

Natürliche Veränderung und aktive Gestaltung von Landschaften – Fernerkundung als Werkzeug zur Steuerung von Landschaftspflege auf ehemaligen Truppenübungsplätzen

Carsten Neumann, Jörg Fürstenow, Sibylle Itzerott und Peter Nitschke

Zusammenfassung

Militärische Übungsplätze stellen insbesondere auf Offenflächen, die sich außerhalb urban-ackerbaulich geprägter und intensiver Landnutzungen etablieren konnten, bedeutende Refugien für strukturreiche Lebensräume mit hoher Artenvielfalt dar. Nach Aufgabe der militärischen Nutzung müssen aber oftmals gezielte Landschaftspflegemaßnahmen eingesetzt werden, um naturschutzfachlich wertvolles Offenland zu erhalten. Fernerkundung leistet einen wichtigen Beitrag, um in großflächigen Gebieten mit dem Verdacht auf Restmunition die Veränderungen von Lebensräumen zu erfassen und Wirkungen von Landschaftspflege weitgehend berührungslos zu dokumentieren. Zu diesem Zweck werden skalenspezifische Methoden des maschinellen Lernens für die Vielzahl von Datensätzen aus drohnen-, flugzeug- und satellitengetragenen Sensorsystemen entwickelt. Ein automatisiertes Monitoring erfasst dabei sowohl natürliche Prozessdynamiken als auch Erfolgskontrollen aus aktiv eingesetzten Pflegemaßnahmen. Auf diese Weise können raum-zeitliche Entwicklungstrends frühzeitig sichtbar gemacht und für naturschutzrechtliche Bewertungen quantitativ abgebildet werden.

Summary

Military training areas generate complex mosaics of open landscapes including various disturbance dynamics that exhibit high biodiversity values. After the abandonment of military use, however, targeted habitat management measures have to be implemented to preserve open land that is valuable from a nature conservation perspective. Remote sensing makes an important contribution to the mapping and monitoring of habitat changes and management effects in ammunition-polluted areas. For this purpose, scale-specific machine learning methods are being developed for drone, aircraft and satellite-based sensor systems. Automated monitoring can be developed for multiple scales to record both, natural process dynamics and management success. In this way, early trends of spatio-temporal ecosystem dynamics can be made visible quantitatively and used to assess the nature conservation value of military training areas.

Schlüsselwörter: Satellitenfernerkundung, Drohnenmonitoring, Offenland, Landschaftspflege, Veränderungsdynamik

1 Einleitung

Eine der größten globalen Herausforderungen unserer Zeit besteht darin, dem Rückgang der Biodiversität entgegenzuwirken. Die Vielfalt von Arten und Lebensräumen wird zu diesem Zweck über kohärente Netzwerke von Schutzgebieten gefördert. Solche Schutzgebiete unterliegen beispielsweise auf Europäischer Ebene der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (Natura 2000) und werden darin über gesetzlich festgelegte Zustandskriterien hinsichtlich der Zusammensetzung von Arten und Lebensräumen bewertet. Diese müssen nachweisbar erhalten und gegebenenfalls wiederhergestellt werden. Weltweit sind auf diese Weise 14,9 % der terrestrischen Landfläche geschützt (UNEP-WCM et al. 2018), wobei über den Schutzstatus hinaus eine gezielte Entwicklung diverser Ökosystemfunktionen innerhalb und eine adäquate ökologische Repräsentation zwischen den Gebieten angestrebt wird (Barnes et al. 2018, Geldmann et al. 2018).

Hier tritt ein überraschender Kandidat zur ökologisch sinnvollen Erweiterung des Netzwerkes von Schutzgebieten zutage – aktive und ehemalige militärische Übungsplätze (MTÜ). Zentelis und Lindenmayer (2015) schätzen, dass 5 bis 6 % der Erdoberfläche als MTÜ genutzt werden, wobei deren Wert für den Erhalt der biologischen Vielfalt noch weitgehend unbeachtet ist. Drei wesentliche Gründe verdeutlichen das Potenzial von MTÜ: 1) MTÜ sind ubiquitär in sämtlichen Ökosystemen der Erde vertreten und können somit einen komplementären Beitrag zum bestehenden globalen Schutzgebietssystem leisten (Zentelis and Lindenmayer 2015). 2) Aufgrund eines erhöhten Störungsregimes im Wechsel mit ungestörter natürlicher Sukzession und dadurch bedingter kleinräumiger Nischenkomplexität kommen überproportional viele gefährdete Arten vor (Warren et al. 2007). 3) MTÜ können als Kulturräume betrachtet werden, die sich über lange Zeiträume (teilweise > 100 Jahre) außerhalb intensiver agrarischer und auch meist forstlicher Nutzung sowie entfernt von Siedlungsräumen zu gering fragmentierten Landschaften entwickeln konnten. Dennoch ist bis heute der naturschutzfachliche Wert dieser Landschaften nur unzureichend dokumentiert. Auch existieren keine systematischen Ansätze für ein nachhaltiges Landschaftspflegemanagement. Letztgenanntes ist insbesondere nach Aufgabe der militärischen Nutzung notwendig, wenn Störungen durch Feuer, Explosionen und Maschinen-

