

SONDERDRUCK  
aus

3 | 2024

**VBio**

Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland



**ÖKOLOGIE**  
Blühphänologische  
Variation



**DINOPHYCEEN**  
Botschafter  
gegen Artensterben

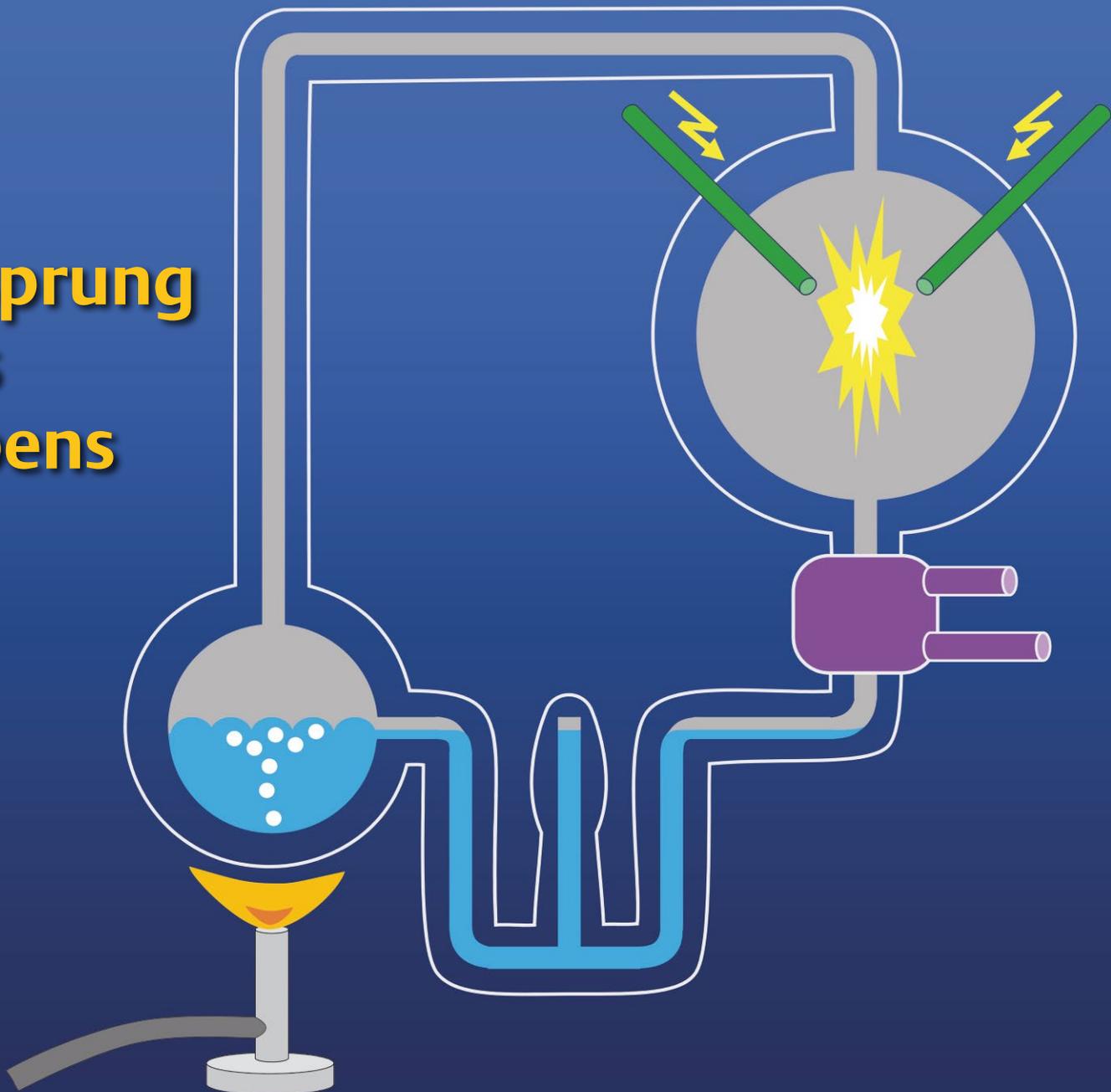


**GEWÜRZ  
PFLANZEN**  
Ätherische Öle  
in Lippenblütlern

# BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Ursprung  
des  
Lebens**





Hochaufgelöste Drohnenbilder liefern neue Einblicke  
in intraspezifische blühphänologische Variationen

# Unerwartete Vielfalt im Reproduktionsverhalten von *Calluna vulgaris*

CARSTEN NEUMANN | VANESSA OCHLAST | MICHELLE PRAUSS

*Nur auf den ersten Blick erscheint die Besenheide in der Kyritz-Ruppiner Heide im Spätsommer als einheitlich lilafarbene Fläche. Aus größerer Höhe jedoch zeigen sich vielfältigere Farbeindrücke und wir bekommen eine Ahnung von der Diversität im Blühverhalten, die im raumzeitlichen Zusammenspiel aller Individuen innerhalb einer Population von *Calluna vulgaris* sichtbar wird.*

Mit dem Aufkommen der Blütenpflanzen vor etwa 140 Millionen Jahren begann die jüngste Phase der Evolution im Pflanzenreich. Bis heute hat sich diese relativ junge Gruppe der Landpflanzen – auch Bedecktsamer oder Angiospermen genannt – in ca. 370.000 Arten diversifiziert und ist damit die mit Abstand häufigste Pflanzenklasse der Erde [1]. Die Blüten dieser Pflanzen repräsentieren dabei die vielfältige Komplexität optischer Anziehungspunkte für die sexuelle Fortpflanzung. Nicht nur verschiedene Formen von Blüten haben sich entwickelt und werden immer noch durch Genexpression, epigenetische Mechanismen und Umwelteinflüsse verändert, sondern auch raumzeitliche Muster im Blühverhalten und



Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 258 erklärt.

deren biotische Interaktionen bestimmen die Blühphänologie von Individuen. Diese variiert sowohl zwischen den Arten eines Pflanzenbestandes (interspezifisch) als auch innerhalb einer Art auf Populationsebene (intraspezifisch) [2, 3]. Die Reproduktionsökologie der Angiospermen liefert uns somit die Grundlagen für das Verständnis der phänotypischen und genetischen Vielfalt, ihrer Regulierung und ihrer Auswirkungen auf die Populationsdynamik. Insbesondere innerartliche Variationen erlauben Rückschlüsse auf ökosystemare Prozesse wie die Koevolution von Bestäubern oder die Stabilität und Widerstandsfähigkeit von Populationen in einer sich klimatisch verändernden Welt [4].

