Klimatische Determinanten der Verbreitung und Abundanz der Asiatischen Hornisse (*Vespa velutina nigrithorax*) in Europa im Vergleich zu ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet in Asien

I. Einleitung

Die Asiatische Hornisse, *Vespa velutina* Lepeletier, 1836, insbesondere ihre Farbvariante *Vespa velutina nigrithorax* (du Buysson, 1905) , ist eine ursprünglich in Südostasien beheimatete Hornissenart. Seit ihrer versehentlichen Einschleppung nach Frankreich vor 2004, vermutlich über Keramikwaren aus China , hat sie sich zu einer signifikanten invasiven Spezies in Europa entwickelt. Ihre Ausbreitung über zahlreiche europäische Länder erfolgte rapide , was die hohe Invasivität der Art unterstreicht und die Untersuchung klimatischer limitierender Faktoren für die Vorhersage ihrer weiteren Expansion und die Entwicklung von Managementstrategien unerlässlich macht. Die Fokussierung auf *V. v. nigrithorax* ist dabei von entscheidender Bedeutung, da unterschiedliche Unterarten oder Farbvarianten variierende klimatische Toleranzen aufweisen könnten; diese spezifische Form ist für die Bedrohung in Europa verantwortlich.
Dieser Bericht analysiert die klimatischen Determinanten der Verbreitung und Abundanz von *V. v. nigrithorax*, vergleicht ihr natives asiatisches Verbreitungsgebiet – mit besonderem Augenmerk auf die wahrscheinlichen Ursprungsregionen der europäischen Invasion in den ostchinesischen Provinzen Zhejiang und Jiangsu – mit ihrem invadierten europäischen Areal. Ziel ist es zu bewerten, ob spezifische klimatische Faktoren als Grenzen für ihre weitere Ausbreitung fungieren und ihre Populationsabundanzen in Europa beeinflussen können, möglicherweise resultierend in geringeren Dichten als in Teilen ihres natürlichen Verbreitungsgebiets.

II. Vergleichende klimatische Nische: Asien vs. Europa

A. Klimatisches Profil von *Vespa velutina nigrithorax* in ihrem nativen asiatischen Verbreitungsgebiet

Vespa velutina ist in Asien weit verbreitet, von Nordostindien über Süd- und Zentralchina, Taiwan bis nach Indonesien. Dieses Areal umfasst tropische, subtropische und gemäßigte Zonen. Phylogeographische Studien deuten darauf hin, dass die invasive europäische Linie ihren Ursprung in den ostchinesischen Provinzen Zhejiang und Jiangsu hat.
Das Klima in **Zhejiang** ist feucht-subtropisch. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei etwa 17.8

\text{ }^{\circ}\text{C}, mit einem Januarmittel von ca. 5.6 \text{ }^{\circ}\text{C} und einem Julimittel von ca. 30 \text{ }^{\circ}\text{C}. Der jährliche Niederschlag beträgt zwischen 1340 mm und 1570 mm, wobei die Niederschläge ganzjährig relativ hoch sind und Spitzen im späten Frühling/Frühsommer (Pflaumenregen) sowie im Spätsommer/Frühherbst (Taifune) erreichen. Die trockensten Monate sind tendenziell im Spätherbst/Winter, beispielsweise Dezember mit etwa 35-67 mm.
Jiangsu weist ebenfalls ein feucht-subtropisches Klima mit vier ausgeprägten Jahreszeiten auf. Die Jahresmitteltemperatur liegt zwischen 13.6 \text{ }^{\circ}\text{C} und 16.1 \text{ }^{\circ}\text{C}. Das Januarmittel schwankt zwischen -1.0 \text{ }^{\circ}\text{C} und 3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}, das Julimittel zwischen 26 \text{ }^{\circ}\text{C} und 28.8 \text{ }^{\circ}\text{C}. Für Yancheng (Jiangsu) beträgt das Januarmittel 4.4 \text{ }^{\circ}\text{C} und das Julimittel 27.8 \text{ }^{\circ}\text{C}. Der Jahresniederschlag variiert zwischen 704 mm und 1250 mm, mit konzentrierten Regenfällen und ausgeprägten Pflaumenregenperioden. In Yancheng beträgt der Jahresniederschlag ca. 1057 mm, wobei der trockenste Monat der Dezember (ca. 48.5 mm) und der feuchteste der August (ca. 160 mm) ist.
Bemerkenswert ist, dass *V. velutina* selbst in tropischen/subtropischen Teilen ihres natürlichen Verbreitungsgebiets (z.B. Nordostindien, Südchina, Indonesien) häufig in kühleren Hochlandregionen nistet, deren Klima dem südeuropäischen ähnlicher ist. Dies deutet auf eine inhärente Flexibilität oder Präferenz für Bedingungen hin, die nicht permanent heiß und feucht sind. Die Existenz der Art in diesen asiatischen Hochländern mit gemäßigteren Bedingungen könnte eine Form der Präadaptation darstellen, die ihre Invasion in das temperate Europa begünstigt hat. Wäre die Art ausschließlich in heißen, feuchten tropischen Tiefebenen Asiens verbreitet, wäre ihr Erfolg im gemäßigten Europa überraschender.