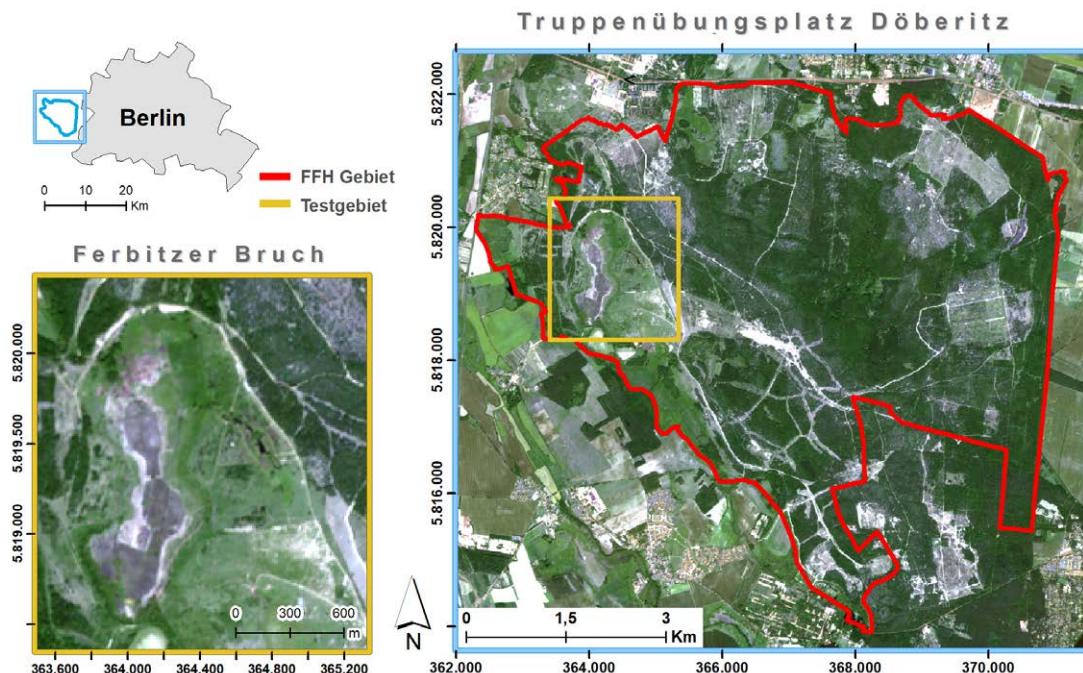


Abb. 1:
Untersuchungsgebiet mit Testfeld der feuchten Niedersungen des Ferbitzer Bruches, dargestellt als Echtfarbenkomposite eines Copernicus Sentinel-2-Satellitenbildes

befahrung wegfallen und besonders artenreiche Offenlandgesellschaften in Konversion zu Wald verloren gehen.

Eine flächenhafte, zeitlich wiederholbare Erfassung des Zustandes und der einsetzenden Entwicklung dynamischer Offenlandschaften ist in großen, munitionsbelasteten MTÜ mit vertretbarem Aufwand nur mit Mitteln der Fernerkundung zu leisten. Die Erdbeobachtung aus der Ferne kann dabei Ökosysteme nicht in ihrer Gesamtheit beschreiben, sondern muss skalenspezifische Erklärungsansätze entwerfen. Satellitenbildzeitreihen der Landsat oder Copernicus Sentinel-2-Serie erlauben es beispielsweise, die Ausdehnung und Zerschneidung von Lebensräumen in Landschaften darzustellen. Die Qualität von Lebensräumen, deren strukturelle, taxonomische und biochemische Ausstattung sowie kleinskalige Störungereignisse können aber nur mit räumlich und/oder spektral hochauflösten Sensoren abgebildet werden (Lausch et al. 2016, Nagendra et al. 2013). Hochauflösende Fernerkundung steht dabei noch am Anfang der technischen Entwicklung. Maschinelles Lernen wird eingesetzt, um Erkenntnisse aus Zeitreihen auf unterschiedlichen Skalen zu verknüpfen. Auf diese Weise können neben ökologischen Entitäten auch Prozesse und Funktionen von Ökosystemen beschrieben (Pettorelli et al. 2018) und zur Abschätzung von Veränderungsdynamiken herangezogen werden (Kennedy et al. 2014). Die vorliegende Arbeit beschreibt in einem »top-down«-Ansatz, wie Skalen der Fernerkundung zur Beschreibung und Bewertung der Ökologie von Offenland auf MTÜ nutzbar gemacht werden können.

2 Untersuchungsraum

Der ehemalige Truppenübungsplatz Döberitz im Westen von Berlin (53° n.Br., 13° ö.L.) wird seit der Beendigung

der militärischen Nutzung als Döberitzer Heide bezeichnet und umfasst eine Fläche von 52 km^2 , wobei 37 km^2 als Flora-Fauna-Habitat-Gebiet über Europäisches Naturschutzrecht unter Schutz gestellt sind. Dazu gehört zum einen das Naturschutzgebiet (NSG) Döberitzer Heide, das vor allem eine sandige Grundmoränenlandschaft umfasst, durchzogen von schmalen, periglazialen Schmelzwasserrinnen und Endmoränenzügen (höchste Erhebung 89,9 m NN), und zum anderen das NSG Ferbitzer Bruch, das im Westen eine feuchte Senke mit der gleichnamigen Bezeichnung in der übergeordneten geomorphologischen Abfolge des Weichsel-Glazials aufweist (Abb. 1).