Als ein Modellorganismus für die Beobachtung der intraspezifischen blühphänologischen Variation wurde die Besenheide (*Calluna vulgaris*) ausgewählt. Dieser Zwergstrauch kann sich auf geeigneten Standorten über große Gebiete in monodominanten, naturnahen Populationen erstrecken. In der Kyritz-Ruppiner Heide kommen solche Bestände als in der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie geschützter Lebensraumtyp 4030 (Trockene Europäische Heiden) vor. Um dessen Fortbestand zu gewährleisten, müssen gezielt Maßnahmen durchgeführt werden, da Heidekraut – wie die Besenheide auch genannt wird – sonst nach wenigen Jahrzehnten erst überaltern, dann sukzessionsbedingt gänzlich verschwinden würde. Hier setzt die Heinz Sielmann Stiftung gezielt Maßnahmen der Landschaftspflege wie Mahd oder kontrollierte Feuer ein, die Jungtriebe fördern und zu einer Verjüngung der Bestände über Samenkeimung führen sollen. Auf diese Weise kann der lila Blühaspekt jedes Jahr aufs Neue an den frischen Ausrieben in Erscheinung treten.

Die Blühphänologie des Heidekrauts mag auf den ersten Blick keine großen Geheimnisse bergen. Ab Anfang August erstrahlen die großen Heidegebiete scheinbar einheitlich in Lila. Eine andere Perspektive ergibt sich jedoch aus der Luft, wenn das Blühverhalten von *Calluna* über Kameras, die an Drohnen (*unmanned aerial vehicles*, UAV) angebracht sind, erfasst wird. Plötzlich können wir die ganze Farbenvielfalt von tausenden Individuen innerhalb einer Population überblicken. Aus der Höhe wird erkennbar: Es wechseln sich knospende mit blühenden Individuen oder mit gänzlich vegetativen, grün gebliebenen ab; andere sind bereits in der Reifephase der Früchte. Mit Fortschreiten des Spätsommers ändert sich das Farbenspiel in fluktuierenden Mustern über den gesamten Verlauf einer Blühphase bis Ende September. Jeder Tag lässt dabei andere Individuen aufblühen oder verblühen. Dabei ist die individuelle Phänologie räumlich heterogen und unterscheidet sich auch zwischen den Jahren.

Um die riesigen Datenmengen der hochauflösenden Drohnenbilder auswerten zu können, stehen heute digitale Technologien zur Verfügung, die hochaufgelöste Drohnenbilder quantitativ und automatisiert über Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) auswerten können. Diese erlauben es, raumzeitliche Zusammenhänge in der

Blühphänologie sichtbar zu machen und daraus Rückschlüsse auf das Reproduktionsverhalten von *Calluna* und dessen Einflussfaktoren zu ziehen.

### Drohnenbefliegung der Kyritz-Ruppiner Heide

Als Untersuchungsgebiet zur Bestimmung der *Calluna*-Blühphänologie diente ein 1,6 ha großes Areal auf dem ehemaligen Truppenübungsplatz der Kyritz-Ruppiner Heide im Nordwesten von Brandenburg (Abbildung 1). Das Untersuchungsgebiet wurde mit einer DJI Phantom 4 Pro mit einer 8-bit Rot-Grün-Blau (RGB) 20-Megapixel-Kamera mit integriertem ▶ 1“-CMOS-Sensor befliegen. Daraus ergeben sich bei einer beidseitigen Überlappung von 80 Prozent und einer Flughöhe von 60 m für jeden Überflug 178 Einzelphotos, die über den Pix4Dcloud-Service zu einem ▶ Orthomosaik, einem digitalen Gesamtbild, über ▶ photogrammetrische Verfahren zusammengesetzt wurden. In der Hauptblühphase von Anfang August bis Mitte September in den Jahren 2022 und 2023 wurde wöchentlich ein Drohnenflug realisiert. Die einzelnen Orthomosaik wurden als Zeitreihe homogenisiert, indem eine räumliche ▶ Koregistrierung mit ▶ Resampling auf die Pixelgröße von 1,3 cm erfolgte [5]. Anschließend wurde über ein KI-basiertes Verfahren nach Neumann et al. [6] Besenheide von anderen Pflanzenarten und Hintergrundpixeln ge-

