (figuur 25b). Ook taxonomisch was er een grote bias, waarbij de knaagdieren de meest onderzochte groep waren (25c). Slechts een minderheid van deze keek naar effecten in veldomstandigheden. Er werden veel experimentele studies gevonden, waarbij in lab-omstandigheden effecten van nachtelijke verlichting op fysiologie bij knaagdieren (voornamelijk modelsoorten als muizen en hamsters) onderzocht werden. Dergelijke resultaten zijn niet erg relevant zijn voor veldomstandigheden (zie verder). Daarom werden enkel de studies die gevonden werden via kernwoorden in Web of Science opgenomen in deze literatuurstudie, maar werden in tegenstelling tot bij meer ecologische studies, bijkomende studies uit de referentielijsten niet meegenomen.

Over het algemeen zijn weinig studies beschikbaar voor terrestrische zoogdieren, en meer specifiek zijn er zeer weinig hoogkwalitatieve veldexperimenten. Veel potentiële lichteffecten zijn dus weinig onderzocht. Dit is bijzonder opmerkelijk aangezien modelmatige studies gebaseerd op de bouw van het oog suggereren dat nacht-actieve zoogdieren erg gevoelig zijn voor verlichting<sup>189</sup>. Bovendien werd in een enquête bij 280 wetenschappers ingeschat dat nachtelijk kunstlicht een belangrijke bedreiging vormt voor deze soortgroep<sup>238</sup>.

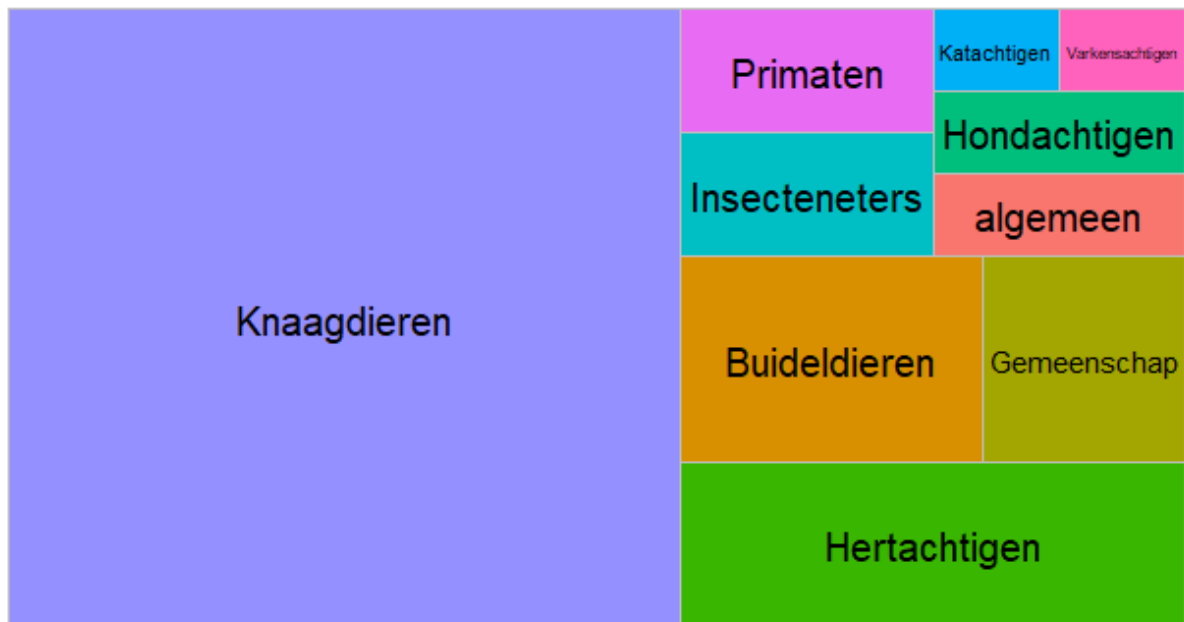
#### a) Aantal studies per werelddeel



b) type van de studie



c) Aantal studies per order



Figuur 25: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie en (c) onderzochte orde

### 3.4.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele zoogdieren

#### Effecten op beweging en activiteit

Het effect van nachtelijk licht op beweging werd voornamelijk onderzocht op knaagdieren. Vele studies tonen aan dat **knaagdieren verlichting vermijden**, zowel in het lab <sup>239-244</sup> als in veldomstandigheden <sup>245-249</sup>. Knaagdieren vermijden vermoedelijk licht om de predatiekans door roofdieren en nachtroofvogels te verminderen. Effecten werden gevonden vanaf relatief lage intensiteit (bv. vanaf 1,5 lux <sup>243</sup>) en op afstanden tot 10 m van de lichtbundel <sup>245</sup>. Over het type verlichting of het spectrum is in deze studies meestal geen duidelijkheid. Sommige studies suggereren dat aanpassing aan verlichting mogelijk kan optreden. Zo werd bij Noord-Amerikaanse Witvoetmuizen (*Peromyscus leucopus*) gevonden dat dieren uit gebieden met veel nachtelijke verlichting meer tolerant waren voor kunstlicht (witte LED, geen verdere specificaties) in een keuze-experiment in vergelijking met dieren van onverlichte gebieden <sup>244</sup>. Ook in Europa werden gelijkaardige patronen gevonden bij Brandmuizen (*Apodemus agrarius*), een soort nauwverwant met de Bosmuis (*Apodemus sylvaticus*), waarbij dieren in stedelijk gebied met veel kunstlicht ook actief waren bij daglicht, in tegenstelling tot dieren vanop het platteland <sup>250</sup>.

Naast studies op knaagdieren zijn er ook een aantal studies op andere soorten. Een uitgebreide studie in Nederland onderzocht het effect van straatverlichting op passages van diverse zoogdieren <sup>251</sup>. In een landschap met veel brede grachten werd een aantal van de beperkte oversteekplekken afgewisseld verlicht en onverlicht met een 12 m hoge paal met een natriumlamp (HPS) (met een piek tussen de 550 en 650 nm). Via sporen werd onderzocht wat het effect was van verlichting. Van roofdieren als Vos (*Vulpes vulpes*), Bunzing (*Mustela putorius*) en Hermelijn (*Mustela erminea*) werden significant meer sporen gevonden bij oversteekplekken als verlichting aanstond in vergelijking met duistere condities. Mogelijk zorgt verlichting voor extra jachtmogelijkheden bij deze soorten. Bij Wezel (*Mustela nivalis*), Egel (*Erinaceus europaeus*), Haas (*Lepus europaeus*) en Ree (*Capreolus capreolus*) werden dan weer geen significant verschil gevonden. Gezien de opzet van dit veldexperiment met beperkte oversteekplaatsen (die dus moeilijk te vermijden zijn), kan dit een onderschatting geven van potentieel negatieve effecten.

Andere studies vinden wel negatieve effecten. Zo werd bij een recente studie in Berlijn vastgesteld dat gezenderde Egels zich vooral langs duistere routes verplaatsen, en enkel verlichte plekken oversteken als ze geen andere keuze hebben <sup>252</sup>. Een andere onderzoek vond dat Egels geen verlichting (LED, geen verdere specificaties) vermijden bij het bezoek aan voederplekken <sup>253</sup>, wat aantoont dat egels net als vele dieren een afweging: als eten dat ze erg graag lusten aanwezig is, komen ze wel in het licht, en zijn ze dus vermoedelijk kwetsbaarder voor predatie. Ook bij hertachtigen werd in meerdere studies een negatief effect gevonden van verlichting. Zo vermijden Amerikaanse Muilddierherten (*Odocoileus hemionus*) onderdoorgangen onder snelwegen als de omgeving verlicht is <sup>254</sup> en komt Ree in stedelijk gebied in Polen minder voor waar er veel nachtelijke verlichting is (geen specificaties over type verlichting) <sup>255</sup>.

#### Fysiologische effecten van licht

Via de zoektocht met kernwoorden werden 18 studies gevonden die het effect van nachtelijke verlichting op fysiologische processen onderzochten (zie ook review <sup>256,257</sup>). Het ging bijna



uitsluitend om experimentele studies in labo-omstandigheden op knaagdieren als muizen en hamster (en in mindere mate op primaten <sup>258,259</sup>). Eén enkele studie op de timing van reproductie en hormonenbalans bij een wallaby vond wel bij wildlevende dieren plaats <sup>260</sup>.

Uit de gevonden studies blijkt dat nachtelijke verlichting grote effecten kan hebben, waaronder verstoringen in hormonenhuishouding (o.a. productie van melatonine), verminderd cellulair herstel en verminderde immuniteit, gewichtstoename, chronische stress en verstoorde (timing van) reproductie <sup>258,261-263</sup>. Dergelijke effecten werden al waargenomen vanaf lage lichtintensiteiten (witte Leds, 5 lux) <sup>262,264</sup>. Licht 's nachts leidde ook tot vermindering in geheugen en verminderd leervermogen <sup>265</sup>. Ook het gedrag van de proefdieren wijzigde, met meer gedrag dat lijkt op depressie <sup>266</sup>. Enkele studies vonden dat licht met meer blauwe golflengtes (LED met piek rond 480 nm, 5 lx) een groter effect heeft op fysiologie dan licht met meer rode golflengtes (LED met piek rond 600 nm, 5lx) <sup>267</sup>. In dergelijke experimenten konden de proefdieren veelal geen beschutting opzoeken, en zo'n situaties zijn dus niet makkelijk te vertalen naar omstandigheden in het wild. De gevonden effecten zijn echter zo uitgesproken, dat het waarschijnlijk is dat ook in veldomstandigheden nachtelijk kunstlicht fysiologische processen bij wilde zoogdieren negatief kan beïnvloeden.



**Figuur 26: Egels (*Erinaceus europaeus*) vermijden nachtelijk kunstlicht als ze zich bewegen doorheen het landschap, maar durven wel in de buurt van licht te komen als er voedsel aanwezig is. Foto: Mireille Henry (Creative Common licentie).**

### 3.4.4 Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten

Het is aangetoond dat nachtelijke verlichting een negatief effect kan hebben op individuele zoogdieren. Negatieve effecten op populaties, gemeenschappen en soort-interacties zijn niet beschreven in de literatuur. Maar aangezien effecten op individuen erg groot kunnen zijn lijkt het waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook effecten heeft op deze niveau's (bv. toegenomen predatie)

### 3.4.5 Effecten op Europees beschermde soorten

Doordat de meeste onderzoeken focussen op effecten op gemeenschapsniveau of effecten op modelsoorten is in de literatuur weinig informatie te vinden over soort-specifieke effecten van nachtelijke verlichting op Europees of Vlaams beschermde soorten. In Vlaanderen komen zes soorten voor die opgenomen zijn op de bijlagen van de Europese habitatrichtlijn, namelijk Wolf, Otter, Wilde kat, Hamster, Hazelmuis en Europese bever.

Op de bijlage II zijn soorten als Wolf, Otter en Wilde kat opgenomen. Enkel voor **Wolf** (*Canis lupus*) zijn studies gekend. Een onderzoek in de VS (Wisconsin) vond dat voedsel waarbij een sensor licht liet aangaan en geluid liet afspelen als wolven dicht kwamen, minder gegeten werd (14% van het voedsel opgegeten) in vergelijking met voedsel waar geen licht en geluid afgespeeld werd (84% van het voedsel opgegeten)<sup>268</sup>. Het is in deze studie niet duidelijk om welk type licht afging, en aangezien het licht plots aanging en gecombineerd werd met luid geluid, zijn deze resultaten weinig relevant voor het effect van nachtelijke kunstlicht. Wolven kunnen zich sterk aanpassen aan menselijke omgeving, en het is gekend dat individuen 's nachts verlichte wegen oversteken of verlichte gebieden kunnen doorkruisen<sup>269</sup>.

Voor **Otter** (*Lutra lutra*) en **Wilde kat** (*Felis silvestris*) zijn geen studies beschikbaar. Beide zijn echter nacht actieve soorten met sterk aangepast nachtzicht, die sterk gebonden zijn aan natuurlijke of half-natuurlijke biotopen. Het is dus aangewezen om het voorzorgsprincipe te hanteren en nachtelijk kunstlicht te vermijden in gebieden waar deze soorten voorkomen.

Naast bovenstaande soorten zijn er nog drie soorten die opgenomen zijn op de bijlage IV van de habitatrichtlijn, namelijk Europese hamster, Hazelmuis en Europese bever. Het effect van straatverlichting op de **Europese hamster** (*Cricetus cricetus*) werd onderzocht in gevangenschap<sup>240</sup>. In dit onderzoek kregen Europese hamsters keuze tussen verlichting of duisternis. Het onderzoek toont aan dat de dieren verlichting die straatverlichting nabootst (LED, 4 of 40 lux, amber) vermijden. Maar, zoals bij andere knaagdieren, maken Europese hamsters een afweging: als eten dat ze erg graag lusten aanwezig is (bv. insecten), komen ze wel in het licht, en zijn ze dus vermoedelijk kwetsbaarder voor predatie. De onderzoekers raden aan om verlichting te vermijden waar de Europese hamster aanwezig is om predatierisico te vermijden.

Voor **Hazelmuis** (*Muscardinus avellanarius*) is nog geen onderzoek gevonden over het effect van kunstverlichting. Uit eigen anekdotische waarnemingen lijkt de soort niet te reageren op rood licht (zaklamp Fenix TK25, rode LED, 100 lumen). Ook komt de soort voor in houtkanten langs verlichte wegen. In het Brusselse werd waargenomen dat Eikelmuis (*Eliomys quercinus*), een nauwverwante soort, soms actief is in bomen vlakbij straatlantaarns. Mogelijk is dit toeval, maar het zou ook kunnen dat deze soort die in vergelijking met Hazelmuis meer insecten eet, net



aangetrokken worden tot verlichting omdat ook insecten erop afkomen en er dus een hoge dichtheid aan prooien aanwezig is (Verbeylen et al. In prep). Foerageren in de buurt van licht maakt deze soorten in elk geval zichtbaar en daardoor mogelijk ook meer kwetsbaar voor predatie, bv. door uilen. In het buitenland werd bv. vastgesteld dat eikelmuis maanlicht vermijdt, vermoedelijk om predatie te vermijden<sup>270</sup>. Verlichting vermijden in de buurt van plaatsen waar Hazelmuis (of de verwante Eikelmuis) voorkomt lijkt dus aangewezen.

Onderzoek naar effecten van kunstlicht op de **Europese bever** (*Castor fiber*), of de nauwverwante Canadese bever, is eveneens niet beschikbaar. De Europese bever kan zowel overdag als 's nachts actief zijn. 's Nachts is de soort actiever als er meer maanlicht is<sup>271</sup>. De onderzoekers stellen dat nachtelijke activiteit vooral komt door het vermijden van vroegere menselijke vervolging, en niet door specifieke voorkeur voor duisternis. Samen met het feit dat de soort ook overdag actief is, en dat er anekdotische waarnemingen op verlichte plekken zijn, kan dit dus mogelijk erop wijzen dat de Europese bever minder gevoelig voor nachtelijke verlichting is, al blijft meer onderzoek nodig.

### 3.4.6 Andere effecten van nachtelijk licht

#### Verkeersslachtoffers en verkeersveiligheid

Aangezien nachtactieve zoogdieren vaak verlichting lijken te vermijden (bv. Egel:<sup>252</sup>; Ree:<sup>255</sup>) kan verwacht worden dat er minder verkeersslachtoffers zouden vallen op verlichte wegen, maar hier is geen bewijs voor. We vonden slechts twee studies die het effect van verlichting op aanvaringen met verkeer en verkeersslachtoffers bekeken. Een studie in de VS bij het Muilidierhert (*Odocoileus hemionus*) vond geen effect van nachtelijke verlichting op het aantal aanvaringen<sup>272</sup>. Het plaatsen van straatverlichting (kwikdamplamp, geen informatie over spectrum of intensiteit) leidde niet tot een vermindering van het aantal aanvaringen of van het aantal herten dat de weg overstak. Ook de locatie waar de herten overstaken veranderde niet. Een studie in Alaska op Eland (*Alces alces*) vond wel een sterke vermindering van het aantal verkeersslachtoffers<sup>273</sup>. Maar het aanbrengen van straatverlichting werd hier gecombineerd met het aanbrengen van hekwerk langs de weg, wat vermoedelijk de hoofdoorzaak was van het gevonden patroon.

Studies over Europese soorten zijn nodig om het effect van (het ontbreken van) straatverlichting op verkeersslachtoffers – en het bijhorende effect op verkeersveiligheid – in Vlaamse context in te kunnen schatten.



**Figuur 27: Verkeersslachtoffer van Ree (*Capreolus capreolus*). Studies uit Noord-Amerika tonen aan dat het uitschakelen van nachtelijke verlichting niet leidt tot meer verkeersslachtoffers bij hertachtigen. Studies uit Europa ontbreken echter. Foto: Griet Van den Bosch (Creative Common Licentie).**

### **Verlichting om schade door nachttactieve zoogdieren te vermijden**

Verlichting wordt soms gebruikt om ongewenste zoogdieren te verjagen en zo landbouwschade te vermijden (bv. voor verjaging van herten of als poging om vee te beschermen tegen roofdieren). Aangezien de meeste studies fel licht combineren met veel geluid, en het licht meestal geactiveerd wordt door beweging, zijn de resultaten van dergelijke studies niet makkelijk te interpreteren. Twee studies uit Noord-Amerika, op Wapiti (*Cervus canadensis*), Muilddierhert en Witstaarthert (*Odocoileus virginianus*) vonden alvast dat rode Leds (geen extra informatie) of wit stroboscoop-licht (beide gecombineerd met geluid) herten niet (voldoende) afschrikt om gewassen te beschermen en schade te voorkomen<sup>274,275</sup>. Ook bij Everzwijn werd geen significant effect van nachtelijke verlichting (witte Leds, geen verdere info) gevonden<sup>276</sup> (bij een geïntroduceerde populatie in Australië, al was de sample size in deze studie laag).

Bij roofdieren zijn de resultaten gemengd. Twee studies vonden dat verlichting (stroboscoop licht) in combinatie met geluid zorgde voor minder landbouwschade aan vee (schapen) door Coyotes (*Canis latrans*)<sup>268,277</sup>. Bij een studie op wild-levende Wolven, werd waargenomen dat deze minder aten van een hertenkarkas als er licht aansprong (gemiddeld 14% opgegeten bij stroboscoop licht vs. 84% bij duisternis), maar hier trad snel gewenning op. Een wolven-proof hek is veel belangrijker dan verlichting om predatie op vee te vermijden<sup>269</sup>.





Het aan- of uitzetten van nachtelijke verlichting lijkt dus geen belangrijk effect te hebben op schade aan landbouwgewassen of vee veroorzaakt door nachttactieve zoogdieren.

### 3.4.7 Kennis rond mitigatie

Hoewel enkele studies effecten van nachtelijke verlichting op zoogdieren beschrijven, is de kennis rond mitigatie-mogelijkheden van zulke effecten uiterst beperkt. Zo vonden we in de wetenschappelijke literatuur geen onderzoeken die effecten van de positie van verlichting, afstand van kwetsbare biotopen of het dimmen van verlichting onderzochten. Wel vonden we beperkt onderzoek rond types verlichting en kleurspectra.

#### Type verlichting en kleurspectra

Zoogdieren nemen licht waar over een minder groot spectrum dan vogels of insecten (ongeveer van 350 tot 600 nm <sup>189</sup>). Er kan dus verwacht worden dat niet alle types verlichting hetzelfde effect hebben, maar we vonden slechts twee studies die verschillende types verlichting met elkaar vergeleken. Bij het vervangen van HPS straatverlichting (HPS, 6,0 lux) door LED lampen (LED, 4000 K, 3.7 lux) in Nieuw-Zeeland werd geen effect waargenomen op de activiteit van Zwarte rat, Huismuis of Egel <sup>167</sup>. Bij een vergelijking tussen natriumlampen en 'bug lights' werd bij beide types een vermindering van de activiteit van een soort stekelmuis (*Peromyscus polionotus*) op stranden in de VS <sup>245</sup>. De lichten werden laag bij de grond geplaatst. Bij 'bug lights' werd ongeveer 20% minder activiteit waargenomen en waren effecten waarneembaar tot 2 meter afstand, terwijl bij natriumlampen 40% minder activiteit was, en effecten tot 4 meter waarneembaar waren. Over het verschil tussen beide lichttypes wordt weinig info gegeven door de auteurs, buiten dat natriumlampen vooral geel licht geven en 'bug lights' licht geven over een groter spectrum.

Drie gevonden studies vergeleken, zij het beperkt, het effect van verschillende kleuren. In het Nederlandse 'licht op natuur'-project waarbij verschillende kleuren verlichting getest worden, vonden Spoelstra en collega's een lagere activiteit van bosmuizen bij zowel wit, groen en rood LED licht (LED, ongeveer 8 lux) <sup>278</sup>. Bij rood licht waren er indicaties dat er gewenning optrad.

Twee andere studies bekeken de fysiologische effecten van verschillende lichtspectra. In een lab-experiment op Siberische hamsters (*Phodopus sungorus*) werden de effecten van nachtelijke blootstelling aan rood (LED met piek rond 600 nm, 5lx), wit (breed spectrum van 400 tot 700 nm, 5 lx) en blauw licht (LED met piek rond 480 nm, 5 lx) vergeleken met duisternis. Wit en vooral blauw licht zorgden hier voor gewijzigde fysiologische processen en voor gedrag dat op depressie lijkt, terwijl rood licht niet dergelijke effecten had <sup>267</sup>. Wallabies (*Macropus eugeni*) die 's nachts aan witte LED verlichting (piek rond 448 nm, 5000 K, geen verdere specificaties) blootgesteld werden hadden tot 50% minder melatonine productie in vergelijking met amber LED (piek rond 605 nm, 1700 K, geen verdere specificaties) of duisternis <sup>279</sup>.



## 3.5 AMFIBIEËN EN REPTIELEN

### Kernpunten

- Weinig studies over amfibieën en zéér weinig over reptielen (buiten zeeschildpadden)
- Effecten op fysiologie, beweging en gedrag
- Effecten lijken af te hangen van lichtkleur, met minder effect bij rood licht
- Weinig gekend over mitigatie-mogelijkheden

### 3.5.1 Inleiding

#### Amfibieën en reptielen

Hoewel amfibieën en reptielen niet nauwverwant zijn, worden deze groepen traditioneel samen onderzocht, en bespreken we ze ook samen in deze literatuurstudie. Er leven 16 soorten amfibieën en 6 soorten reptielen in België (<https://www.species.be>). Daarbij komen nog diverse invasieve exoten, zoals Afrikaanse klauwkikkers (*Xenopus laevis*) en Lettersierschildpad (*Trachemys scripta*). De groep bevat veel bedreigde soorten (ca. 57% van de soorten werd opgenomen in de recentste rode lijst)<sup>280</sup>, en 6 soorten opgenomen op Europese richtlijnen.