B. Klimatisches Profil im invadierten europäischen Verbreitungsgebiet

V. velutina nigrithorax hat sich in weiten Teilen Europas etabliert, darunter Frankreich, Spanien, Portugal, Italien, Deutschland, Großbritannien, die Niederlande, Belgien, die Schweiz, Luxemburg, Irland, Ungarn und Österreich.
Als besonders geeignet werden die Atlantikküste und Teile der Mittelmeerküste beschrieben. Modelle prognostizieren eine hohe Eignung für Frankreich, Spanien, Portugal, Italien, Belgien, die Niederlande, Dänemark, Deutschland, Großbritannien und Irland. Die nördlichsten etablierten Populationen befinden sich derzeit in Hamburg, Deutschland , mit Sichtungen auch in Großbritannien , den Niederlanden und einer möglichen Ausbreitung bis nach Südskandinavien.
Die besiedelten europäischen Klimate umfassen:

- **Atlantisches Klima** (z.B. Westfrankreich, Nordspanien, Großbritannien): Gekennzeichnet durch milde, feuchte Winter, warme Sommer und ganzjährige Niederschläge. Dies korreliert mit der Präferenz der Hornisse für höhere Niederschläge im trockensten Monat im Vergleich zu ihrem Ursprungsgebiet und geringerer Kontinentalität.
- **Mediterranes Klima** (z.B. Südfrankreich, Italien, Teile Spaniens): Milde, feuchte Winter und heiße, trockene Sommer. Die Sommertrockenheit könnte ein Stressfaktor sein, jedoch weisen Küstenbereiche oft höhere Luftfeuchtigkeit auf. Die Präsenz in Galizien (NW-Spanien) bei hoher Luftfeuchtigkeit und moderaten Temperaturen ist dokumentiert.
- **Kontinentales Klima** (z.B. Teile Deutschlands, Tschechien): Kältere Winter, wärmere Sommer, größere Temperaturamplitude. Diese Gebiete werden als suboptimal

vorhergesagt , da eine geringere Kontinentalität bevorzugt wird.

C. Klimatische Hauptunterschiede und Nischendynamik

Ein entscheidender Unterschied ist, dass die invadierten europäischen Gebiete tendenziell **mehr Niederschlag während des trockensten Monats** aufweisen als die asiatischen Ursprungsregionen. Dies deutet darauf hin, dass *V. velutina* möglicherweise weniger tolerant gegenüber längeren Trockenperioden ist oder dass die durchweg feuchteren Bedingungen in Europa die Nistplatzwahl und Ressourcenverfügbarkeit begünstigen. Die Verfügbarkeit von Wasser ist für den Nestbau (Vermischung von zerkauten Pflanzenfasern mit Wasser oder Speichel) und die Aufrechterhaltung des Nestmikroklimas essentiell. Ein durchgängigeres Feuchtigkeitsangebot auch in den Sommermonaten könnte somit einen Umweltstressor reduzieren, der in Teilen ihres natürlichen Verbreitungsgebiets vorhanden ist.
V. velutina scheint eine **geringere Kontinentalität** zu bevorzugen, d.h. kleinere jährliche Temperaturschwankungen und somit eine größere thermische Stabilität. Dies wird durch ihren Erfolg in maritimen europäischen Klimazonen untermauert. Die Ursprungsregionen in Ostchina (Zhejiang, Jiangsu) sind zwar feucht-subtropisch mit ausgeprägten Jahreszeiten, aber im Vergleich zu stark kontinentalen Binnenregionen durch Küstennähe gemäßigt.
Studien deuten darauf hin, dass *V. velutina* in Europa noch nicht im Gleichgewicht mit ihrer Umwelt ist , was bedeutet, dass sich ihre realisierte Nische noch ausdehnen oder verschieben könnte. Die Hypothese der klimatischen Nischenkonservierung besagt jedoch, dass sich invasive Arten primär in Regionen ausbreiten, die ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet klimatisch ähneln. Lioy et al. (2023) untersuchten die realisierte klimatische Nische in Europa und verglichen sie mit nativen *Vespa*-Arten. Dabei zeigte sich, dass *Vespa crabro* besser an kalte/trockene und *Vespa orientalis* besser an aride Bedingungen angepasst ist, während *V. v. nigrithorax* eine intermediäre Nische einnimmt. Diese intermediäre klimatische Positionierung deutet darauf hin, dass *V. v. nigrithorax* zwar ein breites Spektrum gängiger europäischer Klimate nutzen kann, extreme Kälte-/Trocken- oder Aridzonen jedoch Refugien für heimische Hornissenarten darstellen könnten. Dies könnte die Dominanz oder Abundanz von *V. velutina* in diesen spezifischen peripheren Umgebungen begrenzen und eher zu einem Mosaik der Dominanz als zu einer vollständigen Verdrängung führen.

Tabelle 1: Vergleichende klimatische Bedingungen für *Vespa velutina nigrithorax* in der nativen Ursprungsregion (Ostchina) vs. invadierte europäische Zonen.

Klimatische Variable	Native Ursprungsregion (Ostchina: Zhejiang/Jiangsu)	Invadierte europäische Zonen (Beispiele)
Jahresmitteltemperatur	13.6 \text{ }^{\circ}\text{C} bis 17.8 \text{ }^{\circ}\text{C}	Atlantisch (z.B. W-Frankreich): \sim 12 \text{ }^{\circ}\text{C}; Mediterran (z.B. S-Frankreich): \sim 14 \text{ }^{\circ}\text{C}; Kontinental (z.B. Deutschland): \sim 9 \text{ }^{\circ}\text{C} (Allgemeine Werte, spezifische Daten variieren stark)
Mittlere Januartemperatur	-1.0 \text{ }^{\circ}\text{C} bis 5.6 \text{ }^{\circ}\text{C}	Atlantisch: \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C}; Mediterran: \sim 6 \text{ }^{\circ}\text{C}; Kontinental: \sim 0 \text{