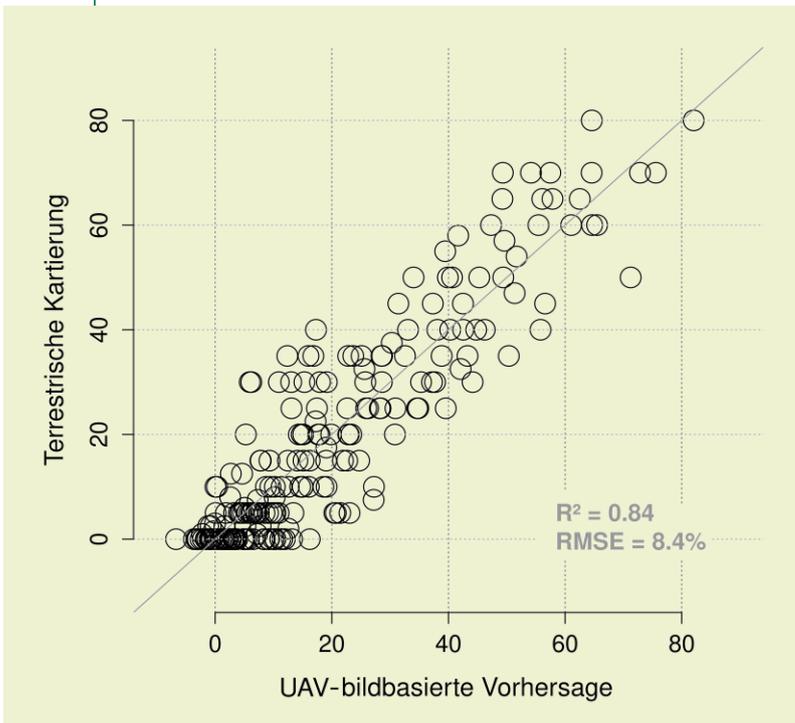
#### IN KÜRZE

- Innovative Ansätze mit Fernerkundungstechnologien von räumlich **hochaufgelösten** Drohnenbildern in Kombination mit **Künstlicher Intelligenz** bergen neue Möglichkeiten für das Naturschutzmonitoring vor allem zur **Analyse von Populationsdynamiken** in großen und schwer zugänglichen, naturnahen Gebieten wie stark munitionsbelasteten ehemaligen Truppenübungsplätzen.
- Die Besenheide (*Calluna vulgaris*) kann aufgrund ihrer flächigen monodominanten Ausprägung als **Modellorganismus zum Verständnis der intraspezifischen Diversität** von Pflanzeigenschaften und deren Einfluss auf die **Resilienzfähigkeit quasi-natürlicher Pflanzenpopulationen** unter Berücksichtigung von koevolutiven Prozessen wie Bestäuberinteraktionen herangezogen werden.
- Anhand tausender Individuen, die in einem KI-Verfahren abgegrenzt und nach Reproduktionsverhalten quantitativ analysiert worden sind, konnte erstmalig gezeigt werden, dass *Calluna vulgaris* hinsichtlich **blütenphänologischer Merkmale eine hohe individuelle räumliche und zeitliche Variabilität** aufweist, die nicht allein durch externe Standorteigenschaften erklärt werden kann.
- Die Reproduktionsraten von *Calluna*-Populationen können anhand eines Medianverhaltens, das sich an übergeordneten Faktoren ausrichtet, beschrieben werden. Die **Blühintensitäten von einzelnen Individuen** sind im Vergleich verschiedener Jahre nicht vorher-sagbar, was auf weitere regulatorische Mechanismen schließen lässt.



**ABB. 1** Der variable Blühaspekt von *Calluna vulgaris* auf der untersuchten Testfläche im September 2022 in der 2. Vegetationsperiode nach Brandpflege. lila = Blüten, grün = vegetative Triebe, orange = Fruchtsände. Drohnfoto: GFZ.

**ABB. 2** | MODELLIERUNG DER BLÜTENANTEILE IN %



Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen terrestrisch kartierten und auf der Grundlage von Farbwerten aus Drohn Bildern berechneten Blütenanteilen [0–100%]. Die Darstellung basiert auf einer Leave-One-Out-Kreuzvalidierung über  $n = 249$  Aufnahmen.

trennt und darin die Abgrenzung von Einzelindividuen über eine Segmentierung als flächenscharfe Polygone ausgegeben. Insgesamt wurden  $n = 83.920$  Individuen und deren RGB-Farbwerte als Grundlage zur Modellierung der blühphänologischen Variabilität ausgewiesen.

### Terrestrische Aufnahmen

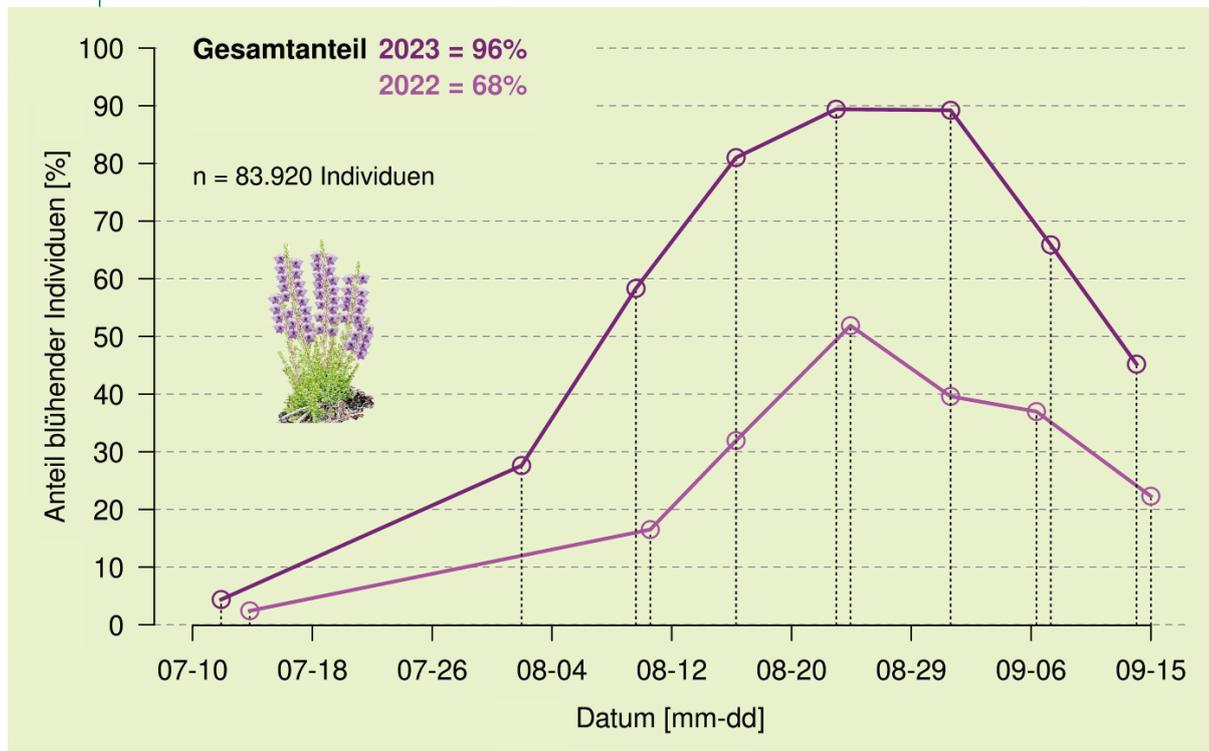
Die terrestrische Kartierung erfolgte in den Jahren 2022 und 2023 jeweils während der Blühphase wöchentlich zwischen dem 17. August und dem 08. September an insgesamt acht Tagen an 86 unterschiedlichen Individuen mit einer Gesamtprobenanzahl von  $n = 249$ . Im Feld wurden der Blütenanteil pro Individuum – als Anteil geöffneter Blüten – sowie Knospenanteil, Fruchtanteil und Grünanteil (photosynthetisch aktive und inaktive Blätter) visuell erfasst. Der Blütenanteil pro Individuum erreicht nie 100 Prozent, da Blätter im unteren basalen Triebansatz ausgebildet sind und selbst in witterungsbedingt günstigen Jahren vegetative Triebe ohne Blütenbildung existieren.