#### Hoe nemen amfibieën en reptielen licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting te verstaan, is het belangrijk te begrijpen hoe amfibieën en reptielen licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar vakliteratuur<sup>281–283</sup>.

De ogen van amfibieën zijn goed ontwikkeld bij de meeste soorten, maar kunnen in de loop van de evolutie secundair verdwenen zijn (bv. bij grot-bewonende of ondergronds levende soorten). Amfibieën kunnen vooral goed beweging waarnemen, maar hebben moeite om statische beelden te verwerken. Amfibieën hebben verschillende soorten fotoreceptoren, namelijk staafjes met een piekgevoeligheid voor groen en blauw licht, en enkelvoudige en dubbele kegeltjes met beide een piekgevoeligheid in geel licht. Soorten die in water leven, en larvale stadia hebben vaak een extra type staafjes, dat gevoelig is voor UV-licht (in water dringt UV-licht dieper door). De meeste amfibieën hebben dus een tetrachromatisch beeld (dus samengesteld uit 4 kleuren), maar er zijn ook dichromatische en trichromatische soorten.

De ogen van reptielen lijken sterk op die van vogels. Ook bij deze groep hebben de meeste soorten tetrachromatisch zicht. Ze hebben types kegeltjes voor lange (rood), medium (groen), korte (blauw) en ultraviolette golflengtes (300-400 nm). Veel soorten kunnen dus ook UV-licht waarnemen. In de fotoreceptoren hebben reptielen oliedruppeltjes die carotenoïde pigmenten bevatten en die werken als filters om te helpen potentiële schade door UV licht te vermijden.

Naast ogen hebben bepaalde soorten reptielen en amfibieën ook andere organen om licht op te vangen. Veel amfibieën kunnen het verschil tussen duisternis en licht waarnemen door hun huid. Bepaalde hagedissen, kikkers en salamanders hebben bovendien ook een “derde oog”, een lichtgevoelige plek op de bovenkant van hun kop die toelaat om het verschil tussen duisternis en licht waar te nemen.



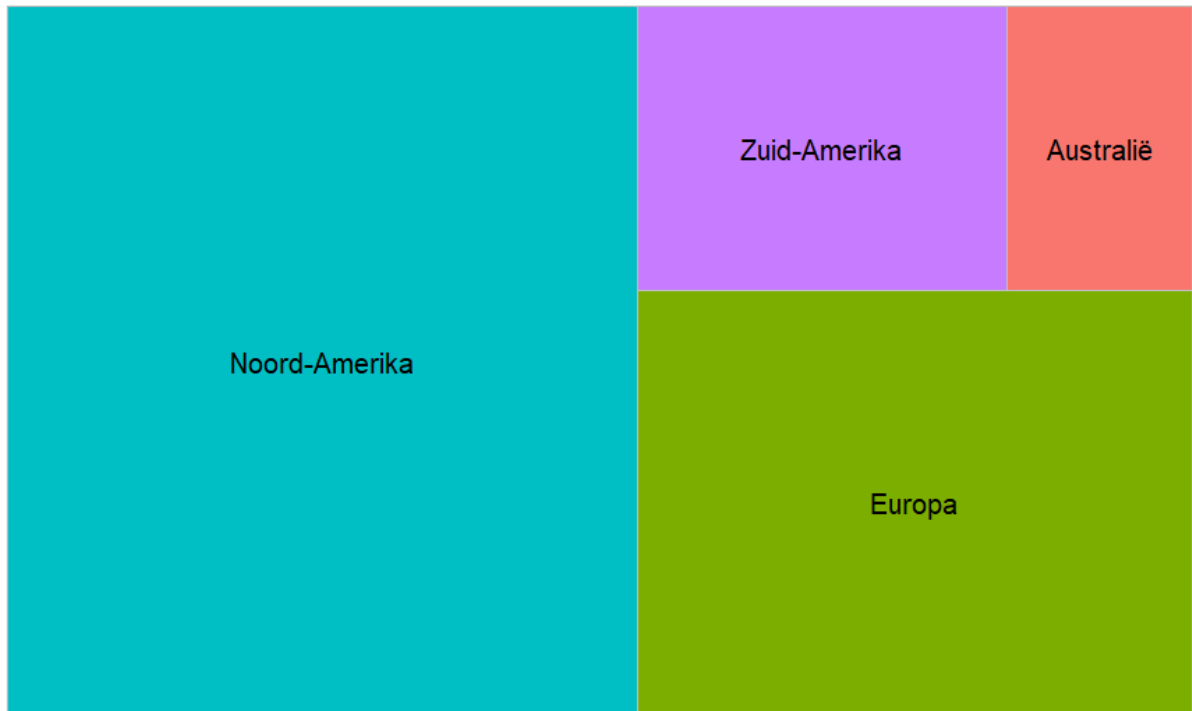
Veel soorten amfibieën en enkele soorten reptielen zijn nachtactief en hebben dan ook ogen die aangepast zijn aan zien in duistere omstandigheden. Net als bij andere diergroepen zijn de voornaamste aanpassingen de grootte van de ogen, zodat die meer licht opvangen, en een groter aandeel staafjes in vergelijking met kegeltjes.

### 3.5.2 Literatuur onderzoek

De literatuurstudie leverde slechts 36 studies op (31 voor amfibieën en 5 voor reptielen), waarvan 18 werden gevonden via systematische zoektocht met kernwoorden en de overige studies via referenties, grijze literatuur en andere. Het is belangrijk hierbij te vermelden dat we in deze selectie een aantal categorieën niet meenamen. Ten eerste werden studies specifiek over zeeschildpadden beperkt tot een review<sup>284</sup>, aangezien deze soortengroep niet voorkomt bij ons en de individuele studies minder relevant zijn. Ten tweede werden studies die zeer anekdotisch waren niet meenamen tenzij het om Europese soorten ging (er zijn veel, vooral oudere, meldingen van observaties van bv. gecko's of kikkersoorten bij licht, maar zonder vergelijking met duisternis, en zonder extra info over het type verlichting zijn dergelijke observaties van beperkte waarde). Dergelijke waarnemingen worden wel besproken in een review artikel<sup>285</sup>, dat wel meegenomen werd in de literatuurstudie.

Over het algemeen zijn weinig studies beschikbaar voor amfibieën en zeer weinig voor reptielen. Er zijn een aantal labexperimenten, maar er zijn zeer weinig hoogkwalitatieve veldexperimenten. Veel potentiële lichteffecten zijn dus weinig onderzocht.

a) Aantal studies per werelddeel



b) type van de studie



c) Aantal studies per order



Figuur 28: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie en (c) onderzochte orde

### 3.5.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele amfibieën en reptielen

#### Effecten op beweging, gedrag en activiteit

Effecten van licht op activiteit en gedrag van amfibieën zijn gemengd. In labstudies wordt gevonden dat veel soorten kikkers en padden aangetrokken worden tot licht. In een studie in Noord-Amerika werd gevonden dat 87% van de onderzochte soorten naar licht toekwamen<sup>286</sup>. Verschillende studies vermoeden echter ook dat amfibieën niet aangetrokken zijn tot licht zelf, maar eerder tot de mogelijkheid om daar insecten te eten<sup>285,287</sup>. Dit wordt ook ondersteund door een studie bij de Reuzenpad (*Rhinella marina*) in Australië waar de soort invasief is. Daar werd waargenomen dat bij nachtelijke verlichting (fluorescentielamp, ca. 8 lux), de dieren 2 gram meer insecten aten (vooral vliegende insecten) dan bij duisternis<sup>288</sup>. Bij andere groepen amfibieën vinden we minder informatie, maar in een nederlandse studie<sup>289</sup> wordt een studie geciteerd (Griffiths, 1984; niet online te vinden), waaruit blijkt dat in labo-omstandigheden Kleine watersalamander (*Lissotriton vulgaris*) aangetrokken is tot licht, terwijl Kamsalamander (*Triturus cristatus*) en Vuursalamander (*Salamandra salamandra*) geen aantrekking tot licht vertoont (geen info over het type licht).

Bij plots licht word echter waargenomen dat de meeste soorten net immobiel worden. In een veldexperiment in Noord-Amerika namen onderzoekers waar dat het grootste deel van de onderzochte individuen stoppen met beweging als een felle zaklamp dichterbij kwam (in een opstelling waarbij de zaklamp de lichten van een auto simuleren; 39 lux, geen verdere info over type licht)<sup>290</sup>. Wel werden soort specifieke verschillen waargenomen: van ca. 90% immobiliteit bij Molsalamanders (*Ambystoma spec.*) en Rana kikkers (*Rana spec.*) tot 70% bij Amerikaanse padden (*Anaxyrus americanus*) en Kruisboomkikkers (*Pseudacris crucifer*).

Activiteit in de buurt van licht kan ook afhangen van de periode van het jaar of de leeftijd van de individuen. Een observationele veldstudie in de zomer in Engeland vond dat het aantal juveniele exemplaren van Gewone pad (*Bufo bufo*) veel hoger was onder straatverlichting (geen verdere info over type verlichting) dan in donkere stukken<sup>291</sup>. Vergelijkbare observaties werden ook gedaan bij andere soorten zoals Kamsalamander (ook hier geen verdere info)<sup>289</sup>. Beide auteurs namen foeragerende dieren waar, en vermoeden daarom dat de dieren vooral aangetrokken zijn tot insecten die zich concentreren onder of bij verlichting. Twee andere studies op adulte dieren vinden tegengestelde resultaten. Een studie in labomstandigheden dat adulte gewone padden 57 tot 74% minder actief waren onder nachtelijk kunstlicht (LED, piek rond 590 nm, 5 en 20 lux)<sup>292</sup>. Een veldexperiment toonde aan dat Gewone padden erg lichtschuw zijn tijdens de voorjaarsmigratie<sup>293</sup>. Deze auteurs voerden een uitgebreid experiment uit, en vonden dat het aantal migrerende padden bijna 2 keer zo hoog was bij duisternis als bij wit licht (LED, ca 52 lux, breed spectrum) en groen licht (LED, ca 52 lx dubbele piek rond 470 en 530 nm). Rood licht (LED, ca 52 lux direct onder lamp, piek ca 620 nm) verschilde niet significant van duisternis.

Bij reptielen worden slechts twee relevante studies gevonden. Bij een studie in Spanje op de Muurgekko (*Tarentola mauritanica*) werd waargenomen dat nachtelijk kunstlicht (gloeilampen, geen verdere specificaties) toelaat dat individuen ook meer foerageren op nachten met weinig maanlicht<sup>294</sup>. Een studie uit Servië vermeldt de observaties van Muurhagedis (*Podarcis muralis*) die op een warme nacht (26°C) 's nachts actief waren rondom monumentenverlichting (geen specificaties over type verlichting)<sup>295</sup>.



### Fysiologische effecten van licht

We vonden elf studies die het effect van nachtelijke verlichting op fysiologische processen onderzochten. Het ging bijna uitsluitend om experimentele studies in labo-omstandigheden. De meeste studies rapporteren negatieve effecten van nachtelijk kunstlicht, maar die effecten lijken afhankelijk van het ontwikkelingsstadium en van de soort.

Nachtelijk kunstlicht heeft ook effect op grootte en massa van amfibieën, maar deze effecten zijn niet eenduidig. Zo waren larvale Boskikkers (*Lithobates sylvatica*) ontwikkeld onder nachtelijk kunstlicht in één studie ca. 20% kleiner en lichter (LED, 7000K, 8-14 lux)<sup>296</sup>, maar in een andere studie ca. 15% zwaarder (LED, 300 lux)<sup>297</sup>. Adulte Groene watersalamander gehouden onder nachtelijk kunstlicht (LED, 7000K, 8-14 lux) werden significant groter dan exemplaren gehouden onder duisternis, maar dit effect was enkel waarneembaar vroeg in het voorjaar, en niet later op het seizoen<sup>296</sup>. Bij adulte Gewone pad werd geen effect waargenomen van nachtelijk kunstlicht (LED met piek rond 590 nm, 5 of 20 lux) op het gewicht, maar wel op energie allocatie (de dieren gebruikten 28% (5 lux) en 58% (20 lux) meer energie tijdens rust)<sup>292,298</sup>. Bij Reuzenpadden (*Rhinella marina*) zorgde nachtelijk kunstlicht (LED, 2800-3000K, 0.04 lux en 5 lux) dan weer voor een 10% lagere gewichtstoename in vergelijking met duisternis<sup>299</sup>.

Nachtelijk kunstlicht kan ook effecten hebben op pigmentatie: larven van de Kruisboomkikker (*Pseudacris crucifer*) die opgroeiden onder nachtelijk kunstlicht (LED, 7000K, 8-14 lux) waren donkerder dan exemplaren uit de controle groep in duister, maar bij andere soorten (Boskikker en Amerikaanse pad) werd geen significant effect gevonden<sup>296</sup>.

Zes studies onderzochten hormonale effecten, waarvan drie een significant verband met nachtelijk kunstlicht vonden. Bij adulte Gewone padden werden geen effect van nachtelijk kunstlicht op testosteron gevonden (LED, 6500 K, 5 lux)<sup>298</sup>, en geen effect van fel nachtelijk kunstlicht (LED, 300 lux, geen verdere specificaties) op corticosterone (stress hormoon)<sup>297</sup>. Andere onderzoekers bemerkten geen effect op corticosteron bij hagedissen (soort: *Anolis sagrei*) die blootgesteld werden aan licht 's nachts (LED, 3000 K, 23 tot 44 lux)<sup>300</sup>. Bij adulte Reuzenpadden zorgt nachtelijk kunstlicht (LED, 2800-3000K, 5 lux) dan weer voor een lagere concentratie van corticosteron, al is dit mogelijk te verklaren door een lagere activiteit of door een andere regulatiepiek<sup>299</sup>. Bij kikkervisjes van twee Amerikaanse soorten (*Lithobates berlandieri* en *Incilius valliceps*) werd vastgesteld dat nachtelijk kunstlicht (LED, 3000K, 190 lux) voor meer corticosteron zorgt<sup>301</sup>. Zeer interessant is een studie op de Amerikaanse pad<sup>302</sup>. Ze vonden initieel geen effect van nachtelijk kunstlicht (LED, 293 nm piek, ca. 3 lux) op larven, maar vonden wel een verhoogde corticosterone-concentratie bij juveniele padden die als larve opgegroeid waren onder nachtelijk kunstlicht. Dit toont aan dat effecten van licht pas waarneembaar kunnen zijn in latere levensstadia.





**Figuur 29: Bij jonge Amerikaanse padden (*Anaxyrus americanus*) die als larve opgroeiden onder nachtelijk kunstlicht (ca. 3 lux) werden verhoogde waarden van stresshormonen gevonden. Foto: Simon Pierre Barrette (Creative Common licentie).**

### **Reproductie**

Effecten op reproductie werden onderzocht in zeven studies. De meeste studies op amfibieën vonden negatieve effecten. Effecten werden gevonden op verschillende delen van reproductie. Een eerste deel dat beïnvloed kan worden is het roepgedrag van kikkers en padden. Twee observationele studies melden **verschillen in fenologie en roepduur** tussen verlichte en duistere gebieden<sup>303,304</sup>. Bij de Schreeuwkikker (*Lithobates clamitans*) werd vastgesteld dat mannetjes ca. 50% minder roepen bij verlichting<sup>305</sup>, maar de verlichting in deze studie was een zaklamp die plots aanging, en is dus niet helemaal vergelijkbaar met nachtelijk kunstlicht. Andere onderzoekers vonden dan weer geen effect van twee intensiteiten van nachtelijk kunstlicht (gloeilamp, 5 en 15 lux) bij de Grijze boomkikker (*Dryophytes versicolor*)<sup>306</sup>.

Een tweede deel is de paring en **bevruchting**. Mannetjes Gewone padden die verlicht worden (LED, 6500K, 0.1 en 5 lux) er tot 3 keer langer over deden om te beginnen paren, en tot 25% minder eitjes konden bevruchten (geen verschil tussen 0.1 en 5 lux)<sup>298</sup>.

Een derde deel is het **uitkomen en de metamorfose van larven**. Bij de Boskikker werd ook waargenomen dat onder felle verlichting (LED, 300 lux, geen verdere specificaties) een lager percentage van de eieren die uitkomen (92% bij nachtelijk kunstlicht in vergelijking met 99% bij duisternis), maar in deze studie werd geen effect op metamorfose of overleving van de uitgekomen eitjes gevonden<sup>297</sup>. Bij de Amerikaanse pad (*Anaxyrus americanus*) werd wel een effect gevonden op metamorfose snelheid, met een 8 dagen snellere metamorfose bij nachtelijk kunstlicht (LED, piek in blauw-groen, ca. 3-15 lux)<sup>307</sup>. In deze studie wordt eveneens gekeken naar de groei na metamorfose, en die was ca. 15% lager voor padden blootgesteld aan nachtelijk kunstlicht (LED, piek in blauw-groen, ca. 16 lux).





Exemplaren van een hagedissensoort (*Anolis sagrei*) die blootgesteld werden aan licht 's nachts (LED, 3000 K, 23 tot 44 lux) groeide sneller en legde meer eieren dan dieren die in duisternis sliepen<sup>300</sup>.

### 3.5.4 Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten

Het is aangetoond dat nachtelijke verlichting een negatief effect kan hebben op individuele amfibieën en (erg beperkt) op reptielen. Negatieve effecten op populaties, gemeenschappen en soort-interacties zijn zeer beperkt beschreven in de literatuur, maar toch lijkt het waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook effecten heeft op deze niveaus.

#### Interacties tussen soorten: competitie

De studie bij verschillende Gekko soorten op pacifische eilanden is een mooi voorbeeld van hoe competitie kan veranderen bij verlichting<sup>308</sup>. De Tjitjak (*Hemidactylus frenatus*), een geïntroduceerde gekko-soort, heeft een sterk negatief effect op de populatiegrootte van twee andere soorten (*Lepidodactylus lugubris* en *Gehyra oceanica*) op verlichte locaties, maar de soorten komen wel samen voor in natuurlijke gebieden zonder licht (type verlichting wordt niet gespecificeerd).

### 3.5.5 Effecten op Europees beschermde soorten

Doordat de meeste onderzoeken focussen op effecten op gemeenschapsniveau of effecten op modelsoorten is in de literatuur weinig informatie te vinden over soortspecifieke effecten van nachtelijke verlichting op Europees of Vlaams beschermde soorten. In Vlaanderen komen acht soorten voor die opgenomen zijn op de bijlagen van de Europese habitatrictlijn, maar we vonden slechts studies over twee soorten. In Roemenië werd beschreven hoe grote aantallen **Boomkickers** foerageerden op de muren van een historisch monument, en hierdoor meer vliegende insecten aten dan in andere situaties<sup>309</sup>. De studie laat echter niet toe om uitspraken te doen over het effect van nachtelijk kunstlicht, aangezien (1) een vergelijking met donkere situaties ontbreekt en (2) het type verlichting niet gespecificeerd wordt. Verder spreekt de studie over Boomkikker (*Hyla arborea*), maar gaat het, gezien de verspreiding om de nauwverwante Oostelijke boomkikker (*Hyla orientalis*).

Bij transecttellingen tijdens de najaars-migratie in Nederland werd gevonden dat juveniele **Kamsalamanders** (*Triturus cristatus*) zich concentreerden onder lantaarnpalen<sup>289</sup>. Aangezien ook foeragerende salamanders waargenomen werden, vermoed de auteur dat dit komt omdat de salamanders in verlichte omstandigheden meer kunnen foerageren (ter ondersteuning citeert de studie ook oudere literatuur (Griffiths, 1984) die niet online te vinden was, waaruit blijkt dat Kamsalamander in labo-omstandigheden geen aantrekking tot licht vertoont). De studie specificeert wel niet het type verlichting, of de lichtintensiteit.

Vanuit het voorzichtigheidsprincipe, en vanuit de kennis over modelsoorten als de Gewone pad (zie eerder) kan echter wel een negatief effect verwacht worden op alle Europees beschermde amfibieën. Over reptielen is onvoldoende kennis om een uitspraak te doen over de enige Europees beschermde reptielensoort (Gladde slang, *Coronella austriaca*) die voorkomt bij in Vlaanderen.



### 3.5.6 Kennis rond mitigatie

De kennis rond mitigatie voor amfibieën en reptielen is uitermate beperkt. We vonden enkel studies die het effect van kleurenspectra en lichtintensiteit onderzochten, voor een beperkte groep soorten.

#### Type verlichting en kleurenspectra

Twee gevonden studies vergelijken het effect van verschillende kleuren bij amfibieën. Het trekgedrag van Padden is sterk beïnvloed door lichtkleur, waarbij het aantal migrerende padden bijna 2 keer zo hoog was bij rood licht (LED, ca 52 lux direct onder lamp, piek ca 620 nm) en duisternis, in vergelijking met wit licht (LED, ca 52 lux, breed spectrum) en groen licht (LED, ca 52 lx dubbele piek rond 470 en 530 nm)<sup>293</sup>. Een labo-experiment vergeleek het effect van rood licht (4 lux), maanlicht (0.3 lux) en wit licht (3.8 lux en 12 lux) op het foerageergedrag van een Amerikaanse boomkikkersoort (*Hyla chrysoscelis*)<sup>310</sup>. Het licht werd geproduceerd door een gloeilamp met verschillende types filters. Hieruit bleek dat rood licht en wit licht beide ervoor zorgen dat de kikkers er 2 tot 3 minuten langer over doen om prooien te vinden dan in duisternis. Bij **amfibieën** lijkt het effect van lichtkleur dus **soortspecifiek**, maar wel een **veelbelovende mitigatievorm die meer onderzocht moet worden**.

Voor **reptielen** werd geen informatie over het verschil in lichtkleur gevonden. Bij zeeschildpadden vermeldt een review dat aanpassingen aan **lichtkleur (meer amber licht) onvoldoende is om aantrekking te vermijden**<sup>284</sup>.





**Figuur 30: Het trekgedrag van Padden wordt sterk beïnvloed door lichtkleur, waarbij het aantal migrerende padden bijna 2 keer zo hoog was bij rood licht en duisternis, in vergelijking met wit of groen licht. Foto: Frank Berbers (Creative Common licentie).**

### Lichtintensiteit

We vonden vier studies die effecten van verschillende lichtintensiteiten onderzoeken. Twee studie vonden geen effect. Bij een labo-experiment op een Amerikaanse boomkikkersoort (*Hyla chrysoscelis*) werd geen verschil gevonden tussen verschillende intensiteiten van wit licht<sup>310</sup>. Zowel 3.8 lux als 12 lux licht (gloeilamp met filter) zorgden ervoor dat de kikkers er 2 tot 3 minuten langer over deden om prooien te vinden dan in duisternis (0.003 lux). Er werd ook geen verschil in paargedrag waargenomen tussen duisternis en twee intensiteiten van nachtelijk kunstlicht (gloeilamp, 5 en 15 lux) bij de Grijze boomkikker (*Dryophytes versicolor*)<sup>306</sup>.