Klimatische Variable	Native Ursprungsregion (Ostchina: Zhejiang/Jiangsu)	Invadierte europäische Zonen (Beispiele)
		}^{\circ}\text{C} bis -2 \text{ }^{\circ}\text{C}
Mittlere Julitemperatur	26 \text{ }^{\circ}\text{C} bis 30 \text{ }^{\circ}\text{C}	Atlantisch: \sim 19 \text{ }^{\circ}\text{C}; Mediterran: \sim 24 \text{ }^{\circ}\text{C}; Kontinental: \sim 19 \text{ }^{\circ}\text{C}
Jährlicher Niederschlag	704 \text{ mm} bis 1570 \text{ mm}	Atlantisch: 600\text{ mm} bis 1200 \text{ mm}; Mediterran: 400\text{ mm} bis 800 \text{ mm} (oft mit Sommertrockenheit); Kontinental: 500\text{ mm} bis 800 \text{ mm}
Niederschlag im trockensten Monat	Zhejiang (Dez): 35\text{ mm} bis 67 \text{ mm} ; Jiangsu (Dez): \sim 48.5 \text{ mm}	Generell höher in vielen invadierten europäischen Gebieten als im nativen Ursprungsgebiet (z.B. atlantische Gebiete oft >40-50mm auch im Sommer)
Relative Luftfeuchtigkeit (Mittel)	Zhejiang: \sim 74\% ; Jiangsu (Yancheng): \sim 78\%	Atlantisch: oft >70-75%; Mediterran: Sommer oft niedriger, aber Küstenbereiche feuchter; Kontinental: variabel
Temperatur-Saisonalität	Moderat bis ausgeprägt (subtropisch)	Atlantisch: gering; Mediterran: moderat (heiße Sommer); Kontinental: hoch

Anmerkung: Europäische Werte sind generalisiert und können je nach spezifischer Lokalität stark variieren. Die Tabelle dient dem qualitativen Vergleich der generellen Klimatypen.

III. Potenziell limitierende klimatische Faktoren für Ausbreitung und Abundanz in Europa

A. Temperaturbedingte Einschränkungen

1. Kältetoleranz und Überwinterungserfolg

Die Überwinterung erfolgt ausschließlich durch begattete Königinnen (Gynen). Diese suchen geschützte Orte wie Erdhöhlen, Laubhaufen, morsches Holz, Baumhöhlen oder Bereiche unter Baumrinde sowie menschengemachte Strukturen auf. Der Unterkühlungspunkt (Supercooling Point, SCP), also die Temperatur, bei der die Körperflüssigkeiten spontan gefrieren, liegt für Königinnen von *V. velutina* bei -11.3 \pm 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}. Arbeiterinnen weisen einen höheren SCP von -6.5 \text{ }^{\circ}\text{C} auf. Dieser niedrigere SCP der Königinnen ist eine entscheidende Anpassung an die Überwinterung.

Königinnen erwachen aus der Winterruhe, wenn die Temperaturen steigen, beispielsweise Mitte Februar bei über 13 \text{ }^{\circ}\text{C} oder im März in Europa. Andere Quellen nennen einen Zeitraum von Mitte März bis Ende Juni. Allgemein wird *V. velutina* eine geringe Kältetoleranz zugeschrieben. Der SCP von -11.3 \text{ }^{\circ}\text{C} legt nahe, dass Regionen mit langanhaltenden oder häufigen Temperaturen unterhalb dieses Schwellenwerts, insbesondere in exponierten Überwinterungsquartieren ohne thermische Pufferung (z.B. durch Schneedecken oder Bodentiefe), eine hohe Königinnenmortalität aufweisen könnten. Dies würde die Etablierung und Abundanz begrenzen. Europäische Winterhärtezonen und Bodentemperaturdaten könnten herangezogen werden, um Regionen zu identifizieren, in denen dieser Schwellenwert regelmäßig unterschritten wird. Keeling et al. (2017) nahmen für Großbritannien eine lineare Abnahme der Anzahl neuer Königinnen pro Nest mit zunehmender geografischer Breite an, wobei der Reproduktionserfolg in Nordengland auf null sinkt, was mit Vorhersagen für *Vespa crabro* übereinstimmt. Dies deutet auf eine nördliche klimatische Grenze hin, die mit dem erfolgreichen Abschluss des Reproduktionszyklus zusammenhängt.

2. Wärmetoleranz

Die obere letale Temperatur für *V. velutina* wurde mit 45.7 \text{ }^{\circ}\text{C} bestimmt. Im Labor kann die Art ihren Lebenszyklus unter einer breiten Temperaturbedingung von 14 \text{ }^{\circ}\text{C} bis 25 \text{ }^{\circ}\text{C} vollenden. Die Nester können auf einer konstanten Temperatur von etwa 30 \text{ }^{\circ}\text{C} gehalten werden, selbst wenn die Umgebungstemperaturen 20 \text{ }^{\circ}\text{C} niedriger sind. Optimale Sammelaktivitäten wurden zwischen 17 \text{ }^{\circ}\text{C} und 26 \text{ }^{\circ}\text{C} beobachtet , wobei Aktivitäten generell zwischen 5 \text{ }^{\circ}\text{C} und 38 \text{ }^{\circ}\text{C} stattfinden. Obwohl die Art aus tropischen/subtropischen Regionen stammt, könnten extreme Hitzeperioden jenseits ihres optimalen Aktivitäts- oder Überlebensbereichs, insbesondere in Kombination mit Trockenheit, die Aktivität, Sammeleffizienz und potenziell die Kolonieentwicklung oder das Überleben beeinträchtigen. Die letale Grenze von 45.7 \text{ }^{\circ}\text{C} ist zwar hoch, aber anhaltender subletaler Hitzestress könnte dennoch schädlich sein.