### Modellierung der Daten

Die Individuen der terrestrischen Kartierung wurden in den Drohn Bildern in ihrer Ausdehnung exakt identifiziert, dann als räumlich lokalisierte Pflanzensegmente im Bild abgegrenzt und darin die normalisierten Farbwerte aus den enthaltenen Bildpixeln sowie deren quadratische Terme extrahiert und gemittelt. Die so gewonnenen Farb Informationen der Individuen aus den Drohn Bildern wurden über eine multiple lineare Regression mit rückwärtiger Variablenselektion anhand des Akaike-Informationskriteriums [7] modelliert. Das finale Regressionsmodell erlaubt es, den Blühaspekt der digitalen Pflanzensegmente über eine Kombination signifikanter Farbwerte aus den Drohn Bildern mit hinreichender Genauigkeit vorherzusagen. Die Bewertung der Vorhersagegüte wird über eine Leave-One-Out-Kreuzvalidierung beschrieben (Abbildung 2). Die Blütenanteile können dabei mit einer mittleren Fehlerabweichung von  $\text{RMSE} = 8,4\%$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,84$  über die Farbwerte der Drohnaufnahmen modelliert werden. Das Regressionsmodell wurde anschließend zur Berechnung der Blütenanteile aller Individuen (in  $n = 83.920$  Pflanzensegmenten) auf das jeweilige Drohnorthomosaik für sämtliche Aufnahmezeitpunkte angewendet. Auf diese Weise kann der Blühverlauf für jedes Individuum räumlich explizit aufgezeichnet werden.

### Verlauf der Blühphase

Die *Calluna*-Blühphase kann über den Anteil an blühenden Individuen an der Gesamtpopulation dargestellt werden (Abbildung 3). Dabei wird aus den Drohn Bildern über das Regressionsmodell berechnet, welche Individuen während des Aufnahmezeitpunktes blühen. Es ergibt sich eine typische unimodale Verteilung, wobei in beiden Aufnahmejahren ähnliche Befliegungszeitpunkte gewählt


**ABB. 3 | VERLAUF DER CALLUNA-BLÜHPHASE IN DEN JAHREN 2022 UND 2023**


Gezeigt ist der Anteil von blühenden Individuen an der Gesamtpopulation pro Zeitabschnitt; aufgezeichnet durch Drohnenbilder an den jeweiligen Zeitpunkten.

wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Drohnenbilder eine wöchentliche Auflösung liefern, es also zu zeitlich geringen Verschiebungen kommen kann. Im Jahr 2023 konnte bei insgesamt 96 Prozent, im Jahr 2022 bei lediglich 68 Prozent der Individuen eine Blütenbildung während der gesamten Blühphase erkannt werden. Das Maximum wurde am 25. bzw. 24. August erreicht (Gipfelpunkt der Blühphase). An diesem Tag blühten 52 Prozent aller Individuen im Jahr 2022 und 89 Prozent im Jahr 2023. Damit bestehen innerhalb einer Population jährlich unterschiedliche Reproduktionsraten. Die Verteilungsfunktion der jährlichen Blühphase (d. h. ihr Verlauf) beschreibt dabei das Reproduktionsverhalten aller Individuen der Population. Einflussfaktoren stellen z. B. der Witterungsverlauf – insbesondere der Niederschlag als limitierender ökologischer Faktor – oder die Altersstruktur einer Population dar.