Twee studies vonden wel een effect. Fysiologische effecten bij Gewone pad worden sterker met toenemende intensiteit van nachtelijke verlichting (LED, piek rond 590 nm), en dit zowel voor energie allocatie (28% meer bij 5 lux; 58% meer bij 20 lux) als metabolisme (standard metabolic rate; 18% meer bij 5 lux; 75% meer bij 20 lux)<sup>292</sup>. Bij Reuzenpadden (*Rhinella marina*) veroorzaakt nachtelijk kunstlicht (LED, 2800-3000K) minder activiteit, en het effect hangt af van de intensiteit (in vergelijking met duisternis ca. 25% minder beweging bij 0.04 lux, en ca. 50% minder bij 5 lux)<sup>299</sup>.

Hoewel **effecten soortspecifiek** zijn, kan algemeen wel verwacht worden dat effecten **sterker zijn bij hogere lichtintensiteit**.

## 3.6 VISSEN

### Kernpunten

- Relatief veel studies over vissen
- Effecten op fysiologie, beweging en gedrag
- Effecten lijken af te hangen van lichtintensiteit
- Weinig gekend over mitigatie-mogelijkheden

### 3.6.1 Inleiding

#### Vissen

In Vlaanderen komen 42 soorten inheemse zoetwatervissen voor<sup>311</sup>, en in het Belgisch deel van de Noordzee zijn 141 soorten vissen waargenomen<sup>312</sup>. Net als bij andere diergroepen is een groot deel van deze soorten bedreigd: amper 15 van de 42 inheemse soorten zijn opgenomen in de categorie 'momenteel niet bedreigd' op de recentste rode lijst<sup>311</sup>. Negen soorten zijn opgenomen op de Europese habitatrichtlijn, en ook de Europese Kaderrichtlijn Water verplicht lidstaten tot een ecologisch waterbeheer met onder meer herstel van vismigratie. Verder heeft de visfauna ook een maatschappelijk belang op vlak van recreatie en economie (voornamelijk zeevisserij).

Veel vissoorten zijn nachtactief, of zowel nachtactief als dagactief, dus het is logisch dat nachtelijk kunstlicht ook deze soortgroep kan beïnvloeden.

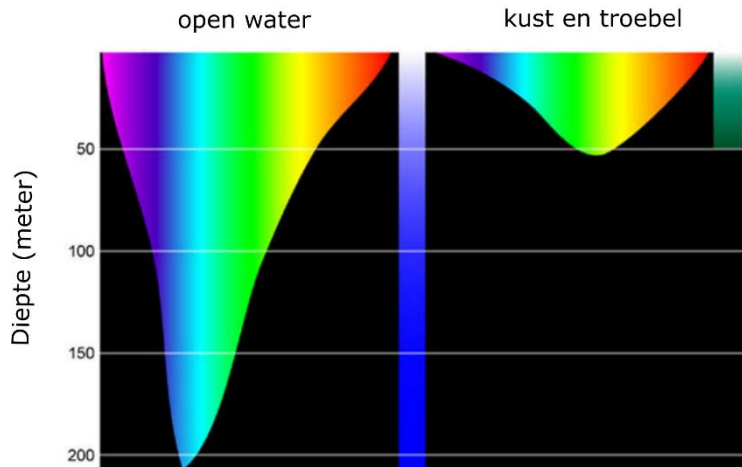
#### Hoe nemen vissen licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting te verstaan, is het belangrijk te begrijpen hoe vissen licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar vakliteratuur<sup>313</sup>. Zicht is belangrijk voor de meeste vissen. Visuele informatie in water verschilt sterk van op land (zie figuur 1). Rode en oranje golflengtes dringen minder diep door dan blauwe en groene golflengtes.

De algemene bouw van de ogen van vissen lijkt sterk op die van terrestrische gewervelden, maar de lens is ronder (met een zicht tot 360°). Ook de netvliezen van vissen zijn uniek in vergelijking met andere gewervelde dieren doordat ze gedurende de levensduur kunnen blijven groeien door de toevoeging van nieuwe neuronen. Vissen hebben zowel kegeltjes als staafjes op hun netvlies. Staafjes zijn zeer lichtgevoelig en laten het oog toe te zien bij lage lichtintensiteit, maar geven geen scherp afgeïjnd beeld. Kegeltjes geven een scherper beeld, maar zijn minder efficiënt bij lage lichtintensiteiten. De meeste soorten vissen hebben een tetrachromatisch zicht (samengesteld uit vier types kegeltjes). Net als de meeste andere gewervelden hebben ze types kegels gevoelig voor rode, groene, blauwe en golflengtes, maar daarnaast hebben vele soorten ook nog kegeltjes die ultraviolet licht waarnemen. De bereik waarover vissen kunnen zien behoort daardoor tot het grootste van alle gewervelden, met gevoeligheden vanaf diep rood (750 nm) tot ultraviolet (350 nm). Een uitzondering zijn kraakbeenvissen die amper kegeltjes hebben, en dus geen kleuren waarnemen.



# Licht penetratie in water



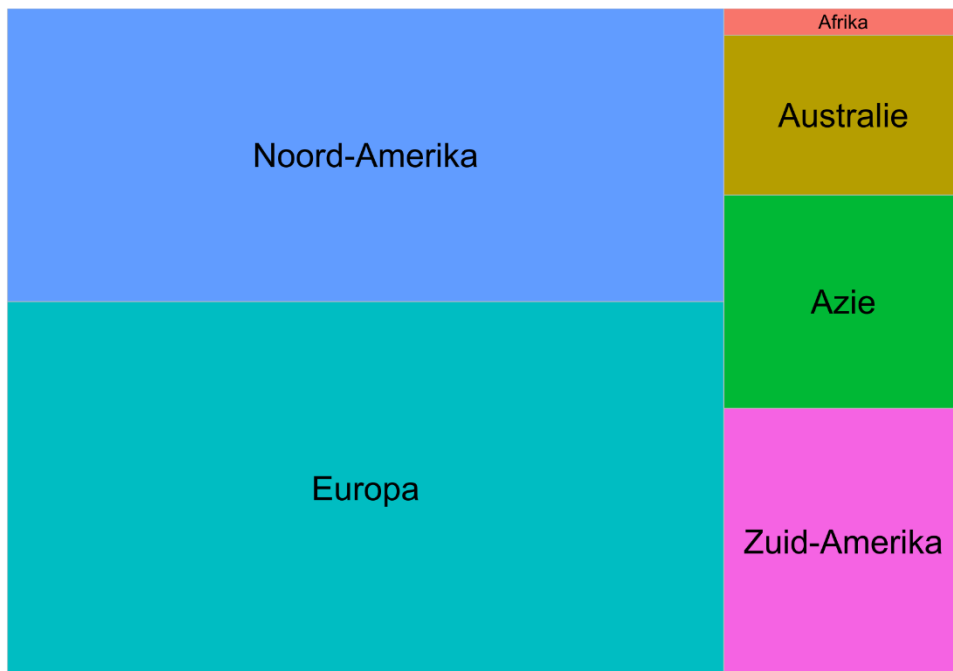
**Figuur 31** Visuele informatie in water verschilt sterk van op land: de penetratie van licht hangt af van de lichtkleur.

## 3.6.2 Literatuur onderzoek

De literatuurstudie leverde 101 studies op, waarvan 33 gevonden werden via systematische zoektocht met kernwoorden en de overige studies via referenties, grijze literatuur en andere. Zoals bij andere groepen, was er ook bij vissen een sterke bias in de beschikbare literatuur. De meeste van deze studies bestonden uit lab-experimenten (figuur 32a). In de geraadpleegde literatuur was een duidelijke geografische bias naar studies uit Noord-Amerika en Europa (figuur 32b).



a) Aantal studies per werelddeel



b) type van de studie



**Figuur 32: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie.**



### 3.6.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op individuele vissen

#### Fototaxis en effecten op beweging

De effecten van licht op vissen werden onderzocht in 23 studies. Over het algemeen blijkt dat **effecten erg soort-, leeftijds- en contextspecifiek** zijn <sup>314</sup>. Sommige soorten of leeftijdsklassen worden aangetrokken tot licht, andere soorten zijn net lichtschuw, en een beperkt aantal studies vindt geen effecten. Effecten kunnen ook verschillen volgens geografische schaal. Zo is de Boksvij ( *Boops boops* ) aangetrokken tot verlichte baaien (type verlichting niet gespecificeerd), maar zoeken ze in die verlichte baaien net beschaduwde en donkere microhabitats op <sup>315</sup>.

**Foerageerbewegingen** bij vissen zijn vaak sterk bepaald door dag- en nachtritmes, en nachtelijke verlichting kan deze sterk verstoren. Sommige soorten jagen actiever bij nachtelijk kunstlicht dan bij duisternis (bv. Rietvoorn ( *Scardinius erythrophthalmus* ) <sup>316</sup> en Baars ( *Perca fluviatilis* ) <sup>317</sup>). Deze verhoogde activiteit kan effecten hebben op interacties met prooisorten.

Zes studies onderzochten het effect van nachtelijk kunstlicht tijdens migratie, en toonden aan dat nachtelijk kunstlicht **vistrek kan verstoren**. Ten eerste kan de timing van migratie verstoort worden. Bij verlichting starten jonge Zalmen ( *Salmo salar* ) hun zeeaarste trek gemiddeld 1,5 tot 2 dagen later dan bij duisternis <sup>318</sup>, en dat bij lichtintensiteiten vanaf 1 lux (halogeen, 2800K). Bovendien vindt onder natuurlijke omstandigheden de trek van jonge dieren vooral bij zonsondergang plaatsvind (om predatie te vermijden), maar bij aanwezigheid van kunstlicht (halogeen, 2800K, 14 lux op wateroppervlak) gebeurt die op willekeurige momenten van de dag <sup>319,320</sup>. Verlichting op de route, bv. aan een brug, kan ook een sterke barrière zijn, wat bv. aangetoond is via een telemetrie-studie op Rivierprik ( *Lampetra fluviatilis* ) <sup>321</sup>. Bij Paling ( *Anguilla anguilla* ) werden sterke negatieve effecten waargenomen in een labstudie waarbij migratie gesimuleerd werd (zowel bij 5 lux als bij 20 lux, LED, breed spectrum wit) <sup>322</sup>. En in een studie op de nauwverwante Amerikaanse paling ( *A. rostrata* ) suggereert een labexperiment dat verlichting (LED, blauw (piek 480 nm), geel (piek 580nm) en wit (breed spectrum), geen info over intensiteit) zelfs gebruikt kan worden om palingen te leiden naar veilige plekken (bv. vistrappen) <sup>323</sup>.

#### Directe sterfte

We vonden twee studies die effecten van kunstlicht op directe sterfte en overleving onderzochten. Bij de Zwartband doktersvis ( *Acanthurus triostegus* ) werd vastgesteld dat larven die gehouden werden voor 10 dagen onder nachtelijk kunstlicht (LED, 6500K, ongeveer 20 lux op wateroppervlak) een veel hogere sterfte vertoonden (26% sterfte in vergelijking met 4% bij dieren onder duisternis gehouden). Een tweede studie op jonge Zalmen vond geen verschil in directe overleving tussen verlichting (halogeen, 28000K, 14 lux), maar vond wel effecten op bewegingsgedrag <sup>319</sup>.

#### Reproductie

Twee studies onderzochten effecten op reproductie en vonden een **groot nadelig effect**. Een labexperiment op de Harlekijnvis ( *Amphiprion ocellaris* ) toonde aan dat nachtelijk kunstlicht (LED, 5000 K, 10-15 lux op wateroppervlak) het voortplantingssucces tot nul herleidde <sup>324</sup>.



Hoewel de vissen even vaak paaiden en bevruchting ook niet veranderde, kwam geen enkel ei uit bij licht (in vergelijking met ongeveer 80% bij de duisternis groep). Een andere studie vond gemengde en soort-specifieke resultaten, met afhankelijk van de soort zowel snellere als tragere ei-ontwikkeling (respectievelijk bij Kopvoorn (*Squalius cephalus*) en bij Blankvoorn (*Rutilus rutilus*) en Alver (*Alburnus alburnus*)<sup>325</sup>. Een opmerking bij deze studie is wel dat het gebruikte licht (fluorescentielamp, 24u lang 3500 lux) minder ecologisch relevant is, omdat deze waarden in de praktijk amper tot niet voorkomen.

### Fysiologische effecten

14 studies onderzochten fysiologische effecten van nachtelijk kunstlicht op vissen. Net als bij andere gewervelde dieren speelt het hormoon melatonine – waarvan de productie erg gevoelig is voor nachtelijk kunstlicht – ook bij vissen een belangrijke rol. Bij vissen is dit hormoon onder meer betrokken bij het regelen van beweging, samenscholen, foerageergedrag en verticale migratie (bv. overdag dieper gaan)<sup>326</sup>. Zes studies die vissen in aquaria blootstelden aan nachtelijk kunstlicht **vonden grote veranderingen in melatonine-regeling**<sup>314</sup>. Over het algemeen lijkt een **drempelwaarde** te zijn van **1 lux**, en hogere lichtintensiteit leidt niet tot grotere effecten<sup>314</sup> (maar er is ook een studie die effecten vond vanaf 0.01 en 0.1 lux<sup>327</sup>). Dergelijke resultaten zijn echter niet steeds makkelijk te vertalen naar veldomstandigheden. Zo werd geen verschil in melatonine-regulatie gevonden bij een experiment in meer natuurlijke veldomstandigheden, waarbij vissen in vijvers aan 15 lux (op wateroppervlak) werden blootgesteld en het effect vergeleken werd vijvers blootgesteld aan maanlicht<sup>328</sup>. Naast melatonine onderzochten drie studies ook effecten op cortisol, het stresshormoon, maar hier werd geen duidelijk effect gevonden. Tenslotte bekeken enkele studies ook effecten op voorplantingshormonen (follikel-stimulerend hormoon, luteïniserend hormoon), waarbij licht opnieuw een negatief effect had vanaf 1 lux<sup>329</sup>.

Andere gerapporteerde fysiologische effecten van nachtelijk kunstlicht op vissen zijn een **20% hogere energie- en zuurstofconsumptie** bij de Zuid-Amerikaanse zeevis *Girella laevis* onder verlichting (70 lux, geen verdere specificaties) in vergelijking met duisternis<sup>330</sup>.



**Figuur 33: Bij Baars (*Perca fluviatilis*) werd vastgesteld dat fysiologische effecten optreden vanaf een lichtintensiteit van 1 lux. Foto Stefan Verheyen (Creative Common Licentie)**



### Verstoorde timing

Drie studies onderzochten effecten op van kunstlicht op timing. Een studie bij een Zuid-Amerikaanse zeevis (*Girella laevis*) toonde aan dat kunstlicht de timing van **dagelijkse activiteit** kan verstoren. Vissen die 10 dagen blootgesteld waren aan nachtelijk kunstlicht (70 lux, geen verdere specificaties) hadden in vergelijking met vissen die in duisternis gehouden werden, een willekeurige activiteitspiek over de dag. Ze waren in tegenstelling tot de controlegroep niet actief op momenten dat het getij normaal veranderd <sup>330</sup>. Ook de timing van **seizoenaal gedrag zoals migratie** kan verstoort worden. Bij zalm werd waargenomen dat zeewaarste trek gemiddeld 1,5 tot 2 dagen later plaatsvindt onder verlichting (halogeen, 2800K, 1 lux) dan bij duisternis <sup>318</sup>. Ook al lijkt dit verschil klein, het kan belangrijke gevolgen hebben naar overleving. Verder vindt migratie onder natuurlijke omstandigheden vooral bij zonsondergang plaats (om predatie te vermijden), maar vindt die bij nachtelijk kunstlicht (halogeen, 2800 K, 14 lx op wateroppervlak) op willekeurige momenten van de dag plaats <sup>320</sup>.

### 3.6.4 Effecten op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten

Het is aangetoond dat nachtelijke verlichting een negatief effect kan hebben op individuele vissen. We vonden 12 studies die effecten onderzochten op populaties, gemeenschappen en soortinteracties. Ondanks de relatief beperkte literatuur, lijkt het toch zeer waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook effecten heeft op deze niveaus.

#### Effecten op populaties

Gerapporteerde effecten op populaties zijn beperkt tot enkele studies die aantallen vergeleken (en dus niet andere factoren zoals populatieopbouw of populatiegroei), en geven **gemengde resultaten**. Wetenschappers onderzochten het effect van een onderwaterlamp die gebruikt wordt bij zalmkweek op de visgemeenschap langs de westkust van Canada (lichtintensiteit gerapporteerd van 15 tot 36000 lux (sic) afhankelijk van de afstand tot de lamp, geen verdere informatie)<sup>331</sup>. Aantallen van verschillende soorten zoals Haring (*Clupea pallasii*) en Driedoornige stekelbaars (*Gasterosteus aculeatus*) waren hoger bij verlichting dan bij de donkere situatie (bij Haring tot 100 keer meer individuen), maar de studie heeft een beperkte opzet (één locatie, één lamp). Een studie in Canada installeerde straatverlichting bij verschillende bosbeken (natriumlampen (HPS), 0.8 lux op wateroppervlak), en vond geen effect op de populatie van Roodkeelforel (*Oncorhynchus clarki*) <sup>39</sup>.

#### Effecten op het gemeenschapsniveau

Effecten op gemeenschapsniveau werden voornamelijk onderzocht bij mariene vissen. Een observationele studie in de golf van Mexico vond geen significant verschil in soortenrijkdom van vissen bij verlichte en onverlichte boorplatformen <sup>332</sup>. Effecten kunnen ook afhangen van de grootte van de vissoorten <sup>333,334</sup>. In Zuid-Afrika werden bij verlichting (natriumlamp, geen verdere info) zowel meer kleine vissen (<10 cm) als meer grotere vissen (>50cm) waargenomen

////////////////////////////////////

dan in duisternis <sup>333</sup>. Deze laatste groep bevat voornamelijk roofvissen. Bolton en collega's vonden bij een experiment bij de Oostkust van Australië dat verlichting (LED, ongeveer 160 lux) leidt tot een toename van de kleine en middel grootteklasse (<40 cm) (van gemiddeld één naar 60 tot 90 individuen), maar niet bij de grotere vissen (>40 cm) <sup>334</sup>. Tenslotte vonden sommige studies ook geen effecten. In een veldexperiment in Florida werden lampen (900 lumen, geen verdere info) geïnstalleerd in zeegrasvelden. De onderzoekers vonden, in vergelijking met donkere controle-sites, geen effecten op de visgemeenschap (abundantie van de soorten en soortenrijkdom) <sup>335</sup>. Studies die effecten op gemeenschappen onderzoeken vinden dus **gemengde resultaten**, waarbij sommige studies duidelijke wijzigingen zien in de visgemeenschap en andere niet. Resultaten zijn dus vermoedelijk **context- en soortafhankelijk**.

### Soortinteracties: predatie

Acht studies tonen aan dat verlichting de **predatie van en door vissen sterk kan beïnvloeden**. Een studie bij Rietvoorn vond dat nachtelijk kunstlicht de **predatie van vissen op geleedpotige prooien** kan veranderen bij kunstlicht. In een labo-experiment werden vissen en prooien blootgesteld aan drie types verlichting (natriumlamp (8 lux), metaalhalide-lamp (7 lux) en halogeenlicht (5 lux)). Terwijl de vissen actiever waren onder verlichting, vertoonden de watervlooien meer uitwijkgedrag, vooral onder metaalhalide en halogeenlampen <sup>316</sup>. Een andere studie vond dat Baars (*Perca fluviatilis*) efficiënter jaagt op vlokreeftjes bij nachtelijke verlichting (LED), maar er geen verschil is tussen een lichtintensiteit van 2 lux of 10 lux <sup>317</sup>.

Nachtelijk kunstlicht kan leiden tot een **verhoogde predatie op vissen zelf**. In een labo-experiment bij Rode zalm (*Oncorhynchus nerka*) werd aangetoond aan dat donderpadden (cottidae spec.) in duisternis ongeveer 5% van de migrerende juveniele exemplaren opeten, terwijl dit bij 10 lux ongeveer 45% bedraagt (geen specificaties over het type lampen)<sup>336</sup>. Bij een studie aan de oostkust van Australië werd gevonden dat bij kunstlicht (LED, ongeveer 160 lux) roofvissen méér predatiegedrag vertonen, hoewel hun aantallen niet verschilden met duistere situaties <sup>334</sup> (in tegenstelling tot een eerdere studie <sup>333</sup>). Andere, kleinere vissen zwommen meer in dense scholen bij kunstlicht dan bij duisternis, wat erop wijst dat kunstlicht ervoor zorgt dat deze vissen actief antipredatorgedrag vertonen, en dus hun normale nachtelijke rust verstoort. Een veldexperiment in Californië bij jonge Chinookzalm (*Oncorhynchus tshawytscha*) toonde aan dat de activiteit van roofvissen begint te stijgen 3u na zonsondergang, en er in de eerste drie uur dus geen verschil is tussen verlichting (LED, 20 000 lumen) en duisternis op vlak van predatierisico <sup>337</sup>.

Naast effecten door piscivore (=visetende) vissen, zijn er ook een aantal studies die toegenomen activiteit beschrijven van visetende vogels (bv. meeuwen), maar deze zijn observationeel en anekdotisch, en het is niet duidelijk wat het effect is op de vispopulaties (zie ook hoofdstuk over vogels).



### 3.6.5 Effecten op Europees beschermde soorten

Doordat de meeste onderzoeken focussen op effecten op gemeenschapsniveau of effecten op modelsoorten is in de literatuur maar beperkte informatie te vinden over soort-specifieke effecten van nachtelijke verlichting op Europees of Vlaams beschermde soorten. In Vlaanderen komen 9 soorten voor die opgenomen zijn op de bijlage II staan van de Habitatrichtlijn. Rivierdonderpad (*Cottus perifretum*), Beekprik (*Lampetra planeri*), Rivierprik (*Lampetra fluviatilis*), Kleine modderkruiper (*Cobitis taenia*) en Grote modderkruiper (*Misgurnus fossilis*) hebben een uitgesproken nachtactiviteit. Zalm (*Salmo salar*) en Fint (*Alosa fallax*) zijn zowel nacht als dagactief, terwijl Bittervoorn (*Rhodeus sericeus amarus*) vooral dagactief is. We vonden enkel studies over Zalm en Rivierprik.

Bij **Zalm** werden verschillende effecten waargenomen van nachtelijk kunstlicht. Nachtelijk kunstlicht verstoort de timing van migratie, die onder natuurlijke omstandigheden vooral bij zonsondergang plaatsvindt (om predatie te vermijden), maar op random momenten van de dag plaatsvindt bij nachtelijk licht (halogeen, 2800 K, 14 lx op wateroppervlak) <sup>320</sup>. Ook het gewicht van de jonge exemplaren was lager als ze blootgesteld werden aan nachtelijk kunstlicht <sup>319</sup>. Tenslotte werd bij een labo-experiment gevonden dat de dagelijkse bewegingspatronen van Zalm al verstoord werden vanaf intensiteiten van 1 lux op het wateroppervlak (breed spectrum fluorescentielamp) <sup>318</sup>.