B. Niederschlags- und Feuchtigkeitsbedingte Einschränkungen

1. Niederschlagsregime

Die invadierten europäischen Gebiete erhalten während des trockensten Monats mehr Niederschlag als das asiatische Ursprungsgebiet. Dies deutet auf eine potenzielle Anfälligkeit gegenüber Dürreperioden hin. Wasser wird für den Nestbau benötigt , und eine starke Korrelation zwischen Hornissenpräsenz und der Nähe zu hydrographischen Netzwerken wurde festgestellt. Das Modell von Bessa et al. (2016) prognostizierte, dass die trockensten südlichen Regionen der Iberischen Halbinsel wahrscheinlich nicht besiedelt werden , was impliziert, dass Dürre oder geringe Niederschläge signifikante limitierende Faktoren sind. Starkregen kann sich nachteilig auf die Sammelaktivitäten auswirken , und Primärnester werden oft in Hohlräumen gebaut, um sie vor Wind und Regen zu schützen.

2. Luftfeuchtigkeit

Hohe Minimaltemperaturen, Taupunkttemperaturen und relative Luftfeuchtigkeit begünstigen das Vorkommen und die Ausbreitung, was in Küstenregionen häufig der Fall ist. Optimale

Sammelaktivitäten fallen oft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von >60% zusammen. Küstenregionen mit atlantischem Klima (hohe Luftfeuchtigkeit, Tau, moderate Temperaturen) ähneln ihrem natürlichen Habitat und unterstützen Laubbäume für Nistmaterial. Umgekehrt könnten sehr trockene Bedingungen (niedrige Luftfeuchtigkeit) in Kombination mit hohen Temperaturen den Austrocknungsstress erhöhen und die Aktivität oder das Überleben einschränken, insbesondere wenn Wasserquellen knapp sind.

C. Einfluss von Kontinentalität und klimatischer Saisonalität

V. velutina bevorzugt wahrscheinlich eine geringere Kontinentalität, d.h. geringere jährliche Temperaturschwankungen und somit eine größere thermische Stabilität. Dies wird durch ihre Prävalenz in den atlantischen Küstenregionen Europas gestützt. Zunehmende Temperatursaisonalität (z.B. von West nach Ost in der Tschechischen Republik) korreliert mit abnehmender Habitateignung. Modelle von Barbet-Massin et al. (2013) schlossen die Temperatursaisonalität als Schlüsselvariable ein. Eine hohe Saisonalität (kalte Winter und heiße Sommer) im kontinentalen Binnenland könnte eine erhebliche Einschränkung darstellen. Ebenso ist eine zunehmende Niederschlagssaisonalität (ausgeprägte Unterschiede zwischen Sommer- und Winterniederschlägen), wie sie im Osten der Tschechischen Republik zu beobachten ist, mit einer geringeren Eignung verbunden. Auch Barbet-Massin et al. (2013) berücksichtigten die Niederschlagssaisonalität. Die Betonung der *Saisonalität* (Temperatur und Niederschlag) als limitierender Faktor ist differenzierter als einfache mittlere Temperaturschwellen. Regionen mit geeigneten Jahresmitteltemperaturen könnten dennoch ungeeignet sein, wenn die saisonalen Extreme zu groß sind und die Dauer der aktiven Saison für die Kolonieentwicklung und Reproduktion beeinflussen. Eine kurze, kühle Sommerperiode nach einem strengen Winter, selbst wenn der SCP im Winter nicht unterschritten wird, könnte verhindern, dass Kolonien eine ausreichende Größe zur Produktion neuer Königinnen erreichen und somit die Persistenz der Population einschränken.

D. Hinweise aus europäischen Regionen mit geringer Abundanz oder Abwesenheit

Die trockensten südlichen Regionen der Iberischen Halbinsel werden aufgrund von Aridität als unbesiedelt prognostiziert. Osttschechien weist aufgrund höherer Kontinentalität und Niederschlagssaisonalität eine geringere Eignung auf. Obwohl die Art in Asien in kühleren Hochlandregionen nistet , könnten extreme Kälte und kürzere Vegetationsperioden in europäischen alpinen Regionen (z.B. Alpen, Pyrenäen) die Etablierung begrenzen oder zu geringerer Abundanz führen. Daten zu Höhengrenzen in Europa sind in den vorliegenden Informationen spärlich, obwohl eine obere Grenze von 750 m ü.M. für die Nistung in mediterranen Gebieten für eine Studie berücksichtigte. Die Kombination aus kalten Wintern *und* trockenen Bedingungen, wie sie von Lioy et al. (2023) für die Nische von *V. crabro* angedeutet wird , könnte einen stärkeren kumulativen Stress darstellen als jeder Faktor für sich und potenziell schärfere Grenzen in kontinentalen Regionen mit trockenen Wintern definieren. Überwinternde Königinnen müssen sowohl Erfrieren als auch Austrocknung vermeiden. Kalte, trockene Luft erhöht das Austrocknungsrisiko. Wenn geeignete feuchte Hibernacula in kalten, trockenen Umgebungen knapp sind, könnten die Überlebensraten sinken, selbst wenn die absoluten Minimaltemperaturen nicht immer den SCP erreichen.
Klimatische Begrenzungen sind wahrscheinlich keine absoluten "An/Aus"-Schalter über große

Gebiete, sondern werden eher Gradienten der Eignung erzeugen, die zu einem "Auslaufen" der Abundanz in Richtung marginaler Zonen führen, anstatt zu einer scharfen, undurchdringlichen klimatischen Mauer. Taschen günstiger Mikroklimata (z.B. städtische Wärmeinseln, geschützte Flusstäler) könnten die Persistenz in allgemein weniger geeigneten Regionen ermöglichen, was mit der "Abundant Centre Hypothesis" übereinstimmt, die besagt, dass die Populationsdichte zu den Rändern des Verbreitungsgebiets hin abnimmt, wo die Habitateignung geringer ist.