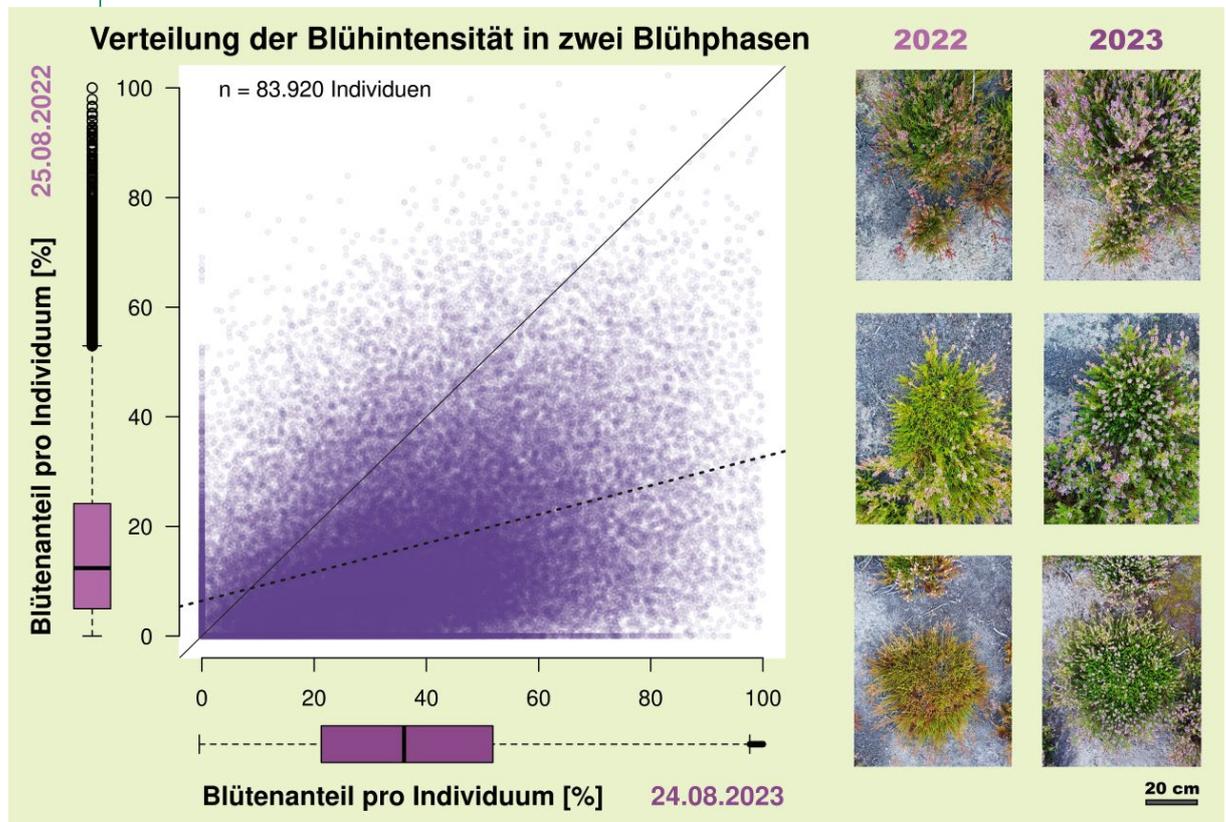
### Variabilität der Blühintensität

Neben der Aussage, ob ein Individuum blüht oder nicht, liefert die Modellierung der Blütenanteile pro Individuum eine quantitative Angabe darüber, wie stark die Blühintensität eines Individuums tatsächlich ausgeprägt ist. Die Analyse der Blühintensität aller Individuen einer Population erlaubt erstmalig detaillierte Einsichten in das Populationsverhalten (Abbildung 4). Es kann festgestellt werden, dass die mittlere Blühintensität in ungünstigen Jahren (wie z. B. 2022) reduziert ist. Sie liegt im Median im Jahr 2022 bei 12 Prozent und bei 36 Prozent im Jahr 2023. Dennoch treten in beiden Jahren immer auch schwach

blühende und stark blühende Individuen auf. Es kann verallgemeinert ausgesagt werden: Es gibt Individuen, die blühen stark in ungünstigen Jahren, und es gibt Individuen, die blühen schwach in günstigen Jahren. Eine Population bildet also stets die mögliche Gesamtvariation des Reproduktionsverhaltens ab, wobei es zu Verhaltenshäufungen und damit zur Ausbildung einer Medianreproduktionsrate für die Gesamtpopulation kommt.

Hier ergibt sich nun eine interessante Fragestellung: Sind die Schwach- oder Starkblüher in einem Jahr auch die Schwach- oder Starkblüher des anderen Jahres, gibt es also ein konvergentes individuelles Verhalten zwischen den Jahren? Da wir aus den Drohnenbildern die Lage eines jeden Individuums kennen, lässt sich über eine zeitliche Korrelationsanalyse der Blühintensitäten herausfinden, wie stark sich ihr Verhalten zwischen den Jahren ähnelt (Abbildung 4). Der Vergleich über alle Individuen liefert nur schwache Hinweise für ein statisches Verhalten. Es kann zwar ein signifikanter Zusammenhang beschrieben werden ( $p < 0,01$ ), dieser unterliegt jedoch einer großen Streuung ( $R^2 = 0,14$ ), so dass das lokale Auftreten von Stark- bzw. Schwachblühern zwischen den Jahren wenig korreliert. Es ist von einer hohen individuellen Variabilität zwischen den Jahren auszugehen. Diese überraschende Beobachtung weist darauf hin, dass hier kleinräumige standörtliche Gegebenheiten oder genetische Vorprägungen eine nur untergeordnete Rolle für die Festlegung von individuellem Reproduktionsverhalten spielen.

ABB. 4 | STREUDIAGRAMM DER BLÜHINTENSITÄT ALLER *CALLUNA*-INDIVIDUEN



Die Daten stammen aus den Jahren 2022 und 2023 am jährlichen Gipfelpunkt der Blühphase. ► Boxplots zeigen die Verteilung der Blühintensität zu den Aufnahmezeitpunkten der Drohnenbefliegung. Rechts: Feldfotos von Einzelindividuen mit unterschiedlicher Ausprägung der Blüte zwischen den Jahren.

### Der räumliche Zusammenhang

Sollte das individuelle Reproduktionsverhalten vorwiegend durch Standorteigenschaften beeinflusst werden, dann müsste eine ► räumliche Autokorrelation, also ein ähnliches Blühverhalten zwischen naheliegenden Individuen nachweisbar sein, weil diese folglich auch in geringen Entfernungen zueinander geringeren Standortvariationen unterliegen. Da die *Calluna*-Individuen anhand der Drohnenaufnahmen räumlich explizit als Pflanzensegmente abgegrenzt und lokalisiert werden können, ist es möglich, die tatsächliche räumliche Korrelationsentfernung der Blühintensität als Maß der Autokorrelation zwischen den Individuen zu bestimmen (Abbildung 5). Die Blühintensität selbst weist dabei eine intraspezifische Variabilität auf (in Abbildung 5 als ► Semivarianz dargestellt), die mit zunehmender Entfernung der Individuen zueinander ansteigt.

Bis zum Erreichen der maximalen intraspezifischen Variabilität verhalten sich benachbarte Individuen an den zwei ausgewählten Aufnahmetagen ähnlich. Da die mittlere Entfernung des naheliegendsten, also direkt benachbarten *Calluna*-Individuums mit  $\varnothing = 0,50$  m bekannt ist, wird deutlich, dass die maximale intraspezifische Variabilität bereits bei Abständen erreicht wird, die im Bereich der unmittelbaren Nachbarindividuen liegen. Eine räum-

liche Autokorrelation besteht daher lediglich unterhalb dieser Abstände, was darauf schließen lässt, dass schon benachbarte Individuen sich vollkommen unabhängig voneinander verhalten können, ihre Blühintensität demzufolge auf geringen Entfernungen maximal variieren kann. Ganz sicher gibt es übergeordnete ökologische Faktoren wie Niederschlag, Temperatur und Photoperiode, die einen Einfluss auf das Medianverhalten der Gesamtpopulation haben (Abbildung 3). Auf der Betrachtungsebene der Individuen sind jedoch keine Muster erkennbar, die die räumliche Verteilung der Blühintensität innerhalb der Population erklären können (Abbildung 5).

Neben der zeitlichen Asynchronität zwischen den Jahren ist daher zusätzlich eine kleinskalige, räumliche Heterogenität im Blühverhalten vieler Individuen feststellbar. Die Ausbildung von individuellen Blütenanteilen lässt sich demzufolge nicht vollständig durch übergeordnete, raumzeitlich stationäre Muster beschreiben. Sie bildet vielmehr ein dynamisches Verhalten ab, das auf komplexe Interaktionen – sowohl innerhalb einer Population als auch im Zusammenspiel mit äußeren Faktoren – schließen lässt. Das Blühverhalten weist damit eine erstaunliche raumzeitliche Variabilität auf, wobei individuelle Reproduktionsraten stark variieren können.