Een telemetrie-studie op **Rivierprik** in Finland vond dat **verlichte bruggen een sterke barrière zijn** voor migratie (geen verdere info over het type verlichting) <sup>321</sup>. Ongeveer 90% van de gezenderde exemplaren stopten hun migratie bij verlichte bruggen. Slechts ongeveer 20% van deze gestopte exemplaren kon in de periode dat de zender werkte (ongeveer 25 dagen) de verlichte brug voorbij raken, maar het overgrote merendeel bleef rondzwemmen voor de verlichte brug.



**Figuur 34: een studie in Finland vond dat verlichte bruggen een sterke barrière zijn voor migratie van de Rivierprik (*Lampetra fluviatilis*) . Foto: Bram Conings.**



### 3.6.6 Kennis rond mitigatie

Hoewel enkele studies effecten van nachtelijke verlichting op vissen beschrijven, is de kennis rond mitigatie-mogelijkheden van zulke effecten relatief beperkt.

#### Type verlichting en kleurspectra

Er is beperkte informatie te vinden over het effect van verschillende types verlichting of golflengtes op vissen. Visuele informatie in water verschilt sterk van op land: rode en oranje golflengtes dringen minder diep door dan blauwe en groene golflengtes. Het is daarom ook te verwachten dat groen of blauw licht minder 'habitat-vreemd' is (overdag dan toch), en daardoor minder effect heeft dan rood of geel licht, maar niet alle studies vinden dergelijke resultaten. Zo vond een studie aan de westkust in Noord-Amerika dat het installeren van groene LED verlichting (piek 540 nm, 2 lux) aan garnalen-boomkorren de vangst van verschillende vissoorten met 56% tot 91% verminderde<sup>338</sup> (maar er is ook een gelijkaardige studie aan de Noorse kust die geen effect vond<sup>339</sup>).

Zes studies vonden dat rood licht het sterkste negatief effect had, onder meer op groei<sup>340</sup> en stress fysiologie<sup>329,341</sup>. Een studie bij een Chinese karperachtige (*Ptychobarbus kaznakovi*) die onderzocht wat het effect was van verschillende kleuren (groen (530 nm), blauw (470 nm), rood (650 nm) en geel (580 nm) LED verlicht) vond hogere activiteit onder alle kleuren, maar effecten onder groen en blauw licht waren beperkt, terwijl effecten onder geel en rood licht ongeveer dubbel zo sterk waren<sup>342</sup>. Bij een studie op Amerikaanse paling, een voornamelijk nachtactieve soort, vonden Elvidge en collega's dat weer sterkere effecten van blauw licht<sup>323</sup>. Zowel blauw (piek 480 nm), geel (piek 580nm) als wit licht (breed spectrum) (LED, geen info over intensiteit) schrikken jonge exemplaren af (ongeveer 50% minder in de verlichte deel actief dan in de duistere controle). Blauw licht met een hogere frequentie (30 flitsen per seconde) had het sterkste effect. De onderzoekers suggereren dat dergelijke verlichting kan gebruikt worden om palingen weg te leiden van gevaarlijke plekken, en naar bv. vistrappen.

Uit de literatuur komt dus naar voor dat het effect van verschillende **lichtkleuren** eerder **context- en soortafhankelijk** is.

#### Natuurlijke waterlopen en donkere vluchtplekken

Waterlopen natuurlijker inrichten, met bv. natuurlijke oevermorfologie en vegetatie en voldoende dood hout zou mogelijk vissen (en hun prooien) duistere vluchtplekken kunnen geven bij nachtelijke verlichting. Het effect hiervan op vissen is nog niet onderzocht, maar een studie suggereert dat het effect van kunstlicht complex is, en **extra schuilplaatsen zeker niet in elke situatie een oplossing bieden**. Het toevoegen van dood hout in aquaria leidde niet tot minder efficiënte predatie op vlokreeftjes door Baars (*Perca fluviatilis*) bij nachtelijke verlichting (LED, zowel bij 2 als 10 lux). Bij duisternis zorgde dood hout in het aquatiruim net wel voor minder efficiënte predatie<sup>317</sup>.



## Lichten dimmen

Enkele studies onderzochten effecten van verschillende lichtintensiteiten. Bij **activiteit** blijkt licht ook al vanaf lage intensiteiten effect te hebben. Bij Zalm bv. vonden Riley en collega's dat dispersie sterk verstoort was bij nachtelijke verlichting zowel bij 1, 2, 4 als 8 lux op het wateroppervlak (metaalhalogeen) <sup>318</sup>. Er was geen significant verschil tussen de gebruikte lichtintensiteiten; Daardoor concluderen de onderzoekers dat rivieren duister moeten zijn, en lichten dimmen niet voldoende is als mitigatie. Bij **fysiologisch** onderzoek in lab-omstandigheden (aquaria) wordt over het algemeen een **drempelwaarde** gevonden vanaf **1 lux** voor significante effecten. Hogere lichtintensiteiten leiden hier vreemd genoeg niet tot nog grotere effecten <sup>314</sup>. Dergelijke resultaten zijn echter niet steeds makkelijk te vertalen naar veldomstandigheden (zie bv. de studie van Bruening en collega's<sup>328</sup> voor een meer natuurlijk experiment waarbij 15 lux geen effect had).

Eén enkele studie vind wel een effect van lichtintensiteit. Bij predatie op juveniele Rode zalmen werd geen verhoging gevonden ten opzichte van duisternis bij 1 lux, maar wel bij 10 lux <sup>336</sup>. Eén studie is echter onvoldoende om het effect van lichtintensiteit op predatie in te schatten.

Samenvattend kan gesteld worden dat lichten **dimmen niet voldoende als mitigatievorm voor negatieve effecten op vissen tegen te gaan**.

## Duur van verlichting beperken

We vonden geen studies die onderzochten of negatieve effecten van nachtelijke verlichting op vissen vermeden kunnen worden door verlichting een deel van de nacht uit te schakelen. Een veldexperiment bij Amerikaanse Chinookzalmen toonde echter aan dat de activiteit van roofvissen pas begint te stijgen 3u na zonsondergang, en er in de eerste drie uur dus geen verschil is tussen verlichting (LED, 20 000 lumen) en duisternis op vlak van predatierisico <sup>337</sup>. Verlichting enkel de eerste uren van de nacht laten branden zou dus mogelijk ook bij onze soorten predatierisico kunnen verminderen.



## 3.7 PLANTEN

### Kernpunten

- Relatief weinig studies over planten
- Nachtelijke verlichting beïnvloedt timing van blad-ontplooiing en bloei
- Nachtelijke verlichting kan zorgen voor minder bloei
- Nachtelijke verlichting kan de interacties met insecten beïnvloeden, en zo leiden tot minder bestuiving en meer bladvraat.
- Nachtelijke verlichting kan ook effecten hebben op gemeenschappen, en zeldzame soorten benadelen ten voordele van competitief sterkere soorten.
- Weinig gekend over mitigatie-mogelijkheden

### 3.7.1 Inleiding

#### Planten

In Vlaanderen komen meer dan 1400 inheemse en ingeburgerde plantensoorten voor <sup>343</sup>. Net als bij andere soortengroepen is een groot deel van deze soorten bedreigd: minder dan de helft (45%) van de soorten zijn momenteel opgenomen in de categorie 'momenteel niet bedreigd' op de recentste rode lijst<sup>343</sup>. Planten vormen de basis van de beschermde vegetaties, en vier soorten zijn opgenomen op de Europese habitatrichtlijn (bijlage II en IV). Licht is van fundamenteel belang voor planten, zowel voor fotosynthese, groei en ontwikkeling. Het is dus niet verrassend dat nachtelijk kunstlicht ook deze soortgroep kan beïnvloeden.

#### Hoe nemen planten licht waar?

Om het effect van nachtelijke verlichting in te kunnen schatten, is het belangrijk te begrijpen hoe planten licht waarnemen. Hier geven we een korte introductie, maar we verwijzen voor meer informatie naar specifieke vakliteratuur <sup>344,345</sup>. Planten hebben **fotoreceptor-pigmenten** in hun cellen, die reageren op verschillende golflengten, **van UV en blauw tot rood**. Groene en gele golflengten worden niet opgenomen door fotoreceptor-pigmenten, en worden dus teruggekaatst, wat planten hun typische groene kleur geeft. In het totaal zijn 13 pigmenten gekend. De drie belangrijkste groepen zijn fytochromen, cryptochromen en fototropines. Fytochromen, zoals phyA en phyB, zijn gevoelig voor rood (650-670 nm) of dieprood (705-740 nm) licht, en zijn belangrijk voor bloeitijd, schaduwreacties en zaadzetting. Cryptochromen zijn gevoelig voor blauw en UV licht (320-350 nm) en zijn belangrijk voor bloeitijd en verdedigingsreacties. Fototropines zijn ook gevoelig voor blauw en UV licht en zijn belangrijk voor chlorofyl productie en groei in de richting van het licht.

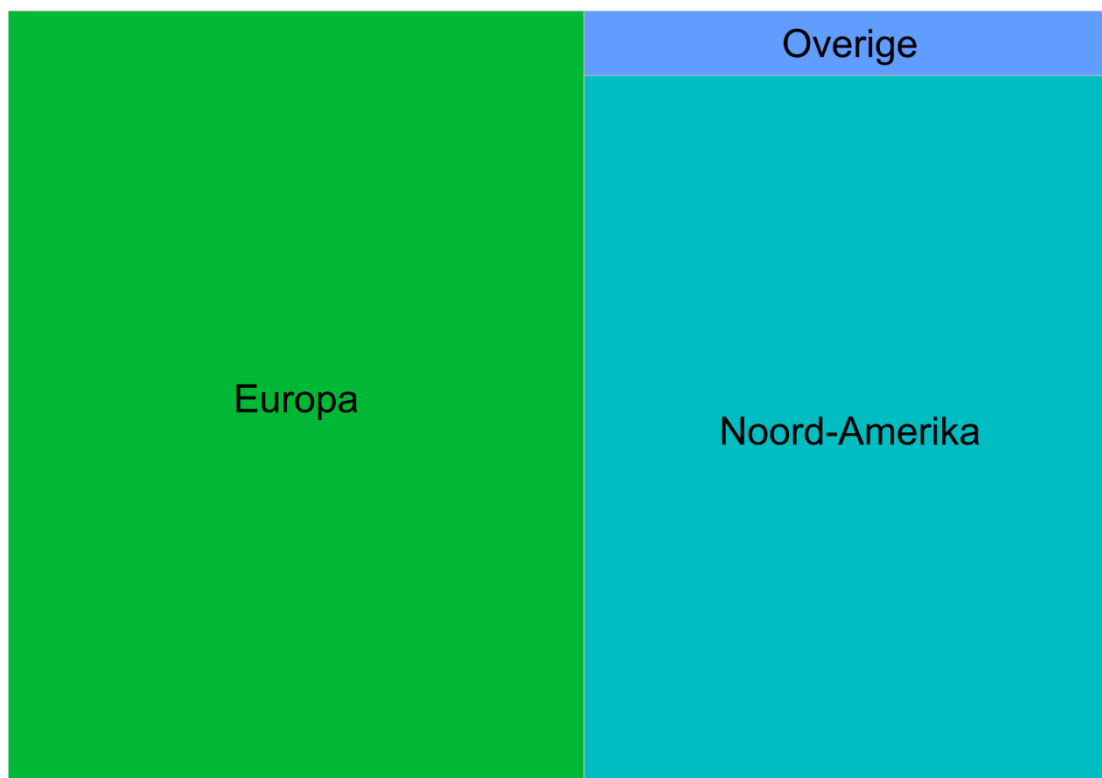
Hoe planten licht waarnemen is erg complex, en verschillende fotoreceptoren kunnen verschillende fysiologische processen in gang zetten, die elkaar kunnen opheffen of versterken, en deze processen zijn erg **soort- en contextspecifiek**. Uit labstudies blijkt dat ook korte duur licht (vanaf 5 minuten per nacht) en lage lichtintensiteiten (0.5 lux) al kunnen leiden tot fysiologische reacties <sup>344</sup>. Deze complexiteit maakt het moeilijk om resultaten van labstudies te vertalen naar ecologische effecten in veldomstandigheden.

////////////////////////////////////

### 3.7.2 Literatuur onderzoek

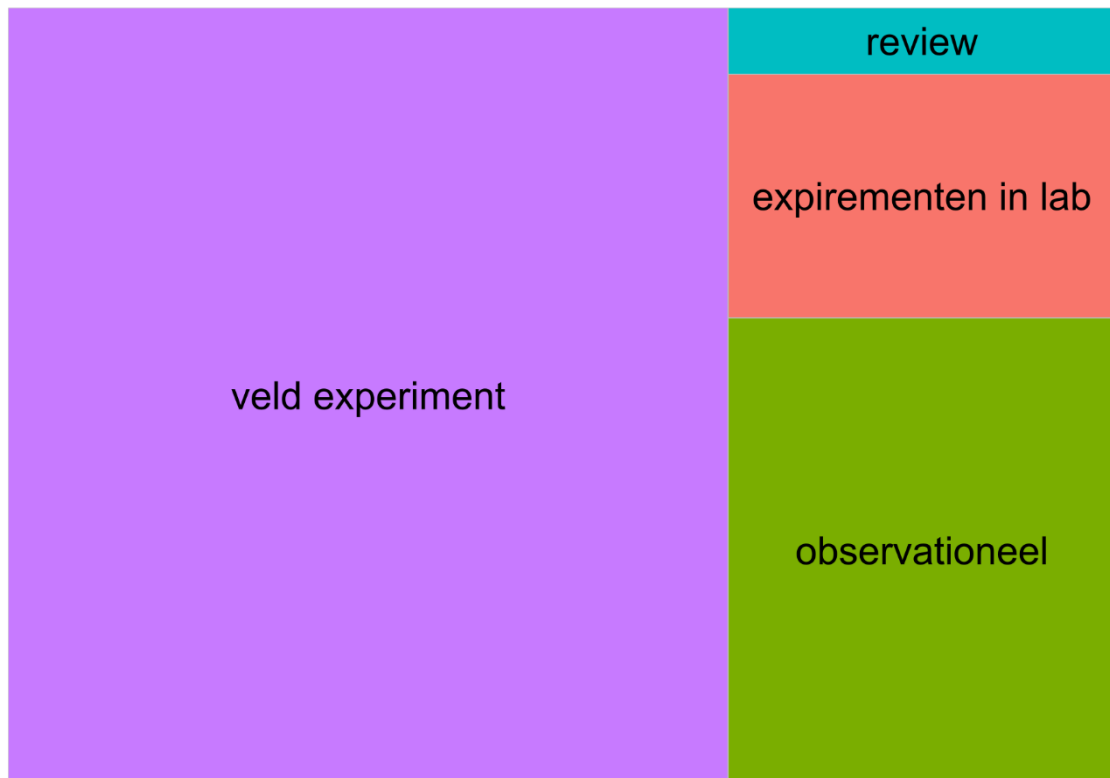
De literatuurstudie leverde 137 studies op, waarvan 68 gevonden werden via systematische zoektocht met kernwoorden en de overige studies via referenties, grijze literatuur en andere. In de zoektocht werd gefocust op ecologische effecten, en werden studies op planten in landbouwomstandigheden niet meegenomen (tenzij ingeschat werd dat ze erg relevant waren). Zoals bij andere groepen, was er ook bij planten een sterke bias in de beschikbare literatuur. De meeste van deze studies bestonden uit veld-experimenten (figuur 35a). In de geraadpleegde literatuur was een duidelijke geografische bias naar studies uit Noord-Amerika en Europa (figuur 35b). Fysiologische studies ontbraken grotendeels, en studies focussen vaak op timing (fenologie) en interacties met andere soorten.

a) Aantal studies per werelddeel





b) type van de studie



Figuur 35: overzicht van de verdeling van de opgenomen studies in het literatuuronderzoek volgens (a) locatie (werelddeel), (b) type studie.





**Figuur 36: Moerasrolklaver (*Lotus pedunculatus*) maakt tot 25% minder bloeihoofdjes bij nachtelijke verlichting, en dit zowel voor wit licht als voor amber licht (15 lux). Foto: Marc Batsleer.**

### Verstoorde timing

Ten eerste kan de **timing van de bladeren** verstoord worden, wat vooral bij bomen en struiken geobserveerd is<sup>344,350,351</sup>. **Effecten lijken echter soort-afhankelijk**, maar werd bij diverse genera waargenomen (o.a. Berk, Populier, Wilg, Iep, Plataan, Paardenkastanje, Eik, Beuk en Es)<sup>344</sup>. Een observationele studie in Engeland vond **vroegere bladontplooiing** bij nachtelijke verlichting (bepaald aan de hand van satellietbeelden) bij vier boomsoorten (Esdoorn (*Acer pseudoplatanus*), Beuk (*Fagus sylvatica*), Zomereik (*Quercus robur*) en Es (*Fraxinus excelsior*))<sup>350</sup>. Het effect was vooral uitgesproken bij Es, waar de bladontplooiing 7 dagen vroeger was op de felst verlichte plekken in vergelijking met duisternis. Een studie uit Slovaakse vond dan weer dat ook in de herfst nachtelijke verlichting effect heeft. Esdoorns die groeien bij nachtelijke verlichting vertonen **later bladverlies** (tot 22 dagen later in vergelijking met bomen in duisternis)<sup>352</sup>.

Verder kan de **timing van de bloei** verstoord zijn, waarbij de meeste studies vroegere bloei waarnemen<sup>353</sup>, of juist later<sup>344,348</sup>. Bij een meerjarig veldexperiment in Engeland werd gevonden dat effecten op bloei-timing ook sterk kunnen verschillen tussen de jaren, waarbij verlichte grassen tussen de 4 dagen vroeger en 12 dagen later bloeiden dan grassen die onder duisternis groeiden<sup>354</sup>.



### 3.7.4 Effecten van nachtelijk kunstlicht op populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten

Het is aangetoond dat nachtelijke verlichting een negatief effect kan hebben op individuele planten. We vonden 21 studies die effecten onderzochten op gemeenschappen en soortinteracties.

#### Effecten op het gemeenschapsniveau

Effecten op gemeenschapsniveau werden nog maar weinig onderzocht. De meeste studies vinden dat, net als bij voedselbronnen zoals stikstof, enkele soorten vermoedelijk beter gebruik kunnen maken van het extra licht. Deze soorten kunnen daardoor een competitief voordeel ondervinden en andere soorten wegconcurreren. Een veld-experiment vond dat de verlichting (LED, 15-30 lux) tot een **toename van de bedekking en biomassa van dominante grassen** leidde<sup>354</sup>. Een recente studie in Duitsland toont aan dat **vooral zeldzame soorten een competitief nadeel ondervinden bij nachtelijk kunstlicht**<sup>355</sup>. De onderzoekers planten verschillende plantensoorten samen, namelijk 10 zeldzame soorten (voorkomend in minder dan 15% van de inventarisatiehokken in Duitsland) en 11 algemene soorten (veel voorkomend in Duitsland) van dezelfde plantenfamilies. Deze kunstmatige plantengemeenschappen werden blootgesteld aan nachtelijk kunstlicht (LED, 6500 K, ca. 20 lux) en aan donkere nachten (ca. 0,5 lux). Algemene soorten bleken meer te kunnen profiteren van dit kunstlicht, en bij kunstlicht zeldzame soorten weg te concurreren.

Ook **invasieve uitheemse plantensoorten kunnen profiteren** van kunstlicht<sup>355,356</sup>. Een observationele studie uit Noord-Amerika toont aan dat een invasieve grassoort (Zwenkdravik *Anisantha tectorum*) vaker voorkomt onder straatverlichting (natriumlampen) dan onder andere palen<sup>356</sup>.





**Figuur 37: Nachtelijke verlichting kan competitief sterkere soorten en exoten bevoordelen en zo zorgen voor de afname van zeldzamere soorten. Zwenkdravik (*Anisantha tectorum*), een invasieve exoot in Noord-Amerika, komt daar vaak voor onder lantaarnpalen. Foto: Tim Vochten (Creative Common Licentie)**

### **Soortinteracties: Plant-geleedpotige interacties**

Verlichting kan de interacties tussen geleedpotigen en planten op vele manieren beïnvloeden, zoals rechtstreeks via het gedrag van de insecten, of indirect via 'bottom-up' effecten op kwaliteit van nectar of bladeren<sup>66,68,101</sup>, of via 'top-down' effecten via het aantal en het gedrag van predatoren of parasieten<sup>81,102</sup>. Nachtelijk kunstlicht kan ook de timing van zowel planten als geleedpotigen verstoren (zie eerder). Hierdoor kan een mismatch ontstaan, waardoor bv. planten te vroeg op het jaar bloeien, terwijl bestuivers nog niet actief zijn.

Uit het literatuuronderzoek kwamen 9 studies die **herbivorie** (bladvraat) onderzochten. De meeste studies beschrijven een toename aan herbivorie<sup>69,80,103</sup>, waarbij herbivorie dubbel zo hoog kan zijn in verlichte plaatsen in vergelijking met duisternis. Er zijn echter ook studies die lagere waarden<sup>66</sup> of geen significante effecten vinden<sup>104</sup>. Een onderzoek uit Nederland vond dat effecten afhangen van het lichtspectrum, met enkel verhoogde herbivorie bij groene en witte spectra, maar niet bij rood licht<sup>103</sup>. Verlichting kan ook effect hebben buiten het direct verlichte gebied. Zo was de herbivorie op Avondkoekoeksbloem (*Silene latifolia*) door de nachtvinderrupsen het hoogste op donkere delen enkele meters naast de verlichte delen<sup>106</sup>. Dit kan vermoedelijk verklaard worden doordat deze nachtvlinder enerzijds aangetrokken wordt tot licht, maar anderzijds wel een voorkeur heeft voor ei-afzet in duisternis.

Naast directe impact op herbivoren kan nachtelijk kunstlicht ook de **eigenschappen van de plant die de interactie met herbivoren beïnvloeden veranderen**, zoals de dikte van bladeren of de verhouding tussen koolstof en stikstof in plantweefsel<sup>66,357,358</sup>. Dergelijke effecten lijken wel erg soort- en contextsafhankelijk. In Nederland werd bv. gevonden dat het effect van verlichting afhangt van de plantensoort, de omgeving, en het type licht<sup>358</sup>.