Ein Teil im Süd-Osten der Döberitzer Heide wird aktiv als Standortübungsplatz der Bundeswehr genutzt. In den Naturschutzgebieten erfolgte die Aufgabe der intensiven militärischen Nutzung im Jahr 1991 nach fast 100-jähriger Geschichte der Döberitzer Heide als »Manövergebiet, Infanterie- und Artillerieschießplatz sowie als Fahrübungsgebiet u.a. für Panzer« (Fürstenow und Kummer 2011). Regelmäßige Brände, Detonationen, Wald- und Gebüschrödungen sowie mechanische Störungen durch schwere Kettenfahrzeuge schufen weite Offenlandbereiche. Im Prozess der natürlichen Sukzession entwickelten sich anschließend ausgedehnte Pionierfluren, gefolgt von Zergstrauchheiden und Sandtrockenrasen auf grundwasserfernen Standorten. In den Niederungen etablierten sich Schilfröhrichte, Feucht- und Frischwiesen sowie Ruderalfuren.

Im Zuge fortschreitender Sukzession kommt es zur Ausdehnung vorhandener Gehölzbestände – zunächst mit Gebüschen aus Besenginster und Weißdorn, später Traubenkirsche und Brombeere sowie in den Niederungen aus Grau-Weide. Anschließend treten Pionierbaumarten hinzu, wie Birke und Zitterpappel. Schlussendlich entwickelt sich ein Wald vornehmlich aus Eiche und vor allem im Südosten der Döberitzer Heide auf dem aktiven

Standortübungsplatz auch aus Kiefer. An den Bestandsrändern und an stärker anthropogen beeinflussten Standorten finden sich noch Robinie und Eschen-Ahorn (Berg- und Spitzahorn, Ulmen, Roteiche etc.). In den Niederungen herrschen dann vor allem Erle, Esche und Moor-Birke vor. Im Jahr 2004 übernahm die Heinz Sielmann Stiftung ca. 3450 ha der Döberitzer Heide und setzt von da an gezielt Landschaftspflegemaßnahmen zur Offenhaltung und Erprobung nachhaltiger Nutzungskonzepte ein.

3 Lebensraumtypen

Langjährige Entwicklungen großer Gebiete lassen sich über räumlich grob aufgelöste Satellitenzeitreihen und darin ausgewiesene Veränderungen der Ausdehnung und Verteilung von Lebensräumen quantitativ beschreiben. Für den MTÜ Döberitz wurde zu diesem Zweck eine Landsat-Zeitreihe ausgewertet. Hoch aggregierte Lebensraumtypen wurden im Bild automatisiert beprobt und klassifiziert (Neumann o.J., in rev.). Proben werden als Pixelwerte den jeweiligen Typen zugewiesen und als Trainingsdaten für Random Forest Klassifikatoren ausgewertet. Dabei wird die gesamte spektrale Bandbreite vom sichtbaren (VIS) über das nahe Infrarot (NIR) bis hin zum kurzweligen Infrarot (SWIR) über die Sensoren (Enhanced Thematic Mapper und Operational Land Imager) in sechs spektralen Kanälen genutzt. Zur besseren Unterscheidung wurden diese ergänzt durch phänologische Profile mehrerer Aufnahmezeitpunkte pro Jahr (1993: 09.03. / 28.05. / 02.07.; 2009: 16.04. / 02.05. / 06.08.; 2019: 22.04. / 25.08. / 11.09.), die aus wolkenfreien Szenen zusammengesetzt sind. Diese bilden die Grundlage für die räumlich explizite Vorhersage unterschiedlicher Entwicklungsphasen.

Für die Entwicklung der Lebensraumverteilung lassen sich drei wesentliche Phasen identifizieren (Abb. 2). So

ist die erste Phase 1993 kurz nach Aufgabe der militärischen Nutzung durch eine hohe Strukturvielfalt gekennzeichnet. Sandige Waldschneisen wechseln sich in einem kleinteiligen Mosaik mit feuchten und trockenen Offenlandbereichen ab. Wald- und Gebüsch (47 %) koexistieren in gleichen Anteilen mit Offenland (50 %), wobei es noch große Anteile an vollständig vegetationsfreien Flächen gibt (16 %). Bis zum Jahr 2009 dominieren Prozesse der natürlichen Sukzession, obwohl stellenweise bereits Landschaftspflege durchgeführt wurde. Der Gehölzanteil erreicht einen Höchststand von 72 %. Offenland ist stark zugewachsen und nimmt eine minimale Deckung von 22 % ein. Erst danach werden verstärkt Pflegemaßnahmen durch die Heinz Sielmann Stiftung umgesetzt (z.B. Gehölzentschärfen, Beweidung, Plaggen, Pflegepanzer) bzw. entfalten erst nach Etablierung von Populationen mit großen Pflanzenfressern (Wildnisgroßprojekt mit Przewalski-Wildpferden, Wisenten und Rotwild in 18 km²-Kernzone) und deren Wirkungen, sichtbare Veränderungen. Im Bild von 2019 wird deutlich, dass der Anteil von Laubwald um 10 % zurückgenommen werden konnte, insbesondere in »alten« Schneisen, die weitgehend im Zustand von 1993 wiederhergestellt wurden. Dennoch kann einer vermehrten Verbuschung zurzeit noch nicht effektiv und nachhaltig entgegengewirkt werden. Trotz der Zunahme von trockenem (+7 %) und feuchtem (+2 %) Offenland scheint es außerdem schwierig, größere offene Bodenstellen (-3 %) zu erzeugen.

Die quantitative Beschreibung von Lebensraumtypen auf grober räumlicher Skala und demzufolge über breite Kategorisierungsstufen geben Einblicke über die Entwicklung weiträumiger Gebiete im Kontext einer Gesamtlandschaft. Auf diese Weise wird der Erfolg von Landschaftspflegemanagement über den Zusammenhang und die Organisation von Offenland und Wald dargestellt. Die Bewertung des Einsatzes einzelner Maßnahmen auf die Vielfalt der Lebensraumausstattung kann dabei nur in höherer raum-zeitlicher Auflösung erfolgen.