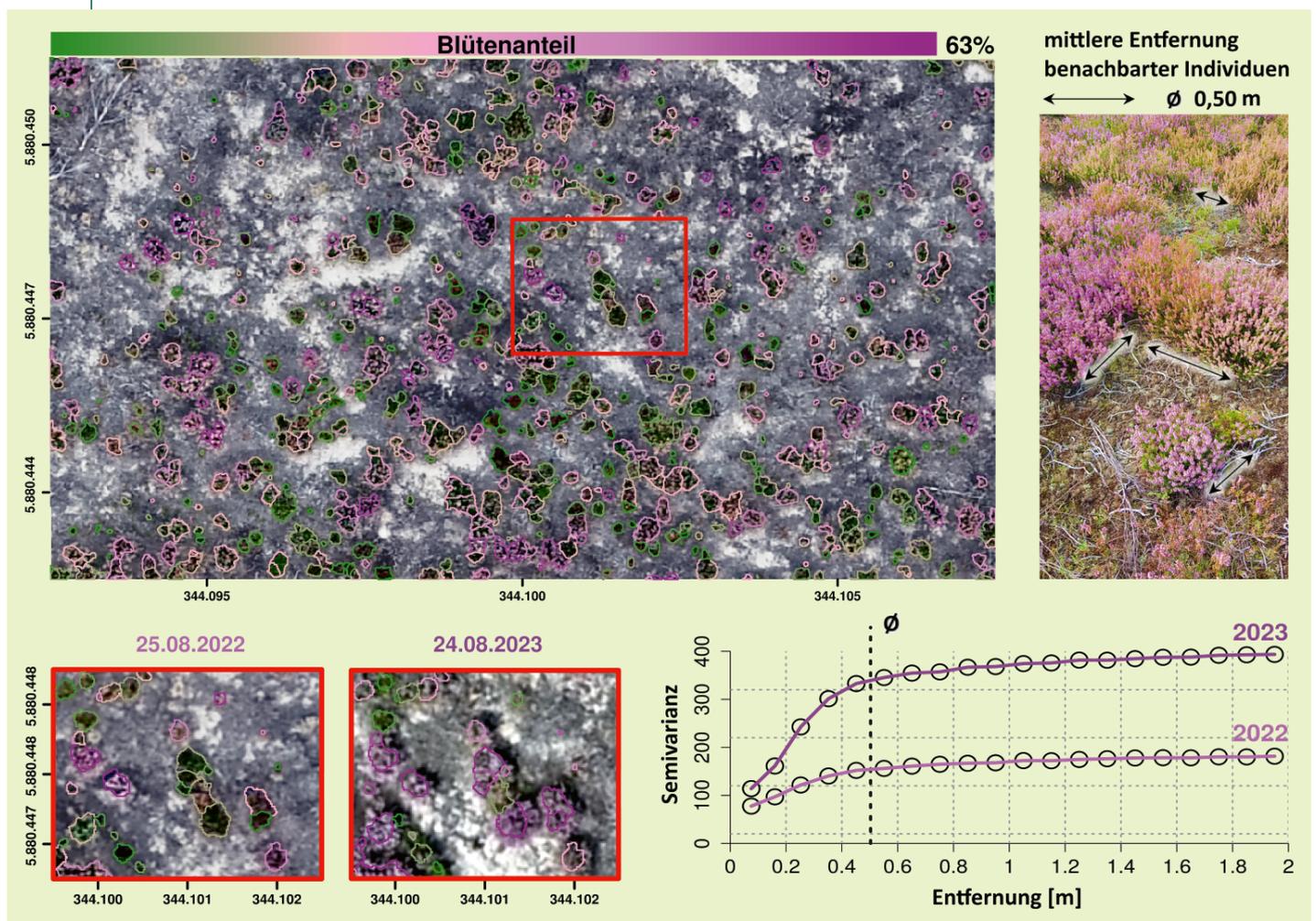


### Die ökologische Bedeutung phänologischer Variation

Welche Prozesse könnten die Entwicklung einer solchen Variabilität in Populationen begünstigen? Der Reproduktionserfolg zoophiler Pflanzen hängt davon ab, wann und in welcher Menge Reproduktionsorgane gebildet werden, aber auch vom Bestäubervorkommen. Bei raumzeitlichen Variationen innerhalb der Population kommt es zu wechselseitigen Effekten auf Seiten der Bestäuber und der Blühpflanzen. Durch das vereinzelte bzw. asynchrone Auftreten von blühenden Individuen wird beispielsweise die Konkurrenz um Bestäuber reduziert, gleichzeitig steht aber auch weniger genetisches Material im Vergleich zu synchronen Blühereignissen zur Verfügung. Durch eine hohe raumzeitliche Variation auf Individualebene besteht jedoch die Chance, dass die Nachbarn von Jahr zu Jahr gemischt und dadurch die Variation des Genflusses erhöht

werden kann [8, 9]. Vor allem in sehr großen monodominanten Beständen, wie es in der Kyritz-Ruppiner Heide der Fall ist, können daher asynchrone Muster eine sinnvolle Strategie sein, um intraspezifische Konkurrenz zu reduzieren und genetischen Austausch zu fördern. Zusätzlich sind Prozesse basierend auf intra- und interspezifischer Konkurrenz – als Folge der limitierten Anzahl an Bestäubern – eine treibende Kraft für die Variation der individuellen Phänologien innerhalb von Populationen [8, 10]. So konnte in der Kyritz-Ruppiner Heide beobachtet werden, dass verschiedene Hummelarten wie die Große Erdhummel (*Bombus magnus*) direkt von der Variabilität im Blühverhalten von *Calluna* profitieren. Während die Männchen der Hellen Erdhummel (*Bombus lucorum*) schon ab Juli die Besenheide als Nahrungspflanze aufsuchten, waren die Männchen der Großen Erdhummel erst Anfang September in größerer Zahl an *Calluna* zu finden. Durch

ABB. 5 | RÄUMLICH EXPLIZITE VISUALISIERUNG DER CALLUNA-INDIVIDUEN



Die *Calluna*-Individuen werden als Polygone auf einem Drohnenbild, das in metrischen ► UTM-Koordinaten projiziert vorliegt (Maßstab siehe Koordinatengitter in Metern), räumlich visualisiert. Die Färbung der Polygonumrandung entspricht dem berechneten Blütenanteil pro Individuum. Im Ausschnitt (rotes Rechteck) werden die Blühintensitäten der zwei Zeitabschnitte am Gipfel der Blühphasen gegenübergestellt; für das gesamte Gebiet dargestellt ist die Semivarianz im Abstand zur Entfernung der Individuen.