Uit het literatuuronderzoek kwamen 6 studies die het effect van verlichting op **bestuiving** van planten door insecten onderzochten. Ook hier lijkt het effect context- en soortafhankelijk, met meestal verlaagde bestuiving<sup>106-109,359</sup> bij verlichting, maar ook neutrale effecten<sup>103</sup> en verhoogde bestuiving (vermoedelijk door aantrekking van bestuivers)<sup>360</sup>. Bijzonder interessant is de observatie dat verlichting ook dagactieve bestuivers kan beïnvloeden (met afhankelijk van de plantensoort zowel verhoogde als verlaagde bestuiving overdag bij planten die 's nachts verlicht worden<sup>106</sup>). Het effect van verlichting is niet alleen afhankelijk van de plantensoort, maar ook van de landschapscontext. Zo vond een studie op de nachtvlinder-bestoven Zuid-Amerikaanse plant *Erythrostemon gilliesii* dat het negatief effect van nachtelijk kunstlicht (type niet verder gespecificeerd) sterker is bij lage boombedekking<sup>359</sup>.



### 3.7.5 Effecten op Europees beschermde soorten

In Vlaanderen komen vier soorten voor die opgenomen zijn op de bijlage II staan van de Habitatrichtlijn, namelijk Kruidend moerasscherm (*Apium repens*), Geel schorpioenmos (*Drepanocladus vernicosus*), Drijvende waterweegbree (*Luronium natans*) en Groenknolorchis (*Liparis loeselii*). Doordat de meeste onderzoeken focussen op effecten op gemeenschapsniveau of effecten op modelsoorten is in de literatuur **geen enkele informatie te vinden over soort-specifieke effecten van nachtelijke verlichting op Europees beschermde soorten.**

### 3.7.6 Kennis rond mitigatie

Hoewel enkele studies effecten van nachtelijke verlichting op planten beschrijven, is de kennis rond mitigatie-mogelijkheden van deze effecten uiterst beperkt.

#### Type verlichting en kleurspectra

Lichtkleur kan een sterke impact hebben op planten, waarbij effecten van rood licht vaak groot zijn<sup>348</sup>. Overdag wordt rood licht opgenomen door planten. Rood licht (of meer specifiek, de verhouding rood licht ten opzichte van dieprood licht) is een signaal voor schaduw, en stimuleert deze om extra te groeien om uit de schaduw te komen. In tegenstelling tot vele andere soortgroepen kan rood licht dus een groot effect op planten hebben<sup>344</sup>, maar de richting van het effect hangt vaak af de omgeving en de plantensoort<sup>358</sup>. Het aanpassen van lichtkleur naar meer rood-licht is dus vermoedelijk niet een nuttige mitigatiemethode.

#### Lichten dimmen

In de literatuur worden reeds ecologisch relevante effecten waargenomen bij planten bij erg lage lichtintensiteit op groei (0.5 lux)<sup>104</sup> en bloei (<5 lux)<sup>348</sup>. Er is echter geen duidelijke drempelwaarde. Toch lijkt het beperken van lichtintensiteit een nuttige mitigatievorm.

#### Duur van verlichting beperken

Uit labstudies blijkt dat ook nachtelijk kunstlicht van korte duur licht (vanaf 5 minuten per nacht) fysiologische processen in gang kunnen zetten bij planten<sup>344</sup>, maar we vonden geen studies die het beperken van de duur van verlichting als mitigatie-vorm onderzochten.

## 4 SAMENVATTENDE HOOFDSTUKKEN

### 4.1 EFFECTEN VAN NACHTELIJKE VERLICHTING OP ECOSYSTEEMDIENSTEN

#### Kernpunten

- Weinig studies over effecten op ecosysteemdiensten
- Nachtelijke verlichting heeft negatieve effecten op bestuiving door insecten
- Nachtelijke verlichting kan de kans op ziekteoverdracht door muggen verhogen
- Nachtelijke verlichting heeft negatieve effecten op culturele ecosysteemdiensten

#### 4.1.1 Inleiding

De natuur levert de mens en de maatschappij tal van voordelen op, zoals de productie van voedsel en drinkwater, de bestuiving van gewassen of recreatiemogelijkheden. Dergelijke voordelen voor de maatschappij worden **ecosysteemdiensten of natuurvoordelen** genoemd<sup>361,362</sup>. Klassiek worden ecosysteemdiensten opgedeeld in drie grote groepen: (1) **producerende diensten**, zoals voedsel- of houtproductie, (2) **regulerende diensten**, zoals regulatie van klimaat, buffering van water of bestuiving van landbouwgewassen; en (3) **culturele diensten**, zoals recreatie en esthetische beleving. Deze laatste groep is vaak moeilijk te kwantificeren, maar daarom niet minder belangrijk voor mens en maatschappij.

Naast ecosysteemdiensten is er in de wetenschappelijke literatuur ook onderzoek te vinden over negatieve effecten van natuur op mens en maatschappij ("*ecosystem disservices*")<sup>363</sup>. Voorbeelden hiervan zijn het voorkomen van ziektes verwekt door insecten of allergieën door pollen.

De ruimtelijke schaal waarop een ecosysteemdienst geleverd wordt is erg variabel, zoals het populatieniveau voor bestuiving, ecosysteemniveau voor bossen, het landschapniveau voor overstromingen en drinkwaterproductie.

Hoewel niet alle soorten even belangrijk zijn, is biodiversiteit belangrijk voor het optimaliseren en stabiliseren van ecosysteemdiensten<sup>364</sup>. Bovendien stijgt het belang van biodiversiteit als meer diensten tegelijk geleverd moeten worden.





### 4.1.2 Literatuur onderzoek

De literatuurstudie leverde 27 studies op, waarvan 8 gevonden werden via een systematische zoektocht met kernwoorden en de overige studies via referenties, grijze literatuur en andere. In de geraadpleegde literatuur was een duidelijke geografische bias naar studies uit Noord-Amerika en Europa.

Een belangrijke opmerking is dat door de gebruikte zoektermen, studies over culturele ecosysteemdiensten ondergerepresenteerd zijn. Studies over hoe duisternis en nachtelijke verlichting effect hebben op gevoelens van esthetiek (bv. voor de sterrenhemel) of veiligheid worden vaak niet in de context geplaatst van ecosysteemdiensten, en zijn dus niet vindbaar met de gebruikte zoektermen. Het was echter buiten de scope van deze literatuurstudie om ook de culturele, sociale en psychologische wetenschappelijke literatuur over nachtelijk kunstlicht systematisch samen te vatten.



### 4.1.3 Effecten van nachtelijk kunstlicht op ecosysteemdiensten

#### Producerende ecosysteemdiensten

We vonden geen studies die effecten van nachtelijk kunstlicht op producerende ecosysteemdiensten beschrijven, maar er zijn mogelijk wel effecten. In land- en tuinbouw wordt verlichting vaak gebruikt om groei en bloei te stimuleren of regelen, maar dit is moeilijk te vergelijken met licht van straatverlichting of andere bronnen. Een aantal studies in meer natuurlijke situaties toont aan dat ook zo'n verlichting de groei en bloei van planten kan beïnvloeden, maar dat de richting en grootte van het effect soortspecifiek is <sup>101,344</sup>. Het is dus mogelijk dat er ook (negatieve of positieve) effecten zijn op economisch belangrijke plantensoorten, maar hierover vonden we geen informatie. Een review over lichtvervuiling suggereert dat Maïs minder goed groeit bij nachtelijk kunstlicht, maar kwantificeert dit niet <sup>346</sup>, en lijkt dus minder betrouwbaar.

Naast effecten op landbouw, wordt in een studie ook een effect op visvangst als mogelijkheid gesuggereerd <sup>365</sup>. Zoals besproken in het hoofdstuk over vissen, kan nachtelijk kunstlicht hun gedrag en activiteit veranderen, maar we vonden geen studies die het effect hiervan op visvangst onderzochten.

#### Regulerende ecosysteemdiensten

We vonden 12 studies die de effecten van nachtelijke verlichting op regulerende ecosysteemdiensten onderzochten, en vooral negatieve effecten vonden.

#### Bestuiving van planten

Uit het literatuuronderzoek kwamen 6 studies die het effect van verlichting op **bestuiving** van planten door insecten onderzochten. Ook hier lijkt het effect context- en soortafhankelijk, met meestal verlaagde bestuiving <sup>106-109</sup> bij verlichting, maar ook neutrale effecten <sup>103</sup> en verhoogde bestuiving (vermoedelijk door aantrekking van bestuivers) <sup>110</sup>. Hoe dan ook gaat het om een wijziging van de natuurlijke – duistere – referentiewaarde. Zoals ook vermeld in de hoofdstukken over insecten en planten kan verlichting ook dagactieve bestuivers beïnvloeden (met afhankelijk van de plantensoort zowel verhoogde als verlaagde bestuiving overdag bij planten die 's nachts verlicht worden <sup>106</sup>). Het is mogelijk dat er ook (negatieve of positieve) effecten zijn op economisch belangrijke plantensoorten, maar hierover vonden we geen informatie.



**Figuur 38: Nachtvinders zoals deze Gamma-uil (*Autographa gamma*) en andere nachtactieve insecten zijn belangrijke bestuivers. Nachtelijke verlichting kan bestuiving door insecten negatief beïnvloeden. Foto: Herman Blockx (Creative Common Licentie).**

#### Natuurlijke bestrijding van soorten die schade veroorzaken

In de soortgroepspecifieke hoofdstukken worden veel studies besproken die aantonen dat nachtelijk kunstlicht de interactie kan wijzigen tussen prooi-soorten en hun predatoren of parasieten. Dit is ook aangetoond bij soortgroepen die in de landbouw of bosbouw belangrijke schade kunnen veroorzaken, zoals herbivore insecten en knaagdieren, of soorten die juist gekend zijn als belangrijke natuurlijke bestrijders zoals insectivore geleedpotigen, vleermuizen en vogels. Het is dus waarschijnlijk dat nachtelijk kunstlicht de natuurlijke bestrijding van soorten die schade veroorzaken kan wijzigen, maar in welke richting de interactie wijzigt is ook niet eenvoudig te veralgemenen. Zo kan nachtelijk kunstlicht enerzijds nachtvinders weg lokken van landbouwgewassen en gewassen zo beschermen (al is daarvoor erg veel licht nodig zodat het meestal niet economisch haalbaar is<sup>24</sup>). Anderzijds kan het tegelijk nachtvlinder-etende vleermuizen afschrikken, en zo voor minder predatie zorgen, en dus minder bescherming van gewassen<sup>366</sup>. Het effect van nachtelijk kunstlicht op natuurlijke bestrijding hangt waarschijnlijk af van de prooi-soort, de predator of parasiet en de context, maar studies die dit kwantificeerden werden niet gevonden.

### Zaadverbreding

Veel plantensoorten hangen af van diersoorten zoals vogels, zoogdieren en insecten voor de verbreiding<sup>A4</sup> van hun zaden. Aangezien nachtelijk kunstlicht ruimtegebruik en foerageergedrag van deze diersoorten kan beïnvloeden, kan ook zaadverbreding als ecosysteemdienst beïnvloed worden. We vonden één studie die dit onderzocht. In Costa Rica werd aangetoond dat verlichting de zaadverbreding door een vruchtenetende vleermuissoort (*Carolina sowelli*) kan verminderen. De onderzoekers voerden een combinatie uit van een experiment en observationele waarnemingen, en toonden aan dat deze vleermuizen licht vermijden en dat daardoor zaadverbreding van peperplanten bij straatverlichting (natriumlampen, ca. 50 lux) met meer dan 20% verminderde<sup>367</sup>.

### Ziekteverspreiding door insecten

Ziekteverspreiding door dieren kan een belangrijk nadeel van natuur zijn ('ecosystem disservice'). **Muggen** zijn belangrijke vectoren voor ziekten zoals Malaria en West-Nijl virus, en worden sterk beïnvloed door nachtelijk kunstlicht. Een aantal studies, zowel bij dieren (Huisvossen en kippen) als bij mensen toont aan dat lichtvervuiling het risico op overdracht van zo'n ziektes door muggen kan vergroten<sup>368-370</sup>. De exacte oorzaak hiervan is niet duidelijk, en meerdere factoren spelen vermoedelijk een rol. Verlichting kan muggen aantrekken naar een bepaald gebied, maar kan ook hun activiteit veranderen. Een lage intensiteit aan nachtelijke verlichting (4 lux) kan voldoende zijn om een langere periode van het jaar actief zijn, of om dagactieve soorten ook 's nachts actief te laten zijn<sup>370,371</sup>, al zijn effecten sterk soort- en geslachtsspecifiek. Nachtelijke verlichting kan ook ervoor zorgen dat mensen meer 's nachts actief zijn, waardoor ze een hoger risico lopen op een muggenbeet. Tenslotte kan nachtelijke verlichting immuniteit verminderen bij dieren (en ook mensen, zie ook literatuurstudie gezondheid), waardoor een ziekte mogelijk meer kans heeft om zich te manifesteren<sup>370</sup>.

---

<sup>A4</sup> Onder verbreiding verstaan we de manier om van één locatie naar een andere te gaan. Bij planten zijn het stuifmeel, sporen of zaden die zich verplaatsen, al dan niet geholpen door dieren.

## Culturele ecosysteemdiensten

De **esthetische, culturele en spirituele waarde** van natuur zijn niet makkelijk te kwantificeren, en kunnen sterk afhangen van persoonlijke ervaringen, achtergronden en waardebeoordelingen. Zo kan een duistere nacht voor sommigen als positief ervaren worden, maar voor andere personen onveilig en negatief ervaren worden <sup>365</sup>. Over het algemeen wordt de sterrenhemel als positief ervaren, en kan het een gevoel geven van verwondering, eenheid met het universum en nietigheid <sup>372,373</sup>. In een groot deel van West-Europa is de nachtelijke verlichting echter zodanig overvloedig dat er amper sterren te zien zijn, en gaat de ervaring met heldere sterren in een duistere nacht verloren <sup>365</sup>. Bij natuurbescherming is de beleving van en herinnering aan dergelijke authentieke ervaringen belangrijk om natuurlijke fenomenen naar waarde te schatten. Daardoor zijn deze ook een belangrijke motivator om acties te ondernemen. Het verlies aan de beleving van een heldere sterrenhemel kan dus ook grote implicaties hebben voor het draagvlak om actie te ondernemen tegen lichtvervuiling <sup>374</sup>.

Duistere nachten en de bijhorende sterrenhemel, kunnen door hun esthetische waarde ook een belangrijke **recreatieve waarde** hebben <sup>372,375</sup>. Uit een enquête in Engeland blijkt 23% van de mensen interesse te hebben in sterren kijken als ontspanning of als activiteit op vakantie <sup>376</sup>. Duistere nachten kunnen het karakter van een streek in de verf zetten en kunnen **ook leiden tot extra toerisme** (en inkomsten daaruit) <sup>375</sup>. Een topvoorbeeld in Europa is het Canarische eiland La Palma, dat ingericht is als sterrenhemelreservaat (<https://www.visitlapalma.es/nl/astroturismo/>). Een studie uit Schotland vond dat elke 1 pond geïnvesteerd in duisternis, tot een extra 1,9 pond opbrengsten leidde door een toename in toerisme <sup>377</sup>.

De meeste van zo'n toeristische studies lijken echter minder toepasbaar op drukke en (half-) verstedelijkte regio's zoals Vlaanderen, maar ook hier lijkt potentie voor recreatie en toerisme rond duisternis uit te bouwen. Zo ontwikkelde de international dark sky association 'urban night sky places', donkere zones in verstedelijkte omgeving (zie o.a. <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/parks/> en <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/unsp/>).



**Figuur 39: de nachthemel kan een esthetische, culturele en spirituele waarde hebben. Foto: Yuting Gao (Creative Common Licentie).**

## 4.2 SYNTHESE VAN DE VERSCHILLENDE SOORTGROEPEN

### 4.2.1 Effecten op individuen, populaties, gemeenschappen en interacties tussen soorten

Voor alle groepen werden effecten op individuele soorten gevonden, met afhankelijk van de groep, vooral effecten op gedrag of fysiologie. Er werden slechts drie studies gevonden waar nachtelijke verlichting geen effect had. Dit wijst wellicht op een alomtegenwoordig en/of groot effect, maar kan mogelijk ook deels te maken hebben met 'publication bias', waarbij studies met significante resultaten sneller gepubliceerd worden in de wetenschappelijke literatuur dan studies die geen effect vinden.

Effecten op populaties en gemeenschappen en effecten op interacties tussen soorten zijn voor de meeste groepen veel beperkter onderzocht. Ondanks de relatief beperkte literatuur, lijkt het toch zeer waarschijnlijk dat nachtelijke verlichting ook grote effecten heeft op deze niveaus.



#### 4.2.2 Kwetsbare habitats en landschapseffecten

Er is relatief weinig kennis over de invloed van landschapscontext op het effect van nachtelijke verlichting op biodiversiteit. Enkel **bij vleermuizen** tonen studies aan dat effecten (zowel positief als negatief) vooral uitgesproken zijn buiten stedelijk gebied (bos, wetland en landbouwlandschap), en dat **in stedelijk gebied er minder effecten** (zowel positief als negatief) waar te nemen zijn. Het behoud van duisternis is dus voor deze soortgroep **vooral belangrijk in natuur- en buitengebied**.

Daarnaast is het opvallend dat soorten van **natte en aquatische biotopen** vaak kwetsbaar zijn voor nachtelijke verlichting, zoals bv. vissen (zie 3.6), amfibieën (zie 3.5), en aquatische insecten<sup>30</sup>. Het behouden en creëren van **donkere groen-blaauwe netwerken van beek- en riviervalleien** lijkt daarom volgens de huidige kennis aangewezen. Ook voor niet-aquatische soortgroepen zoals zoogdieren (inclusief vleermuizen) en vogels zijn dergelijke groen-blaauwe netwerken van enorm belang. Verlichte bruggen kunnen hier een barrière vormen, en vormen prioritaire punten om aan te pakken.



**Figuur 40:** donkere groen-blaauwe netwerken rond beek- en riviervalleien zijn enorm belangrijk om dieren toe te laten doorheen het landschap te bewegen. Verlichte bruggen kunnen hier een barrière vormen, en vormen prioritaire punten om aan te pakken. Foto: verlichte brug over de Dender, Robbert Schepers.

Hoewel behoud van duisternis in het buitengebied prioritair is, bv. in groen-blaue netwerken, kan ook in sommige gevallen het vermijden van verlichting in bebouwde omgeving belangrijk zijn, in het bijzonder op **plaatsen waar kolonies en vliegroutes van vleermuizen voorkomen**. Hier moeten zowel kolonies als verbindingen met het buitengebied donker gehouden worden. Bij gebouwen is het belangrijk om minimaal één zijde met invliegopening duister te houden. In Vlaanderen zijn verschillende voorbeelden bekend van kolonies die verlaten werden na het aanbrengen van verlichting (bv. Ingekorven vleermuis – Moelingen; Grijsz grotovleermuis – Weelde).



**Figuur 41: Naast donkere groen-blaue netwerken kan verlichting vermijden ook enorm belangrijk zijn op plaatsen waar kolonies en vliegroutes van vleermuizen voorkomen. Op sommige kerkzolders zijn kolonies verdwenen door het aanbrengen van monumentenverlichting, zoals bij een kolonie Ingekorven vleermuis (*Myotis emarginatus*) in Moelingen. Foto: René Janssen.**





### 4.2.3 Mogelijkheden voor mitigatie

#### Lichtintensiteit aanpassen

62 studies onderzochten of effecten afhingen van de intensiteit van het licht. **Over het algemeen blijkt: hoe feller de nachtelijke verlichting, hoe groter het negatieve effect.** Maar hierbij is het belangrijk om in het achterhoofd te houden dat:

- Voor de meeste soortgroepen (met uitzondering van sommige vleermuizen) is **geen 'drempelwaarde' gekend vanaf wanneer verlichting wel of geen effect heeft.**
- Verlichting met zeer lage intensiteit kan al grote effecten hebben. Zo worden voor verschillende groepen effecten gerapporteerd onder de 1 lux (bv. vleermuizen <sup>228</sup>, glimwormen <sup>57</sup>, vissen <sup>327</sup>).

#### Duur van verlichting aanpassen

11 studies onderzochten of de duur van verlichting beperken de effecten van nachtelijke verlichting kan mitigeren. Over het algemeen blijkt dat **alleen de duur van verlichting beperken niet voldoende is om negatieve effecten te vermijden, maar in combinatie met andere maatregelen dit wel een waardevol mitigatiemogelijkheid kan zijn.** Maar hierbij is het belangrijk om in het achterhoofd te houden dat:

- Voor vleermuizen is het ontbreken van nachtelijke verlichting vooral in de schemering en in de eerste uren na zonsondergang erg belangrijk <sup>230</sup>. Dit geldt vermoedelijk ook voor andere soortgroepen.
- Bepaalde soorten vleermuizen vermijden verlichting ook als die op bepaalde momenten uitstaat, vermoedelijk op basis van eerdere ervaringen <sup>228</sup>. Dit geldt mogelijk ook voor andere soortgroepen.

#### Lichtkleur aanpassen

68 studies onderzochten het effect van verschillende lichtkleuren. **Over het algemeen blijkt dat vooral verlichting met veel licht in het blauw spectrum grote negatieve effecten heeft.** Maar hierbij is het belangrijk om een aantal factoren in het achterhoofd te houden:

- Effecten van lichtkleur zijn vaak **soortspecifiek** zijn. Rood licht heeft net het grootste effect voor vissen <sup>329,340,341</sup> en planten <sup>344</sup>. Ook binnen groepen zijn effecten soort specifiek, zo trekt amberkleurige en rode verlichting minder insecten aan, maar worden specifieke insectengroepen zoals kniptorren net aangetrokken door dit type verlichting <sup>25</sup>.
- Effecten zijn **soms pas zichtbaar na een bepaalde tijd**. Bv. rood licht zorgde pas na enkele jaren voor een achteruitgang van nachtvlinders, en deze achteruitgang was even groot als in wit licht <sup>21</sup>. Dergelijke lange termijnstudies ontbreken grotendeels <sup>20</sup>, waardoor effecten van kleur mogelijk onderschat worden.



Voor **trekvoegels** wordt groen licht soms aangeraden in belangrijke gebieden (langs trekroutes, stop-over sites), maar dit blijkt niet ondersteund door de wetenschappelijke literatuur. Ook voor migrerende vogels lijken rode kleuren beter <sup>381</sup> .



## 5 <sup>173</sup>.AANBEVELINGEN VOOR BEHEER, BELEID EN VERDER ONDERZOEK

### 5.1 AANBEVELINGEN VOOR BEHEER EN BELEID

#### Kernpunt 1: behoud van duisternis is altijd te verkiezen

Nachtelijke verlichting heeft veel negatieve effecten, en doordat het **effect vaak soort-specifiek is**, heeft **elk type verlichting effect op bepaalde groepen**. Uit de wetenschappelijke literatuur blijkt dat er geen *'one-solution-fits-all'* is. Het enige eenvoudige alternatief om negatieve effecten tegen te gaan is de verlichting uit te schakelen.