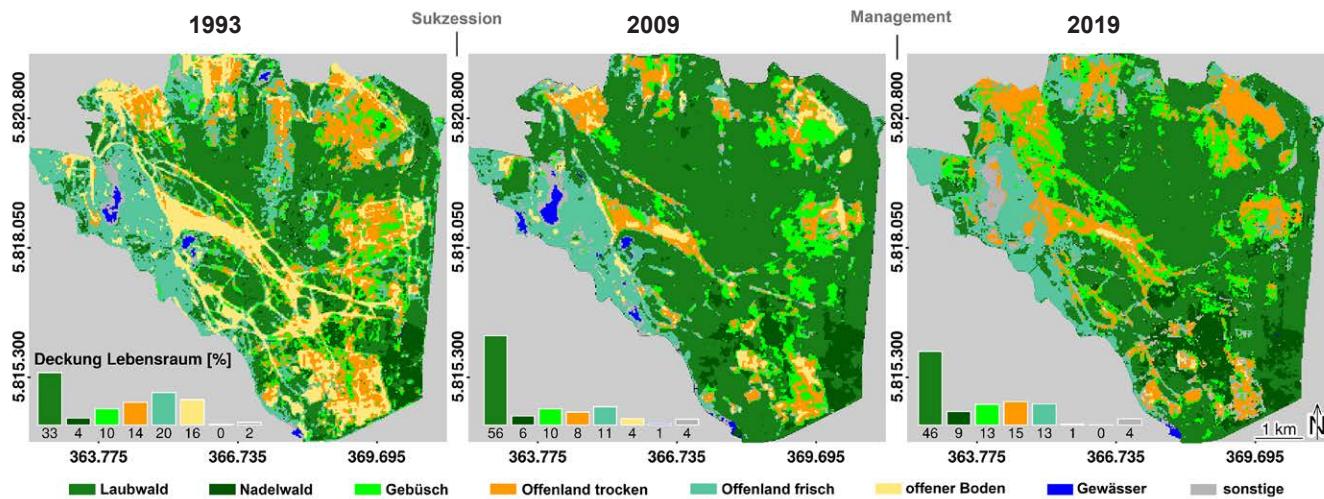


Abb. 2: Räumlich explizite Vorhersage der Lebensraumtypen auf Grundlage von Landsat-Satellitenbildzeitreihen in 30 m räumlicher Auflösung und quantitative Angabe der Deckungsgradverteilung in drei Zeitschnitten

4 Monitoring von Landschaftspflegemanagement

Eine genauere Differenzierung von Lebensraumklassen, deren Vergesellschaftungen in Biozönosen bis hin zu monodominanten Beständen von Einzelarten können mit räumlich höher aufgelösten (1–10 m) multispektralen Satellitenbildern erreicht werden. Ein gezieltes Landschaftspflegemanagement setzt dabei auf der Skala von Biotopen an, die Lebensräume für charakteristische Biozönosen darstellen. Diese können im Offenland ehemaliger MTÜ in Abhängigkeit von Reliefunterschieden, Nutzungsformen und Bodensubstrat auf kleiner räumlicher Skala heterogen verteilt sein. Oft bilden sich kontinuierliche Übergänge zwischen Biotopen entlang von steuernden Umweltgradienten. Deshalb wird in der fernerkundungsbasierten Bildanalyse maschinelles Lernen eingesetzt, um graduelle Verschiebungen von Pflanzengesellschaften über die Abbildung von Vorkommenswahrscheinlichkeiten darzustellen (Feilhauer et al. 2014, Neumann et al. 2015).

4.1 Veränderungsanalyse

Ein Beispiel für ein kleinskalig heterogenes Biotopmosaik, in welchem Maßnahmen der Landschaftspflege eingesetzt wurden, ist die Niederung »Ferbitzer Bruch« (Abb. 3). Das Jahr 2011 kennzeichnet den Zustand vor Pflege. Im Jahr 2014 sind vorwiegend Maßnahmen in Form von Baum- und Gebüsch-Entnahmen vorgenommen und abgeschlossen worden. Es wurde eine Satellitenbildzeitreihe der RapidEye-Konstellation ausgewertet. Diese liefern fünf spektrale Kanäle in den Wellenlängen Rot, Grün, Blau, RedEdge und nahes Infrarot bei einer täglichen Wiederkehrrate und einer Pixelgröße von 5 m.

Auf Grundlage von neun Szenen 2011 und sieben Szenen 2014 wurde in den jeweiligen Jahren ein Ensemble aus Random Forest Klassifikatoren anhand von autonom

selektierten Trainingspixeln kalibriert (Neumann in rev.). Jede Lebensraumklasse wird separat als akkumulierte Häufigkeit von Random Forest Vorhersagen im Bild ausgewiesen.

Der Vergleich zwischen den Jahren zeigt eine plausible Stabilität der groben Klassenverteilung (Abb. 3). Deutlich zu erkennen sind Baum- und Gebüschentnahmen im nördlichen, zentralen und südlichen Bereich der Frischwiese. Außerdem fällt die Klasse Ginster 2014 vollständig aus und wird durch Trockenrasen im Osten und Westen der Niederung substituiert. Durch gezielte Baumentnahmen wurden geschlossene Waldbestände auf die Bereiche außerhalb des Offenlandes zurückgedrängt. Lediglich Weidengebüsch und Auwaldgesellschaften sind am Rande des zentralen Schilfrohrichts belassen. Die Kernzone des Ferbitzer Bruchs ist nach Einsatz von Managementmaßnahmen im Jahr 2014 wieder durch ein Mosaik aus Grünlandbiotopen in unterschiedlichen Feuchtestufen geprägt.