Tabelle 2: Identifizierte klimatische Schwellenwerte und limitierende Faktoren für *Vespa velutina nigrithorax* in Europa.

Klimatischer Faktor	Spezifische Werte/Beobachtungen	Einfluss auf Ausbreitung/Abundanz	Hauptquellen
Min. Überwinterungstemp. Königin (SCP)	-11.3 \pm 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}	Limitiert nördliche/altitudinale Ausbreitung; hohe Mortalität bei Unterschreitung in exponierten Hibernacula	
Obere Letaltemperatur	45.7 \text{ }^{\circ}\text{C}	Begrenzt Aktivität/Überleben bei extremer Hitze	
Bevorzugter Temperaturbereich für Sammelaktivität	17 \text{ }^{\circ}\text{C} bis 26 \text{ }^{\circ}\text{C} (aktiv 5 \text{ }^{\circ}\text{C} bis 38 \text{ }^{\circ}\text{C})	Reduzierte Sammelaktivität außerhalb dieses Bereichs, beeinflusst Koloniewachstum	
Min. Niederschlag im trockensten Monat	Präferenz für Gebiete mit mehr Niederschlag im trockensten Monat als im nativen Ursprungsgebiet; genauer Schwellenwert unklar, aber Trockenheit limitierend	Begrenzt Etablierung in ariden/semi-ariden Zonen (z.B. Süd-Iberien)	
Max. tolerable Temperatursaisonalität/ Kontinentalität	Präferenz für geringe Kontinentalität/Temperatursaisonalität	Reduziert Eignung und Abundanz in stark kontinentalen Regionen mit hohen saisonalen Temperaturschwankungen	
Luftfeuchtigkeit Präferenz	Bevorzugt hohe relative Luftfeuchtigkeit (>60% für optimale Sammelaktivität), Tau	Geringe Luftfeuchtigkeit, besonders bei Hitze, kann Stress verursachen und Aktivität limitieren; begünstigt in	

Klimatischer Faktor	Spezifische Werte/Beobachtungen	Einfluss auf Ausbreitung/Abundanz	Hauptquellen
		Küstenregionen	

IV. Implikationen des Klimawandels

A. Prognostizierte Verschiebungen der klimatischen Eignung in Europa

Der Klimawandel wird voraussichtlich die klimatische Eignung für *V. velutina* in der nördlichen Hemisphäre, insbesondere in Europa, generell erhöhen. Modelle prognostizieren eine Expansion nach Norden bis Südskandinavien und nach Osten in Zentral- und Osteuropa (z.B. Schweiz bis Ungarn, Polen, Weißrussland, Süd-Schweden, Dänemark, Nordwest-Deutschland). Auch für Großbritannien und Irland wird eine zukünftige Ausdehnung des Verbreitungsgebiets bzw. eine Überlappung mit Honigbienen prognostiziert.
Barbet-Massin et al. (2013) verwendeten acht klimatische Variablen für ihre Projektionen: Jahresmitteltemperatur, Mitteltemperatur des wärmsten/kältesten Monats, Temperatursaisonalität, Jahresniederschlag, Niederschlag des feuchtesten/trockensten Monats und Niederschlagssaisonalität. Eine Abnahme der Temperatursaisonalität wird als Hauptursache für eine zunehmende Überlappung mit Honigbienen in Europa unter zukünftigen Szenarien angesehen. Die größten Zunahmen der Eignung werden für Spanien, die Schweiz, Süddeutschland, Dänemark, Süd-Schweden, Polen und von der Nordadria bis Ungarn/Rumänien prognostiziert.

B. Potenzial für veränderte Abundanzmuster

Wo die klimatische Eignung zunimmt, ist auch mit einer Zunahme der Populationsabundanz zu rechnen, sofern andere Faktoren (Beute, Nistplätze) nicht limitierend wirken. Während die meisten Prognosen eine Expansion vorhersagen, könnten einige Regionen weniger geeignet werden, wenn beispielsweise Dürren über die Toleranzgrenze der Art hinaus zunehmen, selbst wenn die Durchschnittstemperaturen steigen. Der Erfolg von *V. velutina* unter dem Klimawandel wird nicht nur von sich verschiebenden Eignungszonen abhängen, sondern auch von ihrer Anpassungsfähigkeit im Verhältnis zur Geschwindigkeit der klimatischen Veränderungen und der Reaktion ihrer Beutetiere und Konkurrenten. Die aktuelle Einschätzung, dass sie sich "noch nicht im Gleichgewicht" befindet , deutet darauf hin, dass ihr volles invasives Potenzial selbst unter *aktuellen* klimatischen Bedingungen noch nicht ausgeschöpft ist.
Der Klimawandel könnte die Auswirkungen in derzeit geeigneten Gebieten verschärfen, indem beispielsweise die aktive Saison verlängert wird, was größere Koloniegrößen und eine höhere Reproduktionsleistung ermöglicht. Wärmere Frühlinge könnten zu einem früheren Erwachen der Königinnen und einer früheren Nestgründung führen. Längere, wärmere Herbste könnten die Sammel- und Reproduktionsperiode ausdehnen. Beides könnte zu größeren, erfolgreicheren Kolonien führen, die mehr neue Königinnen produzieren und somit die lokale Abundanz und den Ausbreitungsdruck erhöhen. Auch das native asiatische Verbreitungsgebiet könnte sich durch den Klimawandel nach Norden ausdehnen.