#### Kernpunt 2: mitigatiemethodes combineren in verschillende hiërarchische stappen

Er zijn een aantal mitigatiemogelijkheden, al doen die niet alle negatieve effecten op biodiversiteit teniet. **Vaak is een gebiedsspecifieke aanpak** nodig, maar er zijn een **aantal algemene stappen te vermelden**. Hier vermelden we vier hiërarchische stappen van mitigerende maatregelen, waarbij elke volgende stap een aanvulling is op de vorige stappen. Het is niet de bedoeling uit deze stappen te kiezen, maar ze allemaal te doorlopen en te combineren. Hiervoor verwijzen we ook naar het Vademecum VWI: deel Natuurtechniek <sup>A5</sup>.

#### 1. Verlicht enkel waar nodig

- Behoud duisternis waar mogelijk en waar er geen gebruikers zijn of geen gevaarlijke situaties ontstaan op vlak van verkeersveiligheid.
  - Bekijk of alternatieven mogelijk zijn, zoals aanbrengen van fluorerende strips.
- Beperk strooilicht
  - Armaturen mogen geen licht naar boven toe verspreiden. Dit kan met behulp van afgekapte armaturen of spiegels die het licht precies richten waar het nodig is.
  - De verlichting wordt best zo laag mogelijk geplaatst. Door het beperken van de hoogte van de lichtmasten wordt de verlichte zone beperkt.
  - Bij weginrichting kan gekozen worden voor een donker wegdek, dat als voordeel heeft dat er minder licht naar de omgeving weerkaatst wordt (terwijl een licht gekleurd wegdek voordelen biedt op plaatsen zonder verlichting).
  - Bij verlichting van een weg omzoomd met bomen moeten de armaturen zodanig worden geplaatst dat zij het bovenste deel van de bomenrij niet verlichten.
  - Lichtverstrooiing naar kwetsbare biotopen zoals wateroppervlakken en waardevolle natuur (zie ook 4.2.2) moet zeker vermeden worden.

---

<sup>A5</sup> [https://wegenverkeer.be/sites/default/files/uploads/documenten/Vademecum%20UPM\\_new.pdf](https://wegenverkeer.be/sites/default/files/uploads/documenten/Vademecum%20UPM_new.pdf)

## 2. Verlicht enkel wanneer nodig

- Het uitschakelen van de verlichting op momenten dat ze niet nodig is, zorgt ervoor dat een deel van de nacht donkere verbindingen en dus verbindingen mogelijk blijven.
- Ofwel wordt gebruik gemaakt van **bewegingsdetectoren** die ervoor zorgen dat het licht enkel aangeschakeld wordt als er gebruikers passeren en de rest van de tijd volledig uitgeschakeld blijft. Het is eveneens van belang dat een te snelle verandering van de verlichtingssterkte voorkomen wordt aangezien dit schrikgedrag kan veroorzaken. Daarom is het belangrijk dat de lichtbronnen zo zijn ingesteld dat ze bij het inschakelen langzaam aangaan (geen ‘flits’) en bij uitschakelen zachtjes doven (fade in en fade out time).
  - Bij nieuwe verlichtingssystemen kan dit aangepast worden zodat de lichtintensiteit 2% per seconde zal toenemen of afnemen (fade in/fade out).
- Ofwel wordt het licht **tijds gestuurd**. Dit is eenvoudiger te implementeren, en is minder gevoelig voor fouten dan bewegingsdetectoren.
  - 100% - zonsondergang tot 20u - tijdens de spits
  - 50% - 20u tot 23u
  - 0% - 23u tot 5u
  - 50% - 5u tot 6.30u
  - 100% - 6.30 tot zonsopgang - tijdens de spits

## 3. Beperk de intensiteit van nachtelijke verlichting

- Verlicht met de laagst haalbare lichtintensiteit. Drempelwaardes zijn voor veel soorten ongekend, maar worden voor vlermuizen op 1 lux gelegd (zie ook 4.2.3).

## 4. Gebruik een aangepast kleurenspectrum

- Een aantal studies wijzen erop dat rode (en eventueel amber) kleuren van nachtelijk kunstlicht minder effecten hebben op vlermuizen, maar andere studies tonen aan dat er nog steeds effecten zijn (zie ook 4.2.3). Daarom moet een aangepast kleurenspectrum als een laatste stap gezien worden.
- Bij gebruik van een aangepast kleurenspectrum worden korte golflengten (UV, violet en blauw licht) vermeden. Licht dat golflengten bevat kleiner dan 540 nm of licht met een kleurtemperatuur groter dan 2700 K moet zeker vermeden worden. Specifiek: minimum 90% van de lichtstraling moet boven 590 nm liggen, maximaal 2,5% tussen 505 nm en 589 nm en maximaal 1% tussen 380 nm en 504 nm.
  - Belangrijk is om erop te letten dat **smalbandige Led-verlichting** gebruikt wordt, en niet gekozen wordt voor andere kleuren door fosforcoating. Dit laatste type wordt soms door verkopers als ecologisch aangeduid, maar kan weldegelijk nog veel blauw licht bevatten.



## 5.2 ONDERZOEKSNODEN

### 5.2.1 Belangrijke open vragen

Hoewel er relatief veel kennis is verzameld in deze literatuurstudie blijven er veel vragen over de impact van nachtelijk kunstlicht op biodiversiteit niet of weinig bestudeerd. Het is uitgebreid beschreven dat nachtelijk kunstlicht grote negatieve effecten heeft op biodiversiteit, en hoewel verder fundamenteel ecologisch onderzoek nodig blijft, is voor beleid en beheer in **de eerste plaats meer data nodig over mogelijkheden voor mitigatie**. zeker in de Vlaamse context, dat een dicht wegennet en veel gefragmenteerde natuur heeft, blijven een aantal belangrijke vragen rond mitigatie onbeantwoord. Daarbovenop ontstaan er ook altijd nieuwe vragen vanuit burgerbewegingen en beleidsmakers, die gedegen wetenschappelijke onderbouwde antwoorden nodig hebben. Hieronder lichten we enkele van de vele onderzoeksnoden toe.

#### Onderzoek naar meten van nachtelijke verlichting

Ondanks de uitgebreide literatuur rond effecten van nachtelijk kunstlicht, is er nog geen eenduidige en herhaalbare manier voor het meten van lichtvervuiling<sup>378</sup>. Vaak worden hiervoor remote-sensing-technieken gebruikt, vooral satellietbeelden, maar deze methodes hebben enkele belangrijke nadelen zoals (1) weinig gedetailleerde info (grote spatiale resolutie), (2) ruis door de sensitiviteit van de camera's en de veranderende verlichtingstechnieken (LED) en (3) een beeld van opgaand licht en daardoor niet van lichtvervuiling vanuit het standpunt van de leefomgeving (fauna en flora). Onderzoek naar een herhaalbare methode die een ecologisch relevante maat heeft en die toelaat om ingrepen te monitoren, is dan ook nodig<sup>379</sup>.

#### Onderzoek naar grenswaardes van verlichting

Uit onze literatuurstudie blijkt dat de meeste gedocumenteerde effecten van nachtelijke verlichting op soorten een **reactie op enkelvoudige blootstellingsniveaus** zijn (zie ook 4.2.3). Deze studies zijn uiterst waardevol om de aandacht te vestigen op de enorme schaal waarop nachtelijk kunstlicht effecten heeft op individuele soorten, maar in werkelijkheid is lichtintensiteit veel variabelere. Slechts voor enkele soortgroepen, zoals vleermuizen, zijn studies gevonden die grenswaardes van lichtintensiteit en lichtkleur onderzochten (in het geval van vleermuizen, vanaf 1 lux en < 540 nm; zie ook 3.3.6). Inzicht in dergelijke grenswaardes die biologische reacties veroorzaken is dan ook nodig voor meer soorten<sup>379</sup>. Dit zou zeker een aandachtspunt moeten zijn voor huidige en toekomstige studies naar beleidsrelevante soorten.

#### Onderzoek naar effecten van 'skyglow'

Naast effecten van directe verlichting, vormt 'skyglow', een verhoogde helderheid van de nachthemel ten gevolge artificiële verlichting in de ruime omgeving, ook een belangrijke vorm van lichtvervuiling. Effecten van skyglow zijn gevonden voor diverse groepen<sup>327,327</sup>, maar zijn moeilijker te onderzoeken. Meer data is nodig om hier meer inzicht in te krijgen.



## Onderzoek naar effecten van licht in combinatie met andere factoren

Nachtelijk kunstlicht komt vaak voor op locaties die sterk door de mens beïnvloed zijn, en waar ook andere factoren van verstoring aanwezig kunnen zijn, zoals **geluidsvervuiling of vervuilende stoffen**. Het is niet gekend of en hoe verschillende types vervuiling elkaar beïnvloeden, maar cumulatieve effecten zijn mogelijk <sup>380</sup>. Onderzoek waarbij effecten van nachtelijk kunstlicht en geluid samen in een realistische setting bekeken worden, is dan ook nodig om hier uitspraken over te kunnen doen.

## Onderzoek naar het effect van licht op beleidsrelevante soorten

In deze literatuurstudie werden negatieve effecten van verlichting op een groot aantal soorten gevonden, maar voor véél meer soorten is geen kennis beschikbaar. Onderzoek naar effecten op Natura2000-soorten of andere soorten die prioritair zijn in het Vlaamse natuurbeleid lijkt dan ook prioritair. Dit kan ook gebeuren aan de hand van experimenten in labo-omstandigheden, zeker voor soorten die bv. in kweekprogramma's aanwezig zijn.

## Onderzoek naar het effect van het uitwerken of herstellen van duistere netwerken

Op een aantal plaatsen in Vlaanderen wordt werk gemaakt van het herstel van duistere netwerken, waarbij verlichting op prioritaire plekken verwijderd of gedimd wordt. Dit gebeurt momenteel op basis van een combinatie van kaartmateriaal (zie bv. duisternisbehoefte kaart Provincie Antwerpen<sup>A6</sup>) en '*expert judgement*', aangezien verspreidingsdata van kwetsbare soorten beperkt beschikbaar is. Deze eerder pragmatische aanpak lijkt erg nuttig, maar zou best gecombineerd worden met onderzoek, om te kwantificeren of de bedoelde positieve effecten op biodiversiteit er ook zijn. Hierbij zouden nulmetingen, zowel op vlak van biodiversiteit als op vlak van verlichting, gecombineerd kunnen worden met metingen na de ingrepen. De resultaten van een dergelijk onderzoek zouden zeer interessant zijn om te bepalen in hoeverre een dergelijke aanpak zinvol is, en of zo'n pragmatische aanpak breder uitgerold kan worden.

## Onderzoek naar het voorkomen van lichtgevoelige vleermuizen en andere beleidsrelevante soorten

Het is gekend dat vleermuizen enorm kwetsbaar zijn voor licht, maar aangezien de **(zomer)verblijfplaatsen of vliegroutes van veel soorten niet goed gekend zijn**, kan ondoordachte inplanting van verlichting hier problemen opleveren. Zo verdwenen afgelopen jaren in Vlaanderen verschillende kolonies na het aanbrengen van (monumenten)verlichting (bv. Ingekorven vleermuis – Moelingen; Grijszandvleermuis – Weelde). Het beter in kaart brengen van verblijfplaatsen en vliegroutes, is daarom aangewezen. Voor enkele provincies is relatief veel data over verblijfplaatsen in kerken en monumenten beschikbaar, maar niet samengebracht op één plaats, en dus niet makkelijk te raadplegen. Data in verband met vliegroutes is amper beschikbaar, maar zeker ook relevant. Voor deze laatste optie is een combinatie van veldonderzoek en connectiviteitsmodellering aangewezen.

---

<sup>A6</sup> Duisternisbehoeftekaart Provincie Antwerpen:

<https://provincieantwerpen.maps.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?webmap=335489796d284678bc167e88c7d9a687>



Naast vleermuizen zijn er ook een aantal andere habitattypische en Europese en Vlaamse prioritaire diersoorten waar meer gedetailleerde verspreidingsdata nodig is. Maar in tegenstelling tot vleermuizen zijn voor veel van deze soorten kaarten van het potentiële leefgebied beschikbaar.

### **Uitgebreidere veld-testen van alternatieve (fietspad)-verlichtingen.**

Soms worden nu bij fietsverbindingen of andere locaties waar stakeholders absoluut verlichting vragen alternatieve lampen voorgesteld zoals “glowstuds” of lichtgevende strepen. Dergelijke verlichting geeft erg weinig licht, en bestaat in verschillende lichtkleuren. Zo’n verlichting schijnt echter naar boven, wat negatief is voor vliegende dieren, en de lichtintensiteit kan voldoende zijn om op sommige soortengroepen een mogelijk negatief effect te hebben (bv. glimwormen). Onderzoek naar de effecten van zo’n verlichting op biodiversiteit ontbreekt echter. In een recent arrest vernietigde de raad van vergunningsbetwistingen dan ook een vergunning voor dergelijke verlichting aan te brengen op een fietspad in een natuurgebied Lokeren<sup>A7</sup>. Recent vond er wel een onderzoek plaats naar dit type verlichting in de provincie Oost-Vlaanderen<sup>381</sup>, maar door de beperkte taxonomische scope (enkel jachtgedrag van vleermuizen onderzocht) en opzet (de studie werd uitgeschreven nadat de lampen geplaatst werden zodat er geen data voor de ingreep kon verzameld worden) kan op basis van deze studie geen eenduidige conclusie genomen worden. Er is dan ook nood aan uitgebreidere studies die effecten op biodiversiteit van dergelijke verlichting experimenteel onderzoeken, zodat ingeschat kan worden of en hoe dergelijk lichtsystemen ingezet kunnen worden.



**Figuur 42: actieve wegmarkering via 'glowstuds' in een fietspad. Foto: mobiliteitsplatform.nl**

---

<sup>A7</sup> zie arrest RvVb-A-2122-1097



## Onderzoek naar de sociale context en (on)veiligheidsgevoel door duisternis en verlichting

Nachtelijke verlichting verminderen leidt vaak tot een verminderd gevoel van veiligheid, zeker bij vrouwen en LGBTQI+-personen, ook al blijkt uit onderzoek dat criminaliteit niet toeneemt (samengevat in een eerdere literatuurstudie <sup>3</sup>). Echter, het communiceren van wetenschappelijk onderzoek naar ongeruste burgers of (lokale) beleidmakers zorgt niet makkelijk voor een beter gevoel van veiligheid, en kan soms leiden tot gevoelens van onbegrip of ontkenning van veiligheidsproblemen vanuit het beleid. Het aanpakken van het gevoel van (on)veiligheid is moeilijk, en vormt momenteel één van de grotere drempels om lichtvervuiling te verminderen. Aanbevelingen en onderzoek vanuit sociale wetenschappen, waarbij niet enkel communicatie maar ook weginrichting bekeken wordt, zou in deze context dan ook een toekomstige prioriteit moeten zijn.





## 5.2.2 Aangewezen methodiek

### Studieopzet

Om degelijke en duidelijke conclusies te trekken uit toekomstig (veldbiologisch) onderzoek is de methodiek belangrijk. Er zijn verschillende **studieopzetten** mogelijk. De meest krachtige opzet, maar ook de meest complexe, is een zogenaamde '**Before-After Control-Impact**' (**BACI**) **opzet**. Hierbij worden een aantal sites geselecteerd voordat de impact uitgevoerd wordt, en worden metingen uitgevoerd op zowel de controle sites als op de sites waar de impact zal komen. Vervolgens, na de impact, worden opnieuw metingen uitgevoerd op beide groepen sites. Metingen voor en na de impact vinden steeds tegelijk plaats om mogelijke effecten van zo veel mogelijk andere variabelen (bv. weer) te kunnen vermijden. Verschillen tussen de controle sites en de impact sites na de impact worden vergeleken met de 'normale' verschillen tussen de controle sites en de impact-sites voor de impact <sup>382</sup>.

Een BACI opzet is echter niet in elke situatie mogelijk, bv. als de impact reeds gebeurd is, en dan is een **Controle-Impact opzet** aangewezen. Hierbij worden metingen in meerdere controle sites vergeleken met gelijktijdige metingen bij meerdere impact sites. Hoewel een BACI opzet volgens simulaties tot 4 keer krachtiger kan zijn/is om verschillen correct in te schatten <sup>383</sup>, kan ook een controle-Impact opzet toe laten om verschillen correct in te schatten als een BACI opzet praktisch niet haalbaar is.

Bij beide studieopzetten is het belangrijk om **goede controle-sites** te selecteren. Dergelijke sites zijn vergelijkbaar op vlak van vegetatie en landschapscontext.

Andere opzetten waarbij controle-sites ontbreken (zoals metingen enkel na de impact, of metingen voor en na de impact) zijn niet aangewezen. Het is bij zo'n opzet nooit hard te maken dat de bekomen resultaten ook toe te schrijven zijn aan de impact (in dit geval verlichting).

Ook de **steekproefgrootte** is van belang. Om statistisch te kunnen testen of resultaten afwijken van toeval zijn **minimaal drie sites per groep** nodig (dus drie controle sites en drie impactsites). Deze sites moeten **onafhankelijk** van elkaar zijn. Meer sites laten toe om ook zwakkere effecten te kunnen waarnemen.

### Te meten variabelen

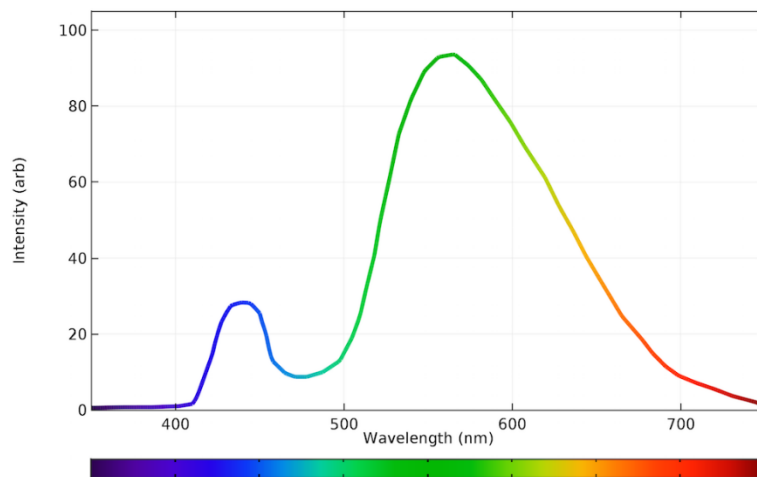
Concreet is het belangrijk niet te focussen op één groep, maar **meerdere taxonomische groepen** te bekijken. Gezien hun lichtgevoeligheid en hoge bescherming wordt vaak gefocust op **vleermuizen**. Aandacht voor deze groep blijft zeker relevant. Het is wel belangrijk om meerdere facetten van het vleermuizenbiotoop te onderzoeken, want soorten die lichttolerant (of zelfs licht-opportunistisch) zijn tijdens het jagen, kunnen toch verstoort worden door licht op vliegroutes (zie ook 3.3.3). Enkel jachtgedrag onderzoeken kan dus een onderschatting van mogelijke effecten geven. Jachtgedrag kan best gemonitord worden via automatische batdetectors, terwijl vliegroutes best onderzocht worden via een combinatie van handmatige batdetectors en warmtebeeldcamera's.

Gezien hun diversiteit en belang voor andere soortgroepen (als voedsel of via bestuiving) lijken **insecten en overige geleedpotigen**, naast vleermuizen, de belangrijkste groep om standaard te onderzoeken. Dit kan best gebeuren met een combinatie van passieve valtypes (lichtvallen zijn



logischerwijs niet aangewezen), zoals bodemvallen (voor bodembewonende soorten), sleepnetvangsten (voor vegetatie-bewonende soorten) en venster- of plakvallen (voor vliegende soorten). Transect-tellingen kunnen ingezet worden voor glimwormen.

Naast biologische gegevens is het ook erg belangrijk om duidelijk de aspecten van **verlichting zelf te meten** en te **rapporteren**. Er zijn verschillende maten voor licht (zie ook 1.4) en in de wetenschappelijke literatuur is nog veel discussie over de beste maat <sup>378,379,384</sup>. Het meest aangewezen lijkt om twee maten te rapporteren, namelijk **verlichtingssterkte in lux** (aangezien dat ook de eenheid is die lichtontwikkelaars en beleidsmakers het meest gebruiken) en **lichtkleur door middel van een spectraal profiel**, waarbij de golflengtes op de x-as en de relatieve intensiteit op de y-as getoond worden. Maar het blijft belangrijk te onthouden dat deze maten eerder op menselijk oog gericht zijn (zeker lux), en dus niet perfect zijn. Kleurtemperatuur wordt vaak gebruikt door lichtontwikkelaars, maar is, zeker in onderzoek, niet voldoende als maat.



**Figuur 43: voorbeeld van een spectraal profiel voor een LED lamp.**

## 6 BIJLAGE

De ruwe data van deze literatuurstudie is beschikbaar op <https://doi.org/10.5281/zenodo.8223895>.



## 7 REFERENTIES

1. Falchi, F. et al. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2, e1600377 (2016).
2. Sánchez de Miguel, A., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S. & Gaston, K. J. Environmental risks from artificial nighttime lighting widespread and increasing across Europe. *Science Advances* 8, eabl6891 (2022).
3. Struyf, P., Enhus, E., Bauwens, T. & Melgaço, L. Literature Study: The effects of reduced public lighting on crime, fear of crime, and road safety. (2019).
4. Falcón, J. et al. Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems. *Front. Neurosci.* 14, 602796 (2020).
5. Voigt, C. et al. Guidelines for consideration of bats in lighting projects. (2018).
6. Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W. & Hopkins, J. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biol. Rev.* 88, 912–927 (2013).
7. Rich, C. & Longcore, T. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. (Island Press, 2006).
8. Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E. & Tockner, K. Light Pollution as a Biodiversity Threat. *Trends in ecology & evolution* 25, 681–2 (2010).
9. Wagner, D. L. Insect Declines in the Anthropocene. *Annual Review of Entomology* 65, 457–480 (2020).
10. Owens, A. C. S. et al. Light pollution is a driver of insect declines. *Biol. Conserv.* 241, 108259 (2020).
11. Grubisic, M., van Grunsven, R. H. A., Kyba, C. C. M., Manfrin, A. & Hoelker, F. Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Ann. Appl. Biol.* 173, 180–189 (2018).
12. van Langevelde, F. et al. Declines in moth populations stress the need for conserving dark nights. *Global Change Biology* 24, 925–932 (2018).
13. Wilson, J. F. et al. A role for artificial night-time lighting in long-term changes in populations of 100 widespread macro-moths in UK and Ireland: a citizen-science study. *J Insect Conserv* 22, 189–196 (2018).
14. Honkanen, A., Immonen, E.-V., Salmela, I., Heimonen, K. & Weckström, M. Insect photoreceptor adaptations to night vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 372, 20160077 (2017).
15. Warrant, E. J. The remarkable visual capacities of nocturnal insects: vision at the limits with small eyes and tiny brains. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 372, 20160063 (2017).
16. Briscoe, A. D. & Chittka, L. The Evolution of Color Vision in Insects. *Annual Review of Entomology* 46, 471–510 (2001).
17. Chen, P.-J., Awata, H., Matsushita, A., Yang, E.-C. & Arikawa, K. Extreme Spectral Richness in the Eye of the Common Bluebottle Butterfly, *Graphium sarpedon*. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4, (2016).
18. Saunders, D. S. Insect photoperiodism: seeing the light. *Physiological Entomology* 37, 207–218 (2012).
19. Warrant, E. & Dacke, M. Vision and Visual Navigation in Nocturnal Insects. in *Annual Review of Entomology*, Vol 56 (eds. Berenbaum, M. R., Carde, R. T. & Robinson, G. E.) vol. 56 239–254 (Annual Reviews, 2011).