4.2 Saisonale Vegetationsdynamik

Die räumlich explizite Kartierung von Lebensräumen, Biotopen und letztendlich Vegetationseigenschaften mittels automatisierter maschineller Lernsysteme stellt Verfahren der künstlichen Intelligenz vor große Herausforderungen. Im Gegensatz zu beispielsweise anthropogenen Artefakten, mineralischen Substraten oder homogenen Ackerflächen sind natürliche Vegetationsbestände raum-zeitlich hoch dynamisch und spektral nicht eindeutig bestimmbar, da sie vom jeweiligen Abstraktionsgrad der ökologischen Definition abhängig sind. Die Notwendigkeit und die induzierten Veränderungen durch Landschaftspflegemanagement müssen daher in den Kontext der natürlichen Veränderungsdynamik gestellt werden. Die natürliche Schwankungsbreite ist dabei durch saisonale Effekte in den gemäßigten Breiten und dadurch gestaltete phänologische Muster hoch und wird durch

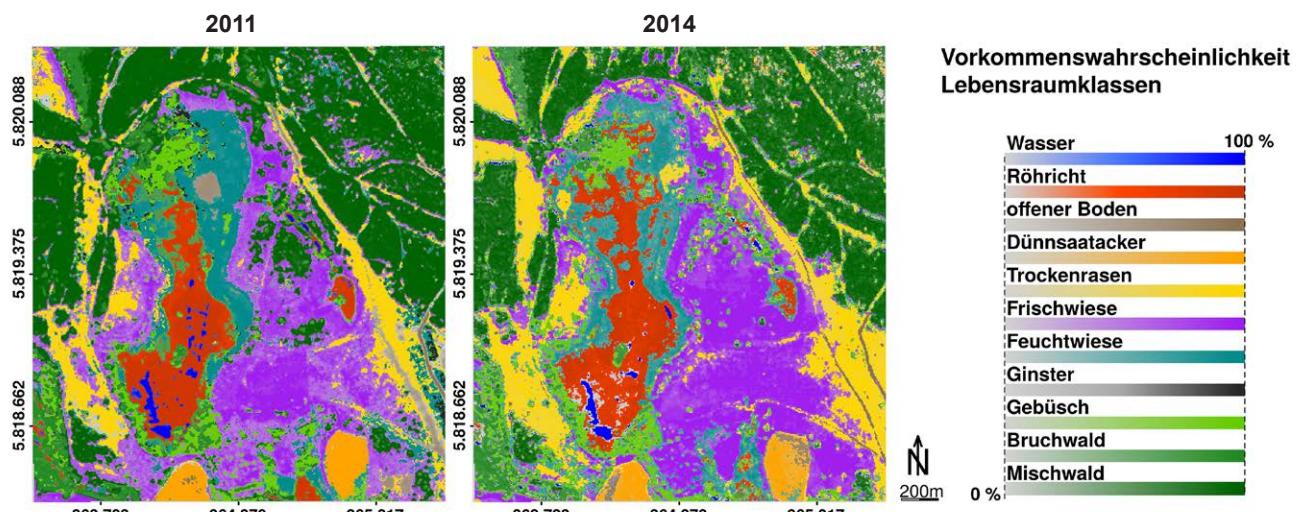


Abb. 3: Vorkommenswahrscheinlichkeit von Lebensraumklassen vor (2011) und nach (2014) Maßnahmen der Landschaftspflege im Ferbitzer Bruch vorhergesagt auf 5 m RapidEye-Satellitenbildern

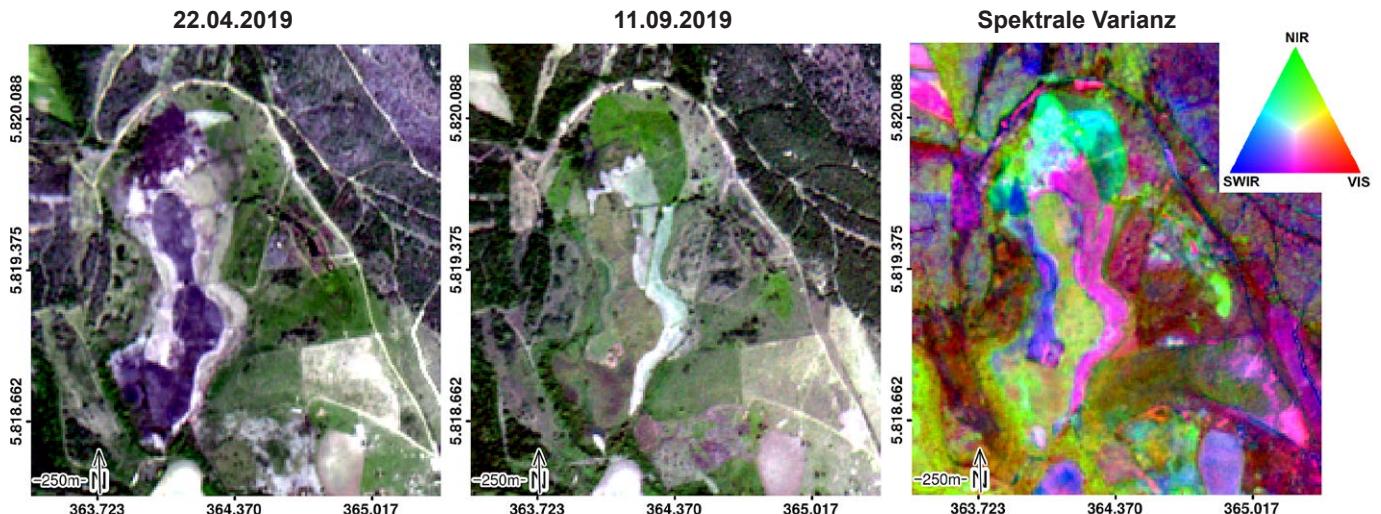


Abb. 4: Saisonale Variabilität von Phänologie, Nutzung und Landschaftspflegemanagement dargestellt über spektrale Muster im Ferbitzer Bruch