V. Synthese und Ausblick

Die klimatischen Bedingungen in weiten Teilen West- und Südeuropas sind für *Vespa velutina nigrithorax* sehr günstig, was ihre rasche Ausbreitung erklärt. Die primären klimatischen Unterschiede zwischen ihrem ostasiatischen Ursprungsgebiet und den invadierten europäischen Zonen liegen in den Niederschlagsmustern (insbesondere mehr Niederschlag im trockensten Monat in Europa) und der geringeren Kontinentalität vieler europäischer Regionen, die von der Hornisse bevorzugt wird.
Signifikante klimatische Grenzen, die ihre weitere Expansion in Europa verlangsamen oder limitieren könnten, sind vor allem strenge Winterkälte (tiefe Minimaltemperaturen, die das Überleben der Königinnen gefährden, deren SCP bei -11.3 \text{ }^{\circ}\text{C} liegt) und hohe Kontinentalität bzw. Temperatursaisonalität. Diese Faktoren dürften die Ausbreitung nach Osten und Norden in tief kontinentale und boreale/arktische Regionen Europas begrenzen. Aridität, d.h. geringe Niederschläge insbesondere im Sommer und hohe Temperaturen, stellt eine Barriere für die Expansion in trockenere Binnenregionen im Süden dar, wie beispielsweise auf der Iberischen Halbinsel. Ähnliche Begrenzungen durch Winterkälte und kurze Aktivitätsperioden sind in Hochgebirgslagen wie den Alpen und Pyrenäen zu erwarten.
Hinsichtlich der Abundanz deuten die klimatischen Faktoren darauf hin, dass Teile Westeuropas (insbesondere atlantisch geprägte Regionen) sehr günstige Bedingungen bieten. Hier könnten Populationen hohe Dichten erreichen, die mit denen in optimalen Zonen ihres natürlichen Verbreitungsgebiets vergleichbar oder aufgrund des geringeren Drucks durch natürliche Feinde in Europa sogar höher sein könnten. In europäischen Regionen mit extremeren kontinentalen Klimaten (kältere Winter, heißere/trockenere Sommer, höhere Saisonalität) ist jedoch mit geringeren Abundanzen zu rechnen als in optimalen europäischen oder nativen Zonen. Europa ist also nicht einheitlich anfällig; klare klimatische Gradienten werden voraussichtlich zu einem heterogenen Muster des Invasionserfolgs und der Abundanz führen, mit Kerngebieten hoher Dichte und peripheren Zonen geringer Dichte oder nur vorübergehender Präsenz.
Der Klimawandel wird diese Grenzen voraussichtlich verschieben und im Allgemeinen eine weitere Expansion nach Nord- und Osteuropa begünstigen. Das Zusammenspiel mit anderen ökologischen Faktoren (Beuteverfügbarkeit, Konkurrenz, natürliche Feinde) wird jedoch letztendlich ihre zukünftige Verbreitung und Abundanz formen. Eine wichtige offene Frage für präzisere Vorhersagen der Verbreitungsgrenzen ist, wie die thermische Pufferkapazität verschiedener Überwinterungshabitate (z.B. Bodentiefe, Baumhöhlen, menschengemachte Strukturen) über die europäischen Klimazonen variiert und wie dies mit den Umgebungstemperaturen im Winter interagiert, um die tatsächlichen Überlebensraten der Königinnen an den Rändern des Verbreitungsgebiets der Art zu bestimmen. Der SCP von -11.3 \text{ }^{\circ}\text{C} bezieht sich auf das Insekt selbst; die tatsächlich von einer überwinternden Königin erfahrene Temperatur hängt von ihrem gewählten Mikrohabitat ab. Wenn Königinnen in kälteren Regionen besser darin sind, gut isolierte Standorte zu finden, oder wenn Schneebedeckung Isolierung bietet, könnten sie überleben, selbst wenn die Umgebungslufttemperaturen unter den SCP fallen.
Fortlaufendes Monitoring und Forschung zur lokalen Anpassung, zu mikroklimatischen Einflüssen und den Auswirkungen extremer Wetterereignisse (Hitzewellen, Dürren, strenge Winter) sind entscheidend für die Verfeinerung von Prognosen und Managementstrategien.