////////////////////////////////////



40. Reisenman, C. E., Lazzari, C. R. & Giurfa, M. Circadian control of photonegative sensitivity in the haematophagous bug *Triatoma infestans*. *J Comp Physiol A* 183, 533–541 (1998).
41. Kim, K.-N., Huang, Q.-Y. & Lei, C.-L. Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. *Pest Management Science* 75, 3135–3143 (2019).
42. Shimoda, M. & Honda, K. Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl Entomol Zool* 48, 413–421 (2013).
43. Davies, T. W. et al. Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages. *Glob. Change Biol.* 23, 2641–2648 (2017).
44. Degen, J. et al. Streetlights affect moth orientation beyond flight-to-light behaviour. 2022.10.06.511092 Preprint at <https://doi.org/10.1101/2022.10.06.511092> (2022).
45. Manfrin, A. et al. Artificial Light at Night Affects Organism Flux across Ecosystem Boundaries and Drives Community Structure in the Recipient Ecosystem. *Front. Environ. Sci.* 5, 61 (2017).
46. van Grunsven, R. H. A., Jaehnichen, D., Grubisic, M. & Hoelker, F. Slugs (*Arionidae*) benefit from nocturnal artificial illumination. *J. Exp. Zool. Part A-Ecol. Integr. Physiol.* 329, 429–433 (2018).
47. Bauer, R. Untersuchung zur Anlockung von nachtaktiven Insekten durch Beleuchtungseinrichtungen. (Verlag nicht ermittelbar, 1993).
48. Hori, M., Shibuya, K., Sato, M. & Saito, Y. Lethal effects of short-wavelength visible light on insects. *Sci Rep* 4, 7383 (2014).
49. Durrant, J. et al. Constant illumination reduces circulating melatonin and impairs immune function in the cricket *Teleogryllus commodus*. *PeerJ* 3, e1075 (2015).
50. Honnen, A.-C., Kypke, J. L., Hölker, F. & Monaghan, M. T. Artificial Light at Night Influences Clock-Gene Expression, Activity, and Fecundity in the Mosquito *Culex pipiens f. molestus*. *Sustainability* 11, 6220 (2019).
51. Jones, T. M., Durrant, J., Michaelides, E. B. & Green, M. P. Melatonin: a possible link between the presence of artificial light at night and reductions in biological fitness. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370, 20140122 (2015).
52. van Geffen, K. G. et al. Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity* 8, 282–287 (2015).
53. Li, X. et al. The Effect of Photoperiods and Light Intensity on Mating Behavior and Reproduction of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology* 48, 1035–1041 (2019).
54. Bird, S. & Parker, J. Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females. *J Insect Conserv* 18, 737–743 (2014).
55. Firebaugh, A. & Haynes, K. J. Experimental tests of light-pollution impacts on nocturnal insect courtship and dispersal. *Oecologia* 182, 1203–1211 (2016).
56. Van den Broeck, M., De Cock, R., Van Dongen, S. & Matthysen, E. Blinded by the Light: Artificial Light Lowers Mate Attraction Success in Female Glow-Worms (*Lampyrus noctiluca* L.). *Insects* 12, 734 (2021).
57. van den Broeck, M., De Cock, R., Van Dongen, S. & Matthysen, E. White LED light intensity, but not colour temperature, interferes with mate-finding by glow-worm (*Lampyrus noctiluca* L.) males. *J. Insect Conserv.* 25, 339–347 (2021).
58. Elgert, C., Hopkins, J., Kaitala, A. & Candolin, U. Reproduction under light pollution: maladaptive response to spatial variation in artificial light in a glow-worm. *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci.* 287, 20200806 (2020).



59. Van Geffen, K. G. et al. Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth: Moth sex pheromone in illuminated nights. *Ecol Entomol* 40, 401–408 (2015).
60. McLay, L. K., Nagarajan-Radha, V., Green, M. P. & Jones, T. M. Dim artificial light at night affects mating, reproductive output, and reactive oxygen species in *Drosophila melanogaster*. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol* 329, 419–428 (2018).
61. McLay, L. K., Green, M. P. & Jones, T. M. Chronic exposure to dim artificial light at night decreases fecundity and adult survival in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Insect Physiology* 100, 15–20 (2017).
62. Sambaraju, K. R. & Phillips, T. W. Responses of Adult *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) to Light and Combinations of Attractants and Light. *J Insect Behav* 21, 422–439 (2008).
63. Pathak, S. Effects of different photoperiods and wavelengths of light on the life-history traits of an aphidophagous ladybird, *Coelophora saucia* (Mulsant). *Journal of Applied Entomology* 130, 45–50 (2006).
64. Wang, S., Tan, X., Michaud, J. P., Zhang, F. & Guo, X. Light intensity and wavelength influence development, reproduction and locomotor activity in the predatory flower bug *Orius sauteri* (Poppius) (Hemiptera: Anthracoridae). *BioControl* 58, (2013).
65. Durrant, J., Botha, L. M., Green, M. P. & Jones, T. M. Artificial light at night prolongs juvenile development time in the black field cricket, *Teleogryllus commodus*. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution* 330, 225–233 (2018).
66. Grenis, K. & Murphy, S. M. Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. *Insect Sci.* 26, 770–776 (2019).
67. van Geffen, K. G., van Grunsven, R. H. A., van Ruijven, J., Berendse, F. & Veenendaal, E. M. Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution* 4, 2082–2089 (2014).
68. Sanders, D. et al. Artificial nighttime light changes aphid-parasitoid population dynamics. *Sci Rep* 5, 15232 (2015).
69. Schroer, S., Häffner, E. & Hölker, F. Impact of artificial illumination on the development of a leafmining moth in urban trees |. *International Journal of Sustainable Lighting* (2020) doi:10.26607/ijsl.v21i1.86.
70. Grubisic, M. & Grunsven, R. H. A. van. Artificial light at night disrupts species interactions and changes insect communities. *Curr. Opin. Insect Sci.* 47, 136–141 (2021).
71. Conrad, K. F., Warren, M. S., Fox, R., Parsons, M. S. & Woiwod, I. P. Rapid declines of common, widespread British moths provide evidence of an insect biodiversity crisis. *Biological Conservation* 132, 279–291 (2006).
72. Boyes, D. H., Evans, D. M., Fox, R., Parsons, M. S. & Pocock, M. J. O. Street lighting has detrimental impacts on local insect populations. *Sci. Adv.* 7, eabi8322 (2021).
73. Altermatt, F. & Ebert, D. Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biol. Lett.* 12, 20160111 (2016).
74. Czaczkes, T. J., Bastidas-Urrutia, A. M., Ghislandi, P. & Tuni, C. Reduced light avoidance in spiders from populations in light-polluted urban environments. *Sci. Nat.* 105, 64 (2018).
75. Davies, T. W., Bennie, J. & Gaston, K. J. Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biol. Lett.* 8, 764–767 (2012).
76. Eccard, J. A., Scheffler, I., Franke, S. & Hoffmann, J. Off-grid: solar powered LED illumination impacts epigeal arthropods. *Insect. Conserv. Divers.* 11, 600–607 (2018).
77. Manfrin, A. et al. Dietary changes in predators and scavengers in a nocturnally illuminated riparian ecosystem. *Oikos* 127, 960–969 (2018).

////////////////////////////////////

78. Meyer, L. A. & Sullivan, S. M. P. Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream–riparian invertebrate fluxes. *Ecological Applications* 23, 1322–1330 (2013).
79. Firebaugh, A. & Haynes, K. J. Multi-year experiment shows no impact of artificial light at night on arthropod trophic structure or abundance. *Ecosphere* 11, e03227 (2020).
80. McMunn, M. S. et al. Artificial Light Increases Local Predator Abundance, Predation Rates, and Herbivory. *Environ. Entomol.* 48, 1331–1339 (2019).
81. Sanders, D., Kehoe, R., Cruse, D., van Veen, F. J. F. & Gaston, K. J. Low Levels of Artificial Light at Night Strengthen Top-Down Control in Insect Food Web. *Current Biology* 28, 2474-2478.e3 (2018).
82. Dwyer, R. G., Bearhop, S., Campbell, H. A. & Bryant, D. M. Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. *J. Anim. Ecol.* 82, 478–485 (2013).
83. Rydell, J. Bats and their insect prey at streetlights. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* 43–60 (2006).
84. Yoon, T. J., Kim, D. G., Kim, S. Y., Jo, S. I. & Bae, Y. J. Light-attraction flight of the giant water bug, *Lethocerus deyrolli* (Hemiptera: Belostomatidae), an endangered wetland insect in East Asia. *Aquatic Insects* 32, 195–203 (2010).
85. Zozaya, S. M., Alford, R. A. & Schwarzkopf, L. Invasive house geckos are more willing to use artificial lights than are native geckos. *Austral Ecology* 40, 982–987 (2015).
86. Cravens, Z. M., Brown, V. A., Divoll, T. J. & Boyles, J. G. Illuminating prey selection in an insectivorous bat community exposed to artificial light at night. *Journal of Applied Ecology* 55, 705–713 (2018).
87. Heiling, A. M. Why do nocturnal orb-web spiders (Araneidae) search for light? *Behav Ecol Sociobiol* 46, 43–49 (1999).
88. Gomes, D. G. E. Orb-weaving spiders are fewer but larger and catch more prey in lit bridge panels from a natural artificial light experiment. *PeerJ* 8, e8808 (2020).
89. Yuen, S. W. & Bonebrake, T. C. Artificial night light alters nocturnal prey interception outcomes for morphologically variable spiders. *PeerJ* 5, e4070 (2017).
90. Frank, K. Exploitation of artificial light at night by a jumping spider. *Peckhamia* 78, (2009).
91. Warren, A. D. Predation of five species of Noctuidae at ultraviolet light by the western yellowjacket (Hymenoptera: Vespidae). *Journal of the Lepidopterists’ Society* 44, (1990).
92. Bailey, L. A., Brigham, R. M., Bohn, S. J., Boyles, J. G. & Smit, B. An experimental test of the allotonic frequency hypothesis to isolate the effects of light pollution on bat prey selection. *Oecologia* 190, 367–374 (2019).
93. Huegel, T. & Goerlitz, H. R. Light might suppress both types of sound-evoked antipredator flight in moths. *Ecol. Evol.* 10, 13134–13142 (2020).
94. Minnaar, C., Boyles, J. G., Minnaar, I. A., Sole, C. L. & McKechnie, A. E. Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator–prey arms race. *Journal of Applied Ecology* 52, 522–531 (2015).
95. Wakefield, A., Stone, E. L., Jones, G. & Harris, S. Light-emitting diode street lights reduce last-ditch evasive manoeuvres by moths to bat echolocation calls. *Royal Society Open Science* 2, 150291 (2015).
96. Collins, C. T. & Watson, A. Field Observations of Bird Predation on Neotropical Moths. *Biotropica* 15, 53–60 (1983).
97. Stone, E., Harris, S. & Jones, G. Impacts of artificial lighting on bats: A review of challenges and solutions. *Mammalian Biology - Zeitschrift für Säugetierkunde* 80, (2015).





98. Grenis, K., Tjossem, B. & Murphy, S. M. Predation of larval Lepidoptera in habitat fragments varies spatially and temporally but is not affected by light pollution. *J Insect Conserv* 19, 559–566 (2015).
99. Cochard, P., Galstian, T. & Cloutier, C. The proportion of blue light affects parasitoid wasp behavior in LED-extended photoperiod in greenhouses: Increased parasitism and offspring sex ratio bias. *Biological Control* 133, 9–17 (2019).
100. Cochard, P., Galstian, T. & Cloutier, C. Light Environments Differently Affect Parasitoid Wasps and their Hosts’ Locomotor Activity. *J Insect Behav* 30, 595–611 (2017).
101. Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., Inger, R. & Gaston, K. J. Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.* 370, 20140131 (2015).
102. Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., Inger, R. & Gaston, K. J. Artificial light at night causes top-down and bottom-up trophic effects on invertebrate populations. *Journal of Applied Ecology* 55, 2698–2706 (2018).
103. Boom, M. P., Spoelstra, K., Biere, A., Knop, E. & Visser, M. E. Pollination and fruit infestation under artificial light at night: light colour matters. *Sci Rep* 10, 18389 (2020).
104. Crump, M. C. et al. Effects of Low-Level Artificial Light at Night on Kentucky Bluegrass and an Introduced Herbivore. *Front. Ecol. Evol.* 9, 732959 (2021).
105. Giavi, S., Blosch, S., Schuster, G. & Knop, E. Artificial light at night can modify ecosystem functioning beyond the lit area. *Sci Rep* 10, (2020).
106. Giavi, S., Fontaine, C. & Knop, E. Impact of artificial light at night on diurnal plant-pollinator interactions. *Nat. Commun.* 12, 1690 (2021).
107. Knop, E. et al. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature* 548, 206–+ (2017).
108. Macgregor, C. J., Pocock, M. J. O., Fox, R. & Evans, D. M. Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant. *Ecosphere* 10, e02550 (2019).
109. Macgregor, C. J., Evans, D. M., Fox, R. & Pocock, M. J. O. The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Global Change Biology* 23, 697–707 (2017).
110. Wilson, A. A. et al. Direct and Ambient Light Pollution Alters Recruitment for a Diurnal Plant-Pollinator System. *Integr. Comp. Biol.* 61, 1122–1133 (2021).
111. Klausnitzer, B. *Die Hirschkäfer.* (Spektrum Akademischer Verlag, 1995).
112. Thomaes, A. & Marchand, S. Habitatrichtlijnsoort Vermiljoenkever (*Cucujus cinnaberinus*) als nieuwe soort in Vlaanderen. (2019) doi:10.21436/inbor.15720667.
113. WallisDeVries, M. F. & Groenendijk, D. Een beschermingsplan voor de Spaanse vlag in Limburg. WUR <https://www.wur.nl/nl/publicatie-details.htm?publicationId=publication-way-343435373732> (2012).
114. Bolliger, J. et al. Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic Appl. Ecol.* 47, 44–56 (2020).
115. Elgert, C., Lehtonen, T. K., Kaitala, A. & Candolin, U. The duration of artificial light defines sexual signalling in the common glow-worm. *Behav Ecol Sociobiol* 75, 154 (2021).
116. Devos, K. et al. De IUCN Rode Lijst van de broedvogels in Vlaanderen (2016). doi:10.21436/inbor.11485739.
117. Withgott, J. Taking a Bird’s-Eye View...in the UV: Recent studies reveal a surprising new picture of how birds see the world. *BioScience* 50, 854–859 (2000).

////////////////////////////////////

118. Martin, G. R. Chapter 10 - Avian vision. in *Sturkie's Avian Physiology (Seventh Edition)* (eds. Scanes, C. G. & Dridi, S.) 139–158 (Academic Press, 2022). doi:10.1016/B978-0-12-819770-7.00023-2.
119. Adams, C. A., Fernandez-Juricic, E., Bayne, E. M. & St Clair, C. C. Effects of artificial light on bird movement and distribution: a systematic map. *Environ. Evid.* 10, 37 (2021).
120. Montevecchi, W. A. Influences of artificial light on marine birds. *Ecological consequences of artificial night lighting* 94–113 (2006).
121. Gauthreaux Jr, S. A., Belser, C. G., Rich, C. & Longcore, T. Effects of artificial night lighting on migrating birds. *Ecological consequences of artificial night lighting* 67–93 (2006).
122. Van Doren, B. M. et al. High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 11175–11180 (2017).
123. Vincze, O., Vágási, C. I., Pap, P. L., Osváth, G. & Møller, A. P. Brain regions associated with visual cues are important for bird migration. *Biology Letters* 11, 20150678 (2015).
124. Wiltschko, W., Munro, U., Ford, H. & Wiltschko, R. Red light disrupts magnetic orientation of migratory birds. *Nature* 364, 525–527 (1993).
125. Wiltschko, W. & Wiltschko, R. Migratory orientation of European Robins is affected by the wavelength of light as well as by a magnetic pulse. *J Comp Physiol A* 177, 363–369 (1995).
126. McLaren, J. D. et al. Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds. *Ecology Letters* 21, 356–364 (2018).
127. Rodríguez, A. et al. Seabird mortality induced by land-based artificial lights. *Conservation Biology* 31, 986–1001 (2017).
128. Arcos, J. & Oro, D. Significance of nocturnal purse seine fisheries for seabirds: a case study off the Ebro Delta (NW Mediterranean). *Marine Biology* 141, 277–286 (2002).
129. Leopold, M., Philippart, C. & Yorio, P. Nocturnal feeding under artificial light conditions by Brown-hooded Gull (*Larus maculipennis*) in Puerto Madryn harbour (Chubut Province, Argentina). *Hornero* 25, (2010).
130. Pugh, A. & Pawson, S. Artificial light at night potentially alters feeding behaviour of the native southern black-backed gull (*Larus dominicanus*). *Notornis* 63, (2016).
131. de Jong, M., Ouyang, J. Q., van Grunsven, R. H. A., Visser, M. E. & Spoelstra, K. Do Wild Great Tits Avoid Exposure to Light at Night? *PLoS One* 11, e0157357 (2016).
132. Sierro, A. & Erhardt, A. Light pollution hampers recolonization of revitalised European Nightjar habitats in the Valais (Swiss Alps). *J. Ornithol.* 160, 749–761 (2019).
133. Żmihorski, M. et al. The use of socio-economy in species distribution modelling: Features of rural societies improve predictions of barn owl occurrence. *Science of The Total Environment* 741, 140407 (2020).
134. Lao, S. et al. The influence of artificial light at night and polarized light on bird-building collisions. *Biol. Conserv.* 241, 108358 (2020).
135. Longcore, T. et al. Avian mortality at communication towers in the United States and Canada: which species, how many, and where? *Biological Conservation* 158, 410–419 (2013).
136. Loss, S. R., Will, T., Loss, S. S. & Marra, P. P. Bird–building collisions in the United States: Estimates of annual mortality and species vulnerability. *The Condor* 116, 8–23 (2014).
137. La Sorte, F. A., Lepczyk, C. A. & Aronson, M. F. J. Light pollution enhances ground-level exposure to airborne toxic chemicals for nocturnally migrating passerines. *Global Change Biology* gcb.16443 (2022) doi:10.1111/gcb.16443.



138. Kernbach, M. E., Cassone, V. M., Unnasch, T. R. & Martin, L. B. Broad-spectrum light pollution suppresses melatonin and increases West Nile virus-induced mortality in House Sparrows (*Passer domesticus*). *Condor* 122, duaa018 (2020).
139. Dominoni, D. M., Goymann, W., Helm, B. & Partecke, J. Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): implications of city life for biological time-keeping of songbirds. *Front. Zool.* 10, 60 (2013).
140. Raap, T., Casasole, G., Pinxten, R. & Eens, M. Early life exposure to artificial light at night affects the physiological condition: An experimental study on the ecophysiology of free-living nestling songbirds. *Environmental Pollution* 218, 909–914 (2016).
141. Russ, A. et al. Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine. *Ecol Evol* 5, 5698–5710 (2015).
142. Ouyang, J. Q. et al. Stressful colours: corticosterone concentrations in a free-living songbird vary with the spectral composition of experimental illumination. *Biol. Lett.* 11, 20150517 (2015).
143. Dominoni, D., Quetting, M. & Partecke, J. Artificial light at night advances avian reproductive physiology. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280, 20123017 (2013).
144. Dominoni, D. M., Quetting, M. & Partecke, J. Long-Term Effects of Chronic Light Pollution on Seasonal Functions of European Blackbirds (*Turdus merula*). *PLOS ONE* 8, e85069 (2013).
145. Dominoni, D. M. et al. Dose-response effects of light at night on the reproductive physiology of great tits (*Parus major*): Integrating morphological analyses with candidate gene expression. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* 329, 473–487 (2018).
146. Ouyang, J. Q. et al. Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird. *Glob. Change Biol.* 23, 4987–4994 (2017).
147. Raap, T., Pinxten, R. & Eens, M. Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (*Parus major*) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound. *Environmental Pollution* 215, 125–134 (2016).
148. Aulsebrook, A. E. et al. White and Amber Light at Night Disrupt Sleep Physiology in Birds. *Current Biology* 30, 3657-3663.e5 (2020).
149. Da Silva, A., Valcu, M. & Kempenaers, B. Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370, 20140126 (2015).
150. Dominoni, D. M. & Partecke, J. Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging European blackbirds (*Turdus merula*). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370, 20140118 (2015).
151. Kempenaers, B., Borgström, P., Loës, P., Schlicht, E. & Valcu, M. Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds. *Current Biology* 20, 1735–1739 (2010).
152. Miller, M. Apparent Effects of Light Pollution on Singing Behavior of American Robins. *The Condor* 108, 130–139 (2006).
153. Dominoni, D. M., Kjellberg Jensen, J., de Jong, M., Visser, M. E. & Spoelstra, K. Artificial light at night, in interaction with spring temperature, modulates timing of reproduction in a passerine bird. *Ecological Applications* 30, e02062 (2020).
154. de Jong, M. et al. Effects of nocturnal illumination on life-history decisions and fitness in two wild songbird species. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.* 370, 20140128 (2015).
155. Smith, R. A., Gagne, M. & Fraser, K. C. Pre-migration artificial light at night advances the spring migration timing of a trans-hemispheric migratory songbird. *Environ. Pollut.* 269, 116136 (2021).