Nutzungsformen und witterungsbedingte Anpassung von Vitalität und Pflanzenwachstum bestimmt. Die Art und adaptive Breite der Veränderung kann über verschiedene spektral sensitive Bereiche in Fernerkundungsdaten abgebildet werden.

Zur Analyse der spektralen Varianz im Ferbitzer Bruch wurde eine Copernicus Sentinel-2-Satellitenzeitreihe von Februar bis September 2019, jeweils eine wolkenfreie Szene pro Monat, ausgewertet. Zu diesem Zweck wurde die Varianz pro Pixel in den drei Wellenlängenbereichen VIS-NIR-SWIR als prozentualer Anteil von der gesamten Schwankungsbreite in der jeweiligen Wellenlänge über alle Monate hinweg berechnet. Die Ergebnisse werden in einer Falschfarbenkomposition als Bild zusammengefügt und kennzeichnen den jeweiligen spektralen Anteil der Veränderung im Pixel (Abb. 4). Exemplarisch für die bereits visuell erkennbaren Modifikationen der Vegetation sind zwei Echtfarbenkompositionen aus dem April und September dargestellt.

Starke Veränderungen im VIS-SWIR-Übergang (magenta) deuten auf einen Wechsel vom Boden-/Vegetationssignal hin. Dies wird besonders deutlich auf Mähflächen der Pfeifengraswiesen (zentral, nord-westlich) und auf einer Maßnahmenfläche, bei der gezielt Rohboden geschaffen wurde (süd-östlich). Eine erhöhte NIR-Varianz (hellgrün) wird durch das Ergrünen feuchter Standorte des Schilfgräts (zentral) und der Bruchwälder (süd-westlich) generiert. Durch Baum- und Geibuschentnahmen wurde innerhalb des Jahres 2019 der Feuchtwiesenstandort im Norden erweitert, was durch eine Varianzmaximierung im NIR-SWIR-Bereich (cyan) sichtbar gemacht werden kann. Weitere Farbübergänge kennzeichnen die hohe raum-zeitliche Variabilität, der Vegetation innerhalb eines Jahres unterliegen kann, und verdeutlichen somit die Komplexität, mit der Lebensräume im Bild ausgewiesen und hinsichtlich ihrer Veränderungsdynamik bewertet werden können. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass charakteristische Signale nur bei entsprechender spektraler Sensorsauflösung zur Ver-

fügung stehen. Ein fernerkundungsbasiertes Monitoring muss dementsprechend immer die phänologische und nutzungsbedingte Variabilität von Lebensräumen berücksichtigen und geeignete Sensoren zur gezielten Modellierung von Veränderungsdynamiken selektieren.

5 Hochauflöste Monitoring

Satellitenfernerkundung kann zurzeit nur als begrenztes Mittel zur Steuerung von Monitoringaufgaben eingesetzt werden, da die räumliche und spektrale Auflösung mit Stand des heutigen technologischen Fortschritts nicht adäquat Pflanzenarten, deren physiologische und biochemische Merkmale, Mikrohabitatem sowie kleinskalige Störereignisse und Beeinträchtigungen abbilden kann. Oft bildet jedoch gerade die kleinskalige Vielfalt die Grundlage für eine Vielzahl von faunistischen Nischen (Luft et al. 2016). Insbesondere Landschaftspflege setzt gezielt auch auf die Förderung einzelner Arten und damit verbundener Lebensraumstrukturen. Es konnte gezeigt werden, dass komplexe Artgradienten sich über hyperspektrale Sensoren von flugzeuggetragenen Aufnahmesystemen kartieren lassen (Neumann et al. 2016). Erst in den letzten Jahren wurden hochauflöste Datensätze (< 10 cm) von unbemannten Flugobjekten (UAV-Drohnen) in relativ einfach zu realisierenden Feldkampagnen verfügbar gemacht. Erstmalig können Aufnahmen im Bereich optischer Pflanzenmerkmale gemacht und der Einfluss von Pflegemaßnahmen auf Ebene von ökosystemären Prozessen und Funktionen bewertet werden.

Für den Erhalt und die Entwicklung von Offenland ist es erforderlich, frühzeitig die Geschwindigkeit, die Art und das Ausmaß des Gehölzaufwuchses zu quantifizieren. Auf diese Weise lässt sich der Aufwand von geplanten Maßnahmen abschätzen und der Erfolg im Hinblick auf die Persistenz der geschaffenen Offenfläche bewerten. Satellitensysteme können zu diesem Zweck lediglich zusammenhängende, bereits über mehrere Jahre etablierte

Bestände kartieren (Abb. 5). Selbst in digitalen Orthophotos der regelmäßigen Landesbefliegungen sind Gebüsche nur schwer zu identifizieren. In hochauflösten Drohnenaufnahmen lassen sich selbst einzelne Individuen automatisiert umranden (Abb. 5). Die Abgrenzung erfolgt dabei nicht über rein optische Signale, sondern bedient sich Oberflächenmodellen, die aus photogrammetrischen Verfahren generiert werden. Auf diese Weise erzeugte Vegetationshöhen können über empirische Beziehungen zu Felddaten zur Abschätzung der Biomasse einzelner Gebüsche herangezogen werden.