Quellenangaben

1. Asian hornet - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Asian_hornet 2. Vespa velutina (Asian hornet) | CABI Compendium, https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.109164 3. Phylogeographic

Analysis for Understanding Origin, Speciation, and ..., https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11509734/ 4. The northernmost record of the Asian hornet Vespa velutina ..., https://evolsyst.pensoft.net/article/47358/ 5. (PDF) Vespa velutina: A new invasive predator of honeybees in ..., https://www.researchgate.net/publication/258769112_Vespa_velutina_A_new_invasive_predator_of_honeybees_in_Europe 6. Invasion dynamics of Asian hornet, Vespa velutina (Hymenoptera: Vespidae): a case study of a commune in south-west France, https://d-nb.info/1129421589/34 7. Countering the spread of the Asian hornet in Europe - Invasive Species Blog, https://blog.invasive-species.org/2023/08/25/countering-the-spread-of-the-asian-hornet-in-europe/ 8. Climate change increases the risk of invasion by the Yellow-legged hornet Vespa velutina var. nigrithorax (Hym.: Vespidae) - Frelon Asiatique, https://frelonasiatique.mnhn.fr/wp-content/uploads/sites/10/2015/07/Rome_IICW_Orleans_09-2015.pdf 9. Invasive hornets on the road: motorway-driven dispersal must be considered in management plans of Vespa velutina - NeoBiota, https://neobiota.pensoft.net/article/71352/ 10. What is the Asian hornet invasion going to cost Europe? - EurekAlert!, https://www.eurekalert.org/news-releases/608168 11. Predicting the spread of the Asian hornet (Vespa velutina) following its incursion into Great Britain, https://www.nationalbeeunit.com/assets/PDFs/4_Science_and_engagement/Scientific_journal_publications/2016-to-2020/2017_04_Keeling_et_al-2017-Scientific_Reports.pdf 12. Vespa velutina | North American Hornet Screening Tool - IDtools, https://idtools.org/hornet_screening/index.cfm?packageID=1099&entityID=2797 13. www.reabic.net, https://www.reabic.net/journals/bir/2024/3/BIR_2024_Walter_etal.pdf 14. Vespa velutina - IAS workshop.docx - CIRCABC, https://circabc.europa.eu/sd/a/88de8ace-4f0c-4dbc-97c5-1c524c0664f5/Vespa%20velutina%20-%20IAS%20workshop.docx 15. Scientific name Vespa velutina Common name Asian hornet Broad group Invertebrate Number of and countries wherein the species is, https://pra.eppo.int/getfile/4f841be7-9f10-46a0-bd7c-0726aa487f65 16. Asian Hornet Vespa velutina - Information Portal » NNSS, https://www.nonnativespecies.org/non-native-species/information-portal/view/3826 17. Vespa velutina | Asian hornet - Species Profile, https://species.biodiversityireland.ie/profile.php?taxonId=187087&taxonName=vespa%20velutina 18. Yellow-legged Hornet in North America | Bee Culture, https://beeculture.com/yellow-legged-hornet-in-north-america/ 19. Phylogeographic Analysis for Understanding Origin, Speciation, and Biogeographic Expansion of Invasive Asian Hornet, Vespa velutina Lepeletier, 1836 (Hymenoptera, Vespidae) - MDPI, https://www.mdpi.com/2075-1729/14/10/1293 20. (PDF) The origin and genetic diversity of the yellow-legged hornet, Vespa velutina introduced in Japan - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/313792166_The_origin_and_genetic_diversity_of_the_yellow-legged_hornet_Vespa_velutina_introduced_in_Japan 21. Climate & Weather Averages in Zhejiang, Zhejiang, China - Time and Date, https://www.timeanddate.com/weather/@1784764/climate 22. Climate & Weather Averages in Zhejiang, Guangxi, China - Time and Date, https://www.timeanddate.com/weather/@9898779/climate 23. Jiangsu Climate & Weather - Top China Travel, https://www.topchinatravel.com/jiangsu/jiangsu-climate-and-weather.htm 24. Climate & Weather Averages in Yancheng, Jiangsu, China - Time and Date, https://www.timeanddate.com/weather/@1787746/climate 25. Asian hornet - AGES, https://www.ages.at/en/human/disease/pathogens-from-a-to-z/asian-hornet 26. Monitoring Study in Honeybee Colonies Stressed by the Invasive Hornet Vespa velutina,