156. Ciach, M. & Fröhlich, A. Habitat type, food resources, noise and light pollution explain the species composition, abundance and stability of a winter bird assemblage in an urban environment. *Urban Ecosyst* 20, 547–559 (2017).
157. Morelli, F., Mikula, P., Benedetti, Y., Bussi re, R. & Tryjanowski, P. Cemeteries support avian diversity likewise urban parks in European cities: Assessing taxonomic, evolutionary and functional diversity. *Urban Forestry & Urban Greening* 36, 90–99 (2018).
158. La Sorte, F. A. & Horton, K. G. Seasonal variation in the effects of artificial light at night on the occurrence of nocturnally migrating birds in urban areas. *Environ. Pollut.* 270, 116085 (2021).
159. MacGregor-Fors, I. & Schondube, J. E. Gray vs. green urbanization: Relative importance of urban features for urban bird communities. *Basic and Applied Ecology* 12, 372–381 (2011).
160. Evens, R. et al. Lunar synchronization of daily activity patterns in a crepuscular avian insectivore. *Ecology and Evolution* 10, 7106–7116 (2020).
161. Decandido, R. & Allen, D. Nocturnal Hunting By Peregrine Falcons At The Empire State Building, New York City. *Wils* 118, 53–58 (2006).
162. Kettel, E. F., Gentle, L. K. & Yarnell, R. W. Evidence of an Urban Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*) Feeding Young at Night. *Journal of Raptor Research* 50, 321–323 (2016).
163. Time, B. E. Hunting activity by urban Peregrine Falcons (*Falco peregrinus*) during autumn and winter in south-west Norway. *Ornis Norvegica* 39, 39–44 (2016).
164. Verbelen, D. Wie weet wat de Slechtvalk *Falco peregrinus* ('s nachts) eet? Gentse Slechtvalk wordt nachttactief door monumentverlichting. *Natuur.oriolus* 73, 108–112 (2007).
165. Penteriani, V., Kuparinen, A., Delgado, M. del M., Lourenço, R. & Campioni, L. Individual status, foraging effort and need for conspicuousness shape behavioural responses of a predator to moon phases. *Animal Behaviour* 82, 413–420 (2011).
166. Hale, J. & Arlettaz, R. Artificial lighting and Biodiversity in Switzerland. (2019).
167. McNaughton, E. J., Beggs, J. R., Gaston, K. J., Jones, D. N. & Stanley, M. C. Retrofitting streetlights with LEDs has limited impacts on urban wildlife. *Biol. Conserv.* 254, 108944 (2021).
168. Rodríguez, A., Dann, P. & Chiaradia, A. Reducing light-induced mortality of seabirds: High pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters. *Journal for Nature Conservation* 39, 68–72 (2017).
169. Da Silva, A. et al. Experimental illumination of a forest: no effects of lights of different colours on the onset of the dawn chorus in songbirds. *R. Soc. Open Sci.* 4, 160638 (2017).
170. Welbers, A. A. M. H. et al. Artificial Light at Night Reduces Daily Energy Expenditure in Breeding Great Tits (*Parus major*). *Front. Ecol. Evol.* 5, 55 (2017).
171. Van De Laar, F. Green light to birds. Investigation into the Effect of Bird-Friendly Lighting. Report NAM locatie L15-FA-1. Assen, The Netherlands: Nederlandse Aardolie Maatschappij (2007).
172. Poot, H. et al. Green Light for Nocturnally Migrating Birds. *Ecology and Society* 13, (2008).
173. Rebke, M. et al. Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biological Conservation* 233, 220–227 (2019).
174. Evans, W., Akashi, Y., Altman, N. S. & Manville, A. Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *North American Birds* 60, 476–488 (2007).
175. Wang, Z. et al. Attraction of Night-Migrating Birds to Light-Blue Structures Causes Mass Bird Deaths. *Environ. Sci. Technol.* 45, 10296–10297 (2011).
176. Zhao, X., Zhang, M., Che, X. & Zou, F. Blue light attracts nocturnally migrating birds. *The Condor* 122, duaa002 (2020).



177. Aulsebrook, A. E. et al. Streetlights Disrupt Night-Time Sleep in Urban Black Swans. *Front. Ecol. Evol.* 8, 131 (2020).
178. Gehring, J., Kerlinger, P. & Manville, A. Communication towers, lights, and birds: Successful methods of reducing the frequency of avian collisions. *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America* 19, 505–14 (2009).
179. Kerlinger, P. et al. Night Migrant Fatalities and Obstruction Lighting at Wind Turbines in North America. *The Wilson Journal of Ornithology* 122, 744–754 (2010).
180. Reed, J. R., Sincock, J. L. & Hailman, J. P. Light Attraction in Endangered Procellariiform Birds: Reduction by Shielding Upward Radiation. *The Auk* 102, 377–383 (1985).
181. de Jong, M. et al. Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night. *Physiol. Behav.* 155, 172–179 (2016).
182. Maes, D. et al. A database of threat statuses and life-history traits of Red List species in Flanders (northern Belgium). *Biodiversity Data Journal* 7, e34089 (2019).
183. Neuweiler, G. *The Biology of Bats.* (Oxford University Press, 2000).
184. Danilovich, S. et al. Bats regulate biosonar based on the availability of visual information. *Current Biology* 25, R1124–R1125 (2015).
185. Eklöf, J. & Jones, G. Use of vision in prey detection by brown long-eared bats, *Plecotus auritus*. *Animal Behaviour* 66, 949–953 (2003).
186. Gorresen, P. M., Cryan, P. M., Dalton, D. C., Wolf, S. & Bonaccorso, F. J. Ultraviolet Vision May be Widespread in Bats. *acta* 17, 193–198 (2015).
187. Müller, B. et al. Bat Eyes Have Ultraviolet-Sensitive Cone Photoreceptors. *PLOS ONE* 4, e6390 (2009).
188. Wang, D. et al. Molecular evolution of bat color vision genes. *Mol Biol Evol* 21, 295–302 (2004).
189. Davies, T. W., Bennie, J., Inger, R., De Ibarra, N. H. & Gaston, K. J. Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Glob. Change Biol.* 19, 1417–1423 (2013).
190. Rowse, E. G., Lewanzik, D., Stone, E. L., Harris, S. & Jones, G. Dark Matters: The Effects of Artificial Lighting on Bats. in *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World* (eds. Voigt, C. C. & Kingston, T.) 187–213 (Springer International Publishing, 2016). doi:10.1007/978-3-319-25220-9\_7.
191. Rydell, J. Exploitation of Insects around Streetlamps by Bats in Sweden. *Functional Ecology* 6, 744–750 (1992).
192. Geggie, J. F. & Fenton, M. B. A comparison of foraging by *Eptesicus fuscus* (Chiroptera: Vespertilionidae) in urban and rural environments. *Can. J. Zool.* 63, 263–266 (1985).
193. Spoelstra, K. et al. Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. *Proc. R. Soc. B.* 284, 20170075 (2017).
194. Zeale, M. R. K. et al. Experimentally manipulating light spectra reveals the importance of dark corridors for commuting bats. *Glob. Change Biol.* 24, 5909–5918 (2018).
195. Mariton, L., Kerbiriou, C., Bas, Y., Zanda, B. & Le Viol, I. Even low light pollution levels affect the spatial distribution and timing of activity of a “light tolerant” bat species. *Environmental Pollution* 305, 119267 (2022).
196. Barré, K. et al. Landscape composition drives the impacts of artificial light at night on insectivorous bats. *Environmental Pollution* 292, 118394 (2022).
197. Kuijper, D. P. J. et al. Experimental evidence of light disturbance along commuting routes of Pond bats *Myotis dasycneme*. *Lutra* 51, 51: 37–49 (2008).

////////////////////////////////////

- 198. Stone, E. L., Jones, G. & Harris, S. Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology* 18, 2458–2465 (2012).
- 199. Barre, K. et al. Artificial light may change flight patterns of bats near bridges along urban waterways. *Anim. Conserv.* 24, 259–267 (2021).
- 200. Hale, J. D., Fairbrass, A. J., Matthews, T. J., Davies, G. & Sadler, J. P. The ecological impact of city lighting scenarios: exploring gap crossing thresholds for urban bats. *Global Change Biology* 21, 2467–2478 (2015).
- 201. Voigt, C. C. et al. Movement responses of common noctule bats to the illuminated urban landscape. *Landsc. Ecol.* 35, 189–201 (2020).
- 202. Blondé, p & Opstaele, B. Chiropterologisch onderzoek in het natuurinrichtingsproject Bos t'Ename. Natuurpunt, Mechelen. (2004).
- 203. Rydell, J., Michaelsen, T. C., Sanchez-Navarro, S. & Eklöf, J. How to leave the church: light avoidance by brown long-eared bats. *Mamm. Biol.* 101, 979–986 (2021).
- 204. Boldogh, S., Dobrosi, D. & Samu, P. The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *acta* 9, 527–534 (2007).
- 205. Downs, N. C. et al. The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of *Pipistrellus pygmaeus*. *Biological Conservation* 111, 247–252 (2003).
- 206. Dekeukeleire, D., Janssen, R., Boers, K. & Willems, W. Zwermende vleermuizen bij Antwerpse forten. *Natuur.focus* 10, 104–109 (2011).
- 207. Barre, K. et al. Landscape composition drives the impacts of artificial light at night on insectivorous bats. *Environ. Pollut.* 292, 118394 (2022).
- 208. Straka, T. M., Wolf, M., Gras, P., Buchholz, S. & Voigt, C. C. Tree Cover Mediates the Effect of Artificial Light on Urban Bats. *Front. Ecol. Evol.* 7, 91 (2019).
- 209. Cravens, Z. M. & Boyles, J. G. Illuminating the physiological implications of artificial light on an insectivorous bat community. *Oecologia* 189, 69–77 (2019).
- 210. Mundinger, C., Fleischer, T., Scheuerlein, A. & Kerth, G. Global warming leads to larger bats with a faster life history pace in the long-lived Bechstein's bat (*Myotis bechsteinii*). *Commun Biol* 5, 1–8 (2022).
- 211. Tuttle, M. D. Population Ecology of the Gray Bat (*Myotis grisescens*): Factors Influencing Growth and Survival of Newly Volant Young. *Ecology* 57, 587–595 (1976).
- 212. Rydell, J., Eklöf, J. & Sánchez-Navarro, S. Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. *Royal Society Open Science* 4, 161077.
- 213. Dekeukeleire, D. & Janssen, R. De Ingekorven vleermuis in Vlaanderen. Meer in de winter, minder in de zomer. *Zoogdier* 23, 24–26 (2012).
- 214. Rydell, J., Elfström, M., Eklöf, J. & Sánchez-Navarro, S. Dramatic decline of northern bat *Eptesicus nilssonii* in Sweden over 30 years. *Royal Society Open Science* 7, 191754 (2020).
- 215. Arlettaz, R., Godat, S. & Meyer, H. Competition for food by expanding pipistrelle bat populations (*Pipistrellus pipistrellus*) might contribute to the decline of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*). *Biological Conservation* 93, 55–60 (2000).
- 216. Salinas-Ramos, V. B. et al. Artificial illumination influences niche segregation in bats. *Environ. Pollut.* 284, 117187 (2021).
- 217. Barré, K. et al. Bats seek refuge in cluttered environment when exposed to white and red lights at night. *Movement Ecology* 9, 3 (2021).
- 218. Russo, D. et al. Effects of artificial illumination on drinking bats: a field test in forest and desert habitats. *Anim. Conserv.* 22, 124–133 (2019).

//







258. Le Tallec, T., Théry, M. & Perret, M. Melatonin concentrations and timing of seasonal reproduction in male mouse lemurs (*Microcebus murinus*) exposed to light pollution. *Journal of Mammalogy* 97, 753–760 (2016).
259. LeTallec, T., Théry, M. & Perret, M. Effects of light pollution on seasonal estrus and daily rhythms in a nocturnal primate. *Journal of Mammalogy* 96, 438–445 (2015).
260. Robert, K. A., Lesku, J. A., Partecke, J. & Chambers, B. Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282, 20151745 (2015).
261. Bedrosian, T. A., Aubrecht, T. G., Kaugars, K. E., Weil, Z. M. & Nelson, R. J. Artificial light at night alters delayed-type hypersensitivity reaction in response to acute stress in Siberian hamsters. *Brain, Behavior, and Immunity* 34, 39–42 (2013).
262. Fonken, L. K., Weil, Z. M. & Nelson, R. J. Mice exposed to dim light at night exaggerate inflammatory responses to lipopolysaccharide. *Brain, Behavior, and Immunity* 34, 159–163 (2013).
263. Yue, F. et al. Effects of constant light exposure on sphingolipidomics and progression of NASH in high-fat-fed rats. *Journal of Gastroenterology and Hepatology* 35, 1978–1989 (2020).
264. Ikeno, T., Weil, Z. M. & Nelson, R. J. Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters. *General and Comparative Endocrinology* 197, 56–64 (2014).
265. Fujioka, A. et al. Effects of a constant light environment on hippocampal neurogenesis and memory in mice. *Neuroscience letters* 488, 41–4 (2010).
266. Tapia-Osorio, A., Salgado-Delgado, R., Angeles-Castellanos, M. & Escobar, C. Disruption of circadian rhythms due to chronic constant light leads to depressive and anxiety-like behaviors in the rat. *Behavioural Brain Research* 252, 1–9 (2013).
267. Bedrosian, T. A. et al. Nocturnal Light Exposure Impairs Affective Responses in a Wavelength-Dependent Manner. *J. Neurosci.* 33, 13081–13087 (2013).
268. Shivik, J. A., Treves, A. & Callahan, P. Nonlethal Techniques for Managing Predation: Primary and Secondary Repellents. *Conservation Biology* 17, 1531–1537 (2003).
269. Everaert, J. et al. *Wolvenplan Vlaanderen*. (2018) doi:10.21436/inbor.15109973.
270. Mori, E., Sangiovanni, G. & Corlatti, L. Gimme shelter: The effect of rocks and moonlight on occupancy and activity pattern of an endangered rodent, the garden dormouse *Eliomys quercinus*. *Behavioural Processes* 170, 103999 (2020).
271. Swinnen, K. R. R., Hughes, N. K. & Leirs, H. Beaver (*Castor fiber*) activity patterns in a predator-free landscape. What is keeping them in the dark? *Mammalian Biology* 80, 477–483 (2015).
272. Reed, D. F. & Woodard, T. N. Effectiveness of Highway Lighting in Reducing Deer-Vehicle Accidents. *The Journal of Wildlife Management* 45, 721–726 (1981).
273. McDonald, M. G. Moose movement and mortality associated with the Glenn Highway expansion, Anchorage, Alaska. *Alces* 27, 208–219 (1991).
274. Gilsdorf, J. M., Hygnstrom, S. E., VerCauteren, K. C., Blankenship, E. E. & Engeman, R. M. Propane exploders and Electronic Guards were ineffective at reducing deer damage in cornfields. *wbul* 32, 524–531 (2004).
275. VerCauteren, K. C., Shivik, J. A. & Lavelle, M. J. Efficacy of an animal-activated frightening device on urban elk and mule deer. *Wildlife Society Bulletin* 33, 1282–1287 (2005).
276. Bengsen, A. J., Leung, L. K.-P., Lapidge, S. J. & Gordon, I. J. Artificial illumination reduces bait-take by small rainforest mammals. *Applied Animal Behaviour Science* 127, 66–72 (2010).

////////////////////////////////////

277. Darrow, P. A. & Shivik, J. A. Bold, shy, and persistent: Variable coyote response to light and sound stimuli. *Applied Animal Behaviour Science* 116, 82–87 (2009).
278. Spoelstra, K. et al. Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.* 370, 20140129 (2015).
279. Dimovski, A. M. & Robert, K. A. Artificial light pollution: Shifting spectral wavelengths to mitigate physiological and health consequences in a nocturnal marsupial mammal. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* 329, 497–505 (2018).
280. Jooris, R. et al. *De IUCN Rode Lijst van de amfibieën en reptielen in Vlaanderen.* (2012).
281. Stebbins, R. C. & Cohen, N. W. *A Natural History of Amphibians.* (Princeton University Press, 2021).
282. Mohun, S. M. & Davies, W. I. L. The Evolution of Amphibian Photoreception. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7, (2019).
283. Katti, C., Stacey-Solis, M., Coronel-Rojas, N. A. & Davies, W. I. L. The Diversity and Adaptive Evolution of Visual Photopigments in Reptiles. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7, (2019).
284. Salmon, M. Salmon, M. 2005. Protecting sea turtles from artificial night lighting at Florida’s oceanic beaches. , C. Rich and T. Longcore, eds. *Island Press, Washington, D.C.* in 141–168 (2005).
285. Perry, G., Buchanan, B., Fisher, R., Salmon, M. & Wise, S. Effects of artificial night lighting on amphibians and reptiles in urban environments. (2008).
286. Jaeger, R. G. & Hailman, J. P. Effects of Intensity on the Phototactic Responses of Adult Anuran Amphibians: A Comparative Survey1. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 33, 352–407 (1973).
287. Wise, S. *Studying The Ecological Impacts Of Light Pollution On Wildlife: Amphibians As Models.* (2007).
288. Komine, H., Koike, S. & Schwarzkopf, L. Impacts of artificial light on food intake in invasive toads. *Sci Rep* 10, 6527 (2020).
289. Creemers, R. *De invloed van straatverlichting op de verdeling van amfibieën op een dijktraject. Waarnemingen van amfibieën en reptielen in Nederland, 1991. Publicatieburo Stichting RAVON: 43-51. Pubicatieburo Stichting RAVON (1992).*
290. Mazerolle, M. J., Huot, M. & Gravel, M. Behavior Of Amphibians On The Road In Response To Car Traffic. *herp* 61, 380–388 (2005).
291. Baker, J. Toad aggregations under street lamps. *British Herpetological Society Bulletin* 31, 26–27 (1990).
292. Touzot, M. et al. Artificial light at night disturbs the activity and energy allocation of the common toad during the breeding period. *Conservation Physiology* 7, coz002 (2019).
293. Grunsven, R. H. A. van, Creemers, R., Joosten, K., Donners, M. & Veenendaal, E. M. Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphibia-Reptilia* 38, 49–55 (2017).
294. Martin, B., Pérez, H. & Ferrer, M. Effects of natural and artificial light on the nocturnal behaviour of the wall gecko. *Animal Biodiversity and Conservation* 41, (2017).
295. Carretero, M., Sillero, N., Lazic, M. & crnobrnja-isailovic, J. Nocturnal activity in a Serbian population of *Podarcis muralis* (Laurenti, 1768). *Herpetozoa* 25, 87–89 (2012).
296. Shidemantle, G. et al. The morphological effects of artificial light at night on amphibian predators and prey are masked at the community level. *Environmental Pollution* 308, 119604 (2022).









352. Škvareninová, J. et al. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian Geographical Reports* 25, 282–290 (2017).
353. Mondy, N. et al. Herbivory increases on freshwater plants exposed to artificial light at night. *Aquat. Bot.* 175, 103447 (2021).
354. Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., Bell, F. & Gaston, K. J. Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *J. Appl. Ecol.* 55, 442–450 (2018).
355. Liu, Y., Speißer, B., Knop, E. & van Kleunen, M. The Matthew effect: Common species become more common and rare ones become more rare in response to artificial light at night. *Global Change Biology* 28, 3674–3682 (2022).
356. Murphy, S. M. et al. Streetlights positively affect the presence of an invasive grass species. *Ecol. Evol.* 11, 10320–10326 (2021).
357. Murphy, S. M., Vyas, D. K., Sher, A. A. & Grenis, K. Light pollution affects invasive and native plant traits important to plant competition and herbivorous insects. *Biol. Invasions* 24, 599–602 (2022).
358. Cieraad, E., Strange, E., Flink, M., Schrama, M. & Spoelstra, K. Artificial light at night affects plant–herbivore interactions. *Journal of Applied Ecology* 60, 400–410 (2023).
359. Bariles, J. B., Cocucci, A. A. & Soteris, F. Pollination and fitness of a hawkmoth-pollinated plant are related to light pollution and tree cover. *Biological Journal of the Linnean Society* 134, 815–822 (2021).
360. Wilson, A. A. et al. Direct and Ambient Light Pollution Alters Recruitment for a Diurnal Plant–Pollinator System. *Integrative and Comparative Biology* 61, 1122–1133 (2021).
361. Costanza, R. et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260 (1997).
362. Otte, A., Vanheeswijck, P., De Smet, L. & Vucht, V., Inne. Een heldere ecosysteemdientestaal. *Natuurrapport - Aan de slag met ecosysteemdiensten.* (2017).
363. von Döhren, P. & Haase, D. Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators* 52, 490–497 (2015).
364. Schneiders, A. & Spanhove, T. Hoofdstuk 6 – De rol van biodiversiteit in de levering van ecosysteemdiensten. in *Natuurrapport - Toestand en trend van ecosystemen en ecosysteemdiensten in Vlaanderen. Technisch rapport.* (Mededelingen van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, 2014).
365. Lyytimäki, J. Nature’s nocturnal services: Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management. *Ecosystem Services* 3, e44–e48 (2013).
366. Kunz, T. H., Braun de Torrez, E., Bauer, D., Lobova, T. & Fleming, T. H. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York academy of sciences* 1223, 1–38 (2011).
367. Lewanzik, D. & Voigt, C. C. Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. *Journal of Applied Ecology* 51, 388–394 (2014).
368. Kernbach, M. E. et al. Light pollution increases West Nile virus competence of a ubiquitous passerine reservoir species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 286, 20191051 (2019).
369. Kernbach, M. E. et al. Light pollution affects West Nile virus exposure risk across Florida. *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci.* 288, 20210253 (2021).
370. Coetzee, B. W. T. et al. Artificial Light as a Modulator of Mosquito-Borne Disease Risk. *Front. Ecol. Evol.* 9, 768090 (2022).
371. Fyie, L. R., Gardiner, M. M. & Meuti, M. E. Artificial light at night alters the seasonal responses of biting mosquitoes. *J. Insect Physiol.* 129, 104194 (2021).



372. Gallaway, T. The Value of the Night Sky. in *Urban Lighting, Light Pollution and Society* (Routledge, 2014).
373. Gallaway, T. On Light Pollution, Passive Pleasures, and the Instrumental Value of Beauty. *Journal of Economic Issues* 44, 71–88 (2010).
374. Smith, M. Time to turn off the lights. *Nature* 457, 27–27 (2009).
375. Mitchell, D. & Gallaway, T. Dark sky tourism: economic impacts on the Colorado Plateau Economy, USA. *Tourism Review* 74, 930–942 (2019).
376. Importance of Dark Skies to Tourism. Friends of the Lake District <https://www.friendsofthelakedistrict.org.uk/importance-of-dark-skies-to-tourism> (2020).
377. Ekos. A Dark sky Park Economic Impact and Potential. (2013).
378. Mander, S., Alam, F., Lovreglio, R. & Ooi, M. How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society* 92, 104465 (2023).
379. Hoelker, F. et al. 11 Pressing Research Questions on How Light Pollution Affects Biodiversity. *Front. Ecol. Evol.* 9, 767177 (2021).
380. Hölker, F. et al. The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy. *Ecology and Society* 15, 13. (2010).
381. Adriaens, P. & Puls, R. Onderzoek naar de mogelijke impact van actieve wegmarkeringen op vleermuizen. Rapport Corridor cv, Nazareth. (2023).
382. Thiault, L., Kernaléguen, L., Osenberg, C. W. & Claudet, J. Progressive-Change BACIPS: a flexible approach for environmental impact assessment. *Methods in Ecology and Evolution* 8, 288–296 (2017).
383. Christie, A. P. et al. Simple study designs in ecology produce inaccurate estimates of biodiversity responses. *Journal of Applied Ecology* 56, 2742–2754 (2019).
384. Barentine, J. C. Methods for Assessment and Monitoring of Light Pollution around Ecologically Sensitive Sites. *Journal of Imaging* 5, 54 (2019).