Diese Massen- und Volumina-Ermittlung dient auch einer detaillierteren Kostenkalkulation geplanter Landschaftspflegemaßnahmen. Es erfolgt eine exakte Verortung von Einzelindividuen und deren Merkmalen für größere Monitoringflächen, deren Größe jedoch im Vergleich zu Analysen aus flugzeug- oder satellitengetragenen Systemen um ein Vielfaches kleiner ist (< 100 ha).

Nicht nur ausladendes Gebüsch, sondern auch Zwergsträucher wie die Besenheide (*Calluna vulgaris*) können über eine Verknüpfung von intelligenten Algorithmen optischer Merkmalsräume mit Methoden der Photogrammetrie charakterisiert werden. Ausgedehnte Heide-landschaften sind ein Kennzeichen fortschreitender Sukzession der sandigen, nährstoffarmen Standorte im Offenland, insbesondere auf ehemaligen MTÜ in Europa. Sie bieten einer Vielzahl von Arthropoden Lebensräume (Petrischak 2019) und können nur durch permanente Pflege (z. B. Beweidung, Brand, Mahd) erhalten werden. Heideindividuen können in Drohnenbildern nicht nur abgegrenzt werden, sondern ebenfalls hinsichtlich ihrer spezifischen Lebenszyklusphasen kategorisiert und anschließend bezüglich Wiederaustrieb, Samenabtierung und Blühaspekt räumlich explizit beschrieben werden (Neumann et al. 2020). So wurde es ermöglicht, während der Blüphase den Anteil von Blüten, Früchten und vegetativen Trieben für jeden Lebenszyklus quantitativ zu bestimmen (Abb. 6). Erstmals konnte auf diese Weise die räumliche Organisationsform von Reproduktionsfähigkeit und Wiederaustrieb in Abhängigkeit von eingesetzten Managementmaßnahmen sichtbar gemacht werden. Darüber hinaus liefert die zeitliche Dynamik und räumliche Verteilung des Blühaspektes einen wesentlichen Beitrag zur Beurteilung von Bestäuberlebensräumen und deren Resilienz unter sich ändernden klimatischen Bedingungen.

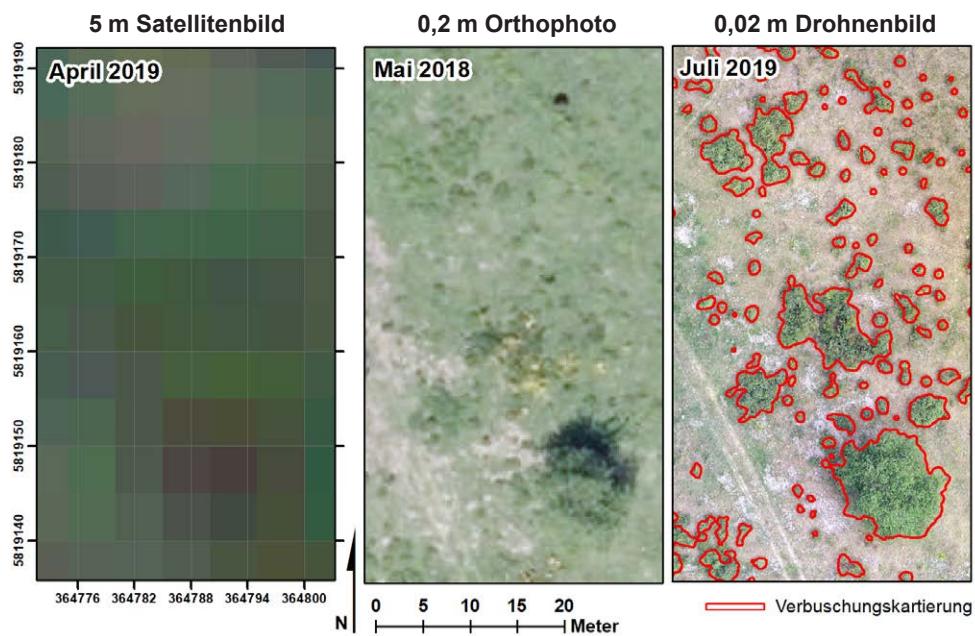


Abb. 5: Vergleich der räumlichen Auflösung zur Abbildung von Ginster- und Weißdorn-woollyheath im Offenland; Verbuschungskartierung durch automatisierte RGB-Drohnen-Abgrenzung

6 Zusammenführende Schlussfolgerung

Der Einsatz von Fernerkundung zum Monitoring von Landschaftspflege auf MTÜ ist aufgrund der Weiträumigkeit unzerschnittener quasi natürlicher Lebensräume und deren raum-zeitlicher Heterogenität ein unverzichtbares Mittel, um in munitionsbelasteten Gebieten flächen-deckende Aussagen über Veränderungsdynamiken abzuleiten. Als eine Alternative zu mit hohem Kostenaufwand anzulegenden, befahr- oder begehbar, tiefenberäumten Kontrollwegen ergeben sich erhebliche Kontrollpotenziale beim Einsatz von Fördermitteln auf MTÜ, beispielsweise im Rahmen des Kulturlandschaftsprogramms. Dabei existiert kein Verfahren, das einheitlich die naturräumliche Komplexität abbilden kann. Vielmehr müssen skalen-spezifische Ansätze zur Modellierung unterschiedlicher Aspekte im Ökosystem Offenland entwickelt werden. Um darin Veränderungen von Arten und Lebensräumen darstellen zu können, müssen wissensbasiert Datensätze und Methoden selektiert werden. Ein geeignetes Konzept ermöglicht sowohl Prozesse und Funktionen von Offenland über Pflanzeneigenschaften und Interaktionen auf Ebene von Arten darzustellen, als auch übergeordnete Austauschprozesse im Mosaik von Lebensräumen auf Landschaftsebene zu beschreiben. Auf diese Weise kann es gelingen, die Dynamik von Wald-Offenlandgesell-schaften tiefgreifender zu verstehen und über Maßnahmen des Landschaftspflegemanagements gezielt zu steuern. MTÜ bieten sich als ideale Versuchsstandorte an, da Einflüsse urbaner und agrarischer Nutzungen minimiert und demzufolge das Zusammenspiel von anthropogener Störung und natürlicher Vegetationsentwicklung unmittelbar untersucht werden kann.