## GLOSSAR

**1“-CMOS-Sensor:** Ein als complementary metal-oxide-semiconductor aufgebauter Photodetektor zur Umwandlung von Lichtintensität in elektrische Signale.

**Akaike-Informationskriterium:** Kriterium zur Reduktion der Modellkomplexität über eine schrittweise Minimierung der Anzahl erklärender Variablen nach Hirotosugu Akaike.

**Boxplots:** Grafische Darstellung der Werteverteilung, wobei sich innerhalb eines Rechtecks (Box) die mittleren 50 % der Werte befinden.

**Koregistrierung:** Methode der digitalen Bildverarbeitung zur räumlich exakten Überlagerung mehrerer georeferenzierter Bilder.

**Leave-One-Out-Kreuzvalidierung:** Statistische Methode zur Berechnung der Modellgüte, wobei jeweils ein Datenpunkt geschätzt wird, der nicht zur Modellerstellung verwendet wurde.

**Orthomosaik:** Digitales Bild als Draufsicht errechnet aus vielen Einzelbildern.

**Photogrammetrie:** Bildmessverfahren u. a. zur Erstellung von 3D-Punktwolken aus Einzelbildern.

**R<sup>2</sup>:** Bestimmtheitsmaß einer linearen Regression zur Abschätzung der Modellresiduen.

**Räumliche Autokorrelation:** Selbstähnlichkeit von Umweltvariablen in Abhängigkeit von ihrer Entfernung zueinander.

**Resampling:** Methode der digitalen Bildverarbeitung zur Veränderung der Bildauflösung.

**RMSE:** root mean square error, die mittlere Fehlerabweichung zwischen Modellvorhersage und Feldschätzungen.

**Semivarianz:** Die quadrierte Differenz zweier Umweltvariablen, gemittelt über alle Umweltvariablen innerhalb einer definierten Entfernung zueinander.

**UTM-Koordinaten:** Die „universal transverse mercator“-Projektion zur Abbildung der Erdoberfläche in einem kartesischen Koordinatensystem, bestehend aus Y-Wert (Abstand Äquator) und X-Wert (Abstand Mittelmeridian) in Metern.

die spätere Blühphase einzelner *Calluna*-Individuen steht somit den Männchen der Großen Erdhummel in ihrer späteren Flugzeit noch ausreichend Nahrung zur Verfügung.

Aufgrund der zeitlichen Verschiebung des Blühzeitpunktes können zwar Beeinträchtigungen durch Konkurrenz oder Störungen wie beispielsweise durch Fraßfeinde reduziert werden, gleichzeitig kann es aber auch passieren, dass den Bestäuberpopulationen auf Kosten der Reproduktionsraten ungewollt ausgewichen wird. Da klimatische Faktoren die Lebenszyklen übergeordnet bedingen, können Individuen nur begrenzt auf zeitliche Verschiebung reagieren [9, 11]. Es zeigt sich also, dass *trade-offs* zwischen unterschiedlichen biotischen Interaktoren und Pflanzen bestehen können und gleichzeitig auch der Einfluss von klimatischen Standortfaktoren eine besondere Bedeutung für das Reproduktionsverhalten und damit für die zukünftige Einschätzung der Resilienz- und Widerstandsfähigkeit von *Calluna*-Populationen hat.

## Zusammenfassung

Die auf Drohnenaufnahmen basierten KI-Algorithmen ermöglichen es erstmalig, quantitative Aussagen über das Reproduktionsverhalten von *Calluna vulgaris* auf Populationsebene räumlich explizit über mehrere Reproduktionsphasen und individuen-spezifisch für eine große Individuenzahl abzuleiten. Die daraus extrahierten Muster geben überraschende Einsichten in die Variabilität der Blühphänologie von Populationen. So gibt es innerhalb einer Population immer ein Wechselspiel zwischen stark und schwach blühenden Pflanzen. Deren räumliche Konfiguration liefert keine erkennbaren Muster und deren zeitliche Ausprägung ist zwischen den Jahren nicht konstant. Zwar reagiert eine *Calluna*-Population auf sich verändernde Bedingungen mit einem Medianverhalten, d. h. eine Population blüht im Median mehr oder weniger, doch lassen sich daraus keine Rückschlüsse auf das individuelle Blühverhalten ziehen. Noch können wir das komplexe Zusammenspiel von biotischen und abiotischen Faktoren nicht zu einem vollständigen Bild über die Regulierungsmechanismen in Pflanzenpopulationen zusammensetzen. Der Einsatz von Drohnen wird uns zukünftig jedoch erlauben, weitere Informationen und neues Wissen über ökologische Zusammenhänge – insbesondere über die Funktionsweise von komplexen individuellen Interaktionen im Reich der Blütenpflanzen und deren Auswirkungen auf bestäubende Insekten – zu generieren. Dabei werden neue Auswerteverfahren entwickelt, die eine Vielzahl anderer Pflanzeigenschaften abbilden und in den Kontext von Populationsdynamiken stellen können, damit der langfristige Schutz und die Entwicklung natürlicher Lebensräume wissenschaftsbasiert umgesetzt werden können.