https://www.mdpi.com/2306-7381/9/4/183 27. www.entomologie.org, https://www.entomologie.org/rails/active_storage/blobs/redirect/eyJfcmFpbHMiOnsibWVzc2FnZSI6IkJBaHBBaVVFIiwiZXhwIjpudWxsLCJwdXIiOiJibG9iX2lkIn19--8a4ce9e68c14753ecc7acc1ddd6ad13b9fe18f9c/Schorkopf%20et%20al.%202025,%20first%20report,%20Vespa%20velutina.pdf 28. Study shows action to eradicate yellow-legged (Asian) hornet has been effective, https://www.ceh.ac.uk/press/study-shows-action-eradicate-yellow-legged-asian-hornet-has-been-effective 29. (PDF) First Czech record of the Asian hornet (Vespa velutina) and a ..., https://www.researchgate.net/publication/378762300_First_Czech_record_of_the_Asian_hornet_Vespa_velutina_and_a_climatic_prediction_of_its_spread_in_the_Czech_Republic 30. The invasion, provenance and diversity of Vespa velutina Lepeletier (Hymenoptera: Vespidae) in Great Britain | PLOS One, https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185172 31. Climate change increases the risk of invasion by the Yellow-legged hornet - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/233851908_Climate_change_increases_the_risk_of_invasion_by_the_Yellow-legged_hornet 32. Future Range Expansions of Invasive Wasps Suggest Their Increasing Impacts on Global Apiculture - PubMed Central, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11276961/ 33. Europe - Climate, Regions, Weather | Britannica, https://www.britannica.com/place/Europe/Climate 34. Hive Under Siege: The Growing Threat of Hornets to Bee Colonies - Blog Véto-pharma, https://www.blog-veto-pharma.com/en/how-to-combat-the-hornet-growing-threat-to-pollinators/ 35. Continental climate - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Continental_climate 36. Embryo, Relocation and Secondary Nests of the Invasive Species Vespa velutina in Galicia (NW Spain) - PubMed Central, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9597825/ 37. Using ecological niche modeling to model invasion risk of hornets (Hymenoptera: Vespidae) in Iran - Journal of Ecology and Environment, https://www.e-jecoenv.org/journal/view.html?doi=10.5141/jee.24.071 38. Using ecological niche modeling to model invasion risk of hornets (Hymenoptera: Vespidae) in Iran, https://www.e-jecoenv.org/journal/download_pdf.php?doi=10.5141/jee.24.071 39. Climatic Niche Differentiation between the Invasive Hornet Vespa velutina nigrithorax and Two Native Hornets in Europe, Vespa crabro and Vespa orientalis - MDPI, https://www.mdpi.com/1424-2818/15/4/495 40. (PDF) Climatic Niche Differentiation between the Invasive Hornet Vespa velutina nigrithorax and Two Native Hornets in Europe, Vespa crabro and Vespa orientalis - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/369580902_Climatic_Niche_Differentiation_between_the_Invasive_Hornet_Vespa_velutina_nigrithorax_and_Two_Native_Hornets_in_Europe_Vespa_crabro_and_Vespa_orientalis 41. Characterizing thermal tolerance in the invasive yellow-legged hornet (Vespa velutina nigrithorax): The first step toward a green control method - PubMed Central, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7537856/ 42. Climatic Niche Differentiation between the Invasive Hornet Vespa velutina nigrithorax and Two Native Hornets in Europe, Vespa crabro and Vespa orientalis - RNfinity, https://www.rnfinity.com/article-show/climatic-niche-differentiation-between-the-invasive-hornet-vespa-velutina-nigrithorax-and-two-native-hornets-in-europe-vespa-crabro-and-vespa-orientalis 43. Embryo, Relocation and Secondary Nests of the Invasive Species Vespa velutina in Galicia (NW Spain) - MDPI, https://www.mdpi.com/2076-2615/12/20/2781 44. Behaviour of Vespa velutina nigrithorax (Hymenoptera: Vespidae) under Controlled Environmental Conditions - MDPI, https://www.mdpi.com/2075-4450/14/1/59 45. Yellow Legged Hornet – Part 2 Life Cycle and Biology | Coastal Georgia Botanical Gardens, https://coastalbg.uga.edu/2023/08/yellow-legged-hornet-part-2-life-cycle-and-biology/ 46.

Yellow-legged hornet: Better Understand it to Better Control it. - Veto-pharma, https://www.veto-pharma.com/wp-content/uploads/2023/11/2023_09_ASIANHORNET_PPT_USA_SHORT-4.pdf 47. The APICULTURAL SOCIETY OF KOREA, https://journal.bee.or.kr/_common/do.php?a=full&b=12&bidx=2631&aidx=29829 48. Journal of Apiculture, https://journal.bee.or.kr/xml/29829/29829.pdf 49. www.nonnativespecies.org, https://www.nonnativespecies.org/assets/Risk-assessment-Asian-hornet-Vespa-velutina.pdf 50. Hardiness zone - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Hardiness_zone 51. Variation in Temperature Dependences across Europe Reveals the Climate Sensitivity of Soil Microbial Decomposers | Applied and Environmental Microbiology - ASM Journals, https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.02090-22 52. Resting metabolism and critical thermal maxima of vespine wasps ..., https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3337444/ 53. V. velutina sightings (NH), external temperature (T), and external relative humidity (RH) in the months with the highest pressure of hornets in front of the colonies - ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/V-velutina-sightings-NH-external-temperature-T-and-external-relative-humidity-RH_fig3_360116244 54. (PDF) Climate and land-use drivers of invasion: Predicting the ..., https://www.researchgate.net/publication/281587311_Climate_and_land-use_drivers_of_invasion_Predicting_the_expansion_of_Vespa_velutina_nigrithorax_into_the_Iberian_Peninsula 55. Vespa velutina: An Alien Driver of Honey Bee Colony Losses - MDPI, https://www.mdpi.com/1424-2818/12/1/5 56. Author's personal copy - Adrien Perrard, https://adrienperrard.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/02/barbet-massin-et-al-2013_biological_conservation1.pdf 57. Introduced Vespa velutina does not replace native Vespa crabro and Vespula species - EcoEvoRxiv, https://ecoevorxiv.org/repository/object/4237/download/8449/ 58. Niche modelling and landscape genetics of the yellow‐legged ..., https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11267635/ 59. The influence of climate on the invasion of the Asian hornet (Vespa velutina) to Guernsey, Channel Islands: citizen science and misidentified aliens | Request PDF - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/386051154_The_influence_of_climate_on_the_invasion_of_the_Asian_hornet_Vespa_velutina_to_Guernsey_Channel_Islands_citizen_science_and_misidentified_aliens 60. The invasive hornet Vespa velutina : distribution, impacts and management options, https://www.researchgate.net/publication/364412648_The_invasive_hornet_Vespa_velutina_distribution_impacts_and_management_options 61. Future range dynamics of Asian yellow-legged hornets (Vespa velutina) and their range overlap with Western honey bees (Apis mellifera) reveal major challenges for bee conservation in Europe - PubMed, https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38415910/ 62. ASIAN HORNET - BlesaBee, https://blesabee.online/app/uploads/2024/02/29_1_EN_VESPA_VELUTINA_WEB.pdf 63. Management of honey bee (Hymenoptera: Apidae) colonies under yellow-legged hornet (Hymenoptera: Vespidae) pressure - Oxford Academic, https://academic.oup.com/jipm/article/15/1/43/7904618