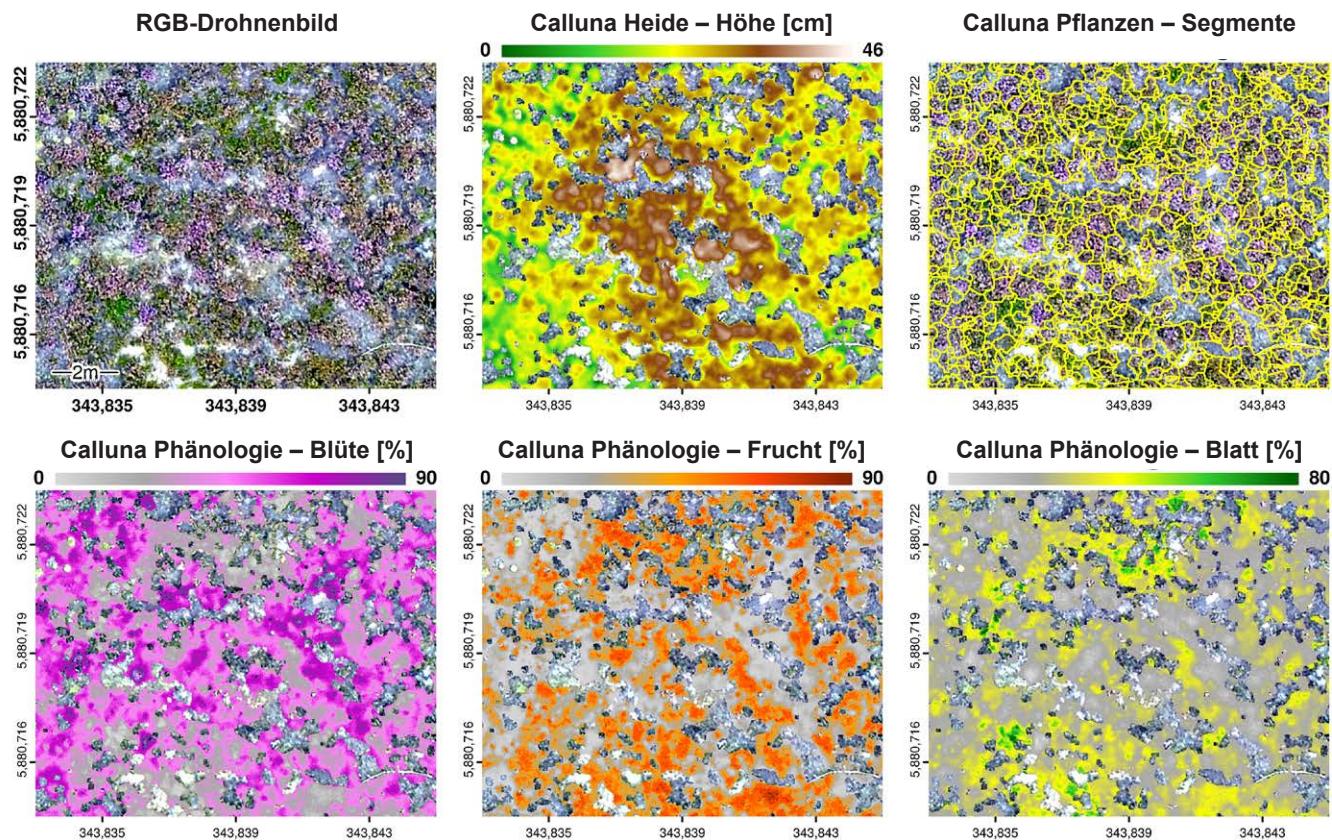


Abb. 6: Drohnenbasierte (2 cm Pixel) räumliche Beschreibung der Wuchshöhe und phänologischen Phase von Besenheide (*Calluna vulgaris*) während der Reproduktionsphase

Literatur

- Barnes, M.D., Glew, L., Wyborn, C., Craigie, I.D. (2018): Prevent perverse outcomes from global protected area policy. In: *Nat. Ecol. Evol.* 2, 759–762.
- Feilhauer, H., Dahlke, C., Doktor, D., Lausch, A., Schmidlein, S., Schulz, G., Stenzel, S. (2014): Mapping the local variability of Natura 2000 habitats with remote sensing. In: *Appl. Veg. Sci.* 17, 765–779.
- Fürstenow, J., Kummer, V. (2011): Exkursion 3: Vegetation und Landschaftspflege in der Döberitzer Heide. In: *Tuexenia Beih.* 4 (Flora und Vegetation in Brandenburg), 103–126.
- Geldmann, J., Coad, L., Barnes, M.D., Craigie, I.D., Woodley, S