## Summary

### Unexpected diversity in the reproduction behaviour of *Calluna vulgaris*

For the first time, AI algorithms based on drone imagery allow us to deduce quantitative statements on the reproductive behaviour of *Calluna vulgaris* individuals at the population level – especially with regard to their spatial distribution at several reproductive phases – which can be done individual-specifically for a large number of individuals. The patterns thus extracted provide surprising insights into the variability of the flowering phenology of populations. For example, there is always an interplay within a population between profusely and weakly flowering individuals. However, their spatial configuration does not provide any recognizable patterns and its temporal appearance between the years does not remain constant. Even though a *Calluna* population reacts to changing environmental conditions with a median behaviour, i. e. a population flowers a lot or a little on average, no conclusions can be drawn from this as to the individual flowering behaviour. We are still unable to piece together the complex interplay of biotic and abiotic factors to draw a complete picture of the regulatory mechanisms in plant populations. In the future, the



use of drones will allow us to generate further information and new knowledge about ecological relationships – in particular about the functioning of complex individual interactions in the realm of flowering plants and their effects on pollinating insects. At the same time, new AI-based evaluation methods are being developed that can map a variety of other plant characteristics and place them in the context of population dynamics so that – based on knowledge – the long-term protection and the development of natural habitats can be implemented.

### Schlagworte:

Blühphänologie, *Calluna vulgaris*, Populationsökologie, intraspezifische Diversität, inter- und intraspezifische Konkurrenz, Musteranalyse, Drohnen, Künstliche Intelligenz

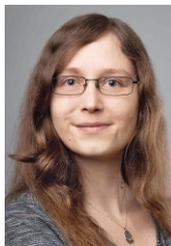
### Literatur

- [1] E. N. Lughadha et al. (2016). Counting counts: revised estimates of numbers of accepted species of flowering plants, seed plants, vascular plants and land plants with a review of other recent estimates. *Phytotaxa* 272, 82–88.
- [2] J. A. Elzinga et al. (2007). Time after time: flowering phenology and biotic interactions. *Trends in Ecology & Evolution* 22, 432–439.
- [3] B. Rathcke, E. P. Lacey (1985). Phenological patterns of terrestrial plants. *Annual review of ecology and systematics* 16, 179–214.
- [4] D. I. Bolnick et al. (2011). Why intraspecific trait variation matters in community ecology. *Trends in ecology & evolution* 26, 183–192.
- [5] D. Scheffler et al. (2017). AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data. *Remote Sensing* 9, 676.
- [6] C. Neumann et al. (2019). The colors of heath flowering – quantifying spatial patterns of phenology in *Calluna* life-cycle phases using high-resolution drone imagery. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, <https://doi.org/10.1002/rse2.121>.
- [7] H. Akaike (1973). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. in B. Petrov and B. Csake (eds), *Second International Symposium on Information Theory Akademiai Kiado, Budapest*.
- [8] P. Willmer (2011). *Pollination and Floral Ecology*. Princeton University Press, New Jersey.
- [9] J. Schmitt (1983). Density-dependent pollinator foraging, flowering phenology, and temporal pollen dispersal patterns in *Linanthus bicolor*. *Evolution* 37, 1247–1257.
- [10] J. M. Gómez (1993). Phenotypic Selection on Flowering Synchrony in a High Mountain Plant, *Hormathophylla spinosa* (Crucifera). *Journal of Ecology* 81(4), 605–613.
- [11] S. Kehrberger, A. Holzschuh (2019). How does timing of flowering affect competition for pollinators, flower visitation and seed set in an early spring grassland plant?

### Verfasst von:



Carsten Neumann studierte Diplom-Geoökologie an der Universität Potsdam und promovierte im Jahr 2017 über bildgebende Spektroskopie für das Naturschutzmonitoring an der Technischen Universität Berlin. Er ist Wissenschaftler am Geoforschungszentrum Potsdam und beschäftigt sich mit Fernerkundungsmethoden zur Erforschung von Biodiversität. Er entwickelt Verfahren der Künstlichen Intelligenz zur Beschreibung von Arten und Lebensräumen vom Satelliten bis zur Drohne.



Vanessa Ochlast absolvierte 2023 den Master in Ökologie, Evolution und Naturschutz an der Universität Potsdam. Im Rahmen des Projektes NaTec-KRH untersuchte sie in ihrer Masterarbeit die Jahrringstrukturen von *Calluna vulgaris* und war als Mitarbeiterin im Forschungsprojekt NaTec-KRH u. a. für das Drohnenmonitoring zuständig.



Michelle Prauß absolvierte den interdisziplinären Masterstudiengang Sustainable Change am Umwelt-Campus Birkenfeld in Rheinland-Pfalz. Im letzten Jahr seiner Laufzeit leitete sie für die Heinz Sielmann Stiftung das Forschungsprojekt NaTec-KRH in Kooperation mit dem Geoforschungszentrum Potsdam. Aktuell ist sie bei der Heinz Sielmann Stiftung als Referentin für Umweltbildung und Bildung für nachhaltige Entwicklung beschäftigt.

### Korrespondenz

Dr. Carsten Neumann  
Geoforschungszentrum Potsdam GFZ – Sektion 1.4  
Telegrafenberg A17, 01.13  
14473 Potsdam  
E-Mail: carsten.neumann@gfz-potsdam.de

### AUSSTELLUNGSTIPP „DER KRAKE“

Das Landesmuseum Mensch und Natur Oldenburg zeigt bis zum 5. Januar 2025 die Sonderausstellung „Der Krake. Kann man ein Seeungeheuer lieben?“ Als Erzähler weist der Krake, ein mythischer Riesenoktopus, den Weg in eine sagenhafte Unterwasserlandschaft: Ihre faszinierende Schönheit und Rätselhaftigkeit wird durch künstlerisch produzierte Filme zum Leben erweckt. Manchmal berührend, oft lustig oder spannend zeigen sie, wie die Menschen seit jeher versuchen, mit der turbulenten Meeresnatur zu leben. Die Macher/-innen der Filme lieben

sich von alten Erzählungen über Menschen und legendäre Meereswesen aus dem niederländischen, deutschen und dänischen Wattenmeer inspirieren. Diese Geschichten thematisieren Probleme unserer Zeit wie Überfischung, steigende Wasserstände und die Folgen des ungebremsten Wirtschaftswachstums. Die Präsentation richtet sich insbesondere an Erwachsene und Familien mit Kindern ab 10 Jahren und ist in den Sprachen Deutsch, Niederländisch und Englisch erlebbar.



ABB. Christiaan Coenrads „Impossible Dates“, Copyright Productiehuis Spinbarg.



Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM  
FÜR DIE**

**BIEWISSENSCHAFTEN**

### **Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:**

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland.
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten.
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf.
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“.
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie.



[www.vbio.de](http://www.vbio.de)

**Jetzt beitreten!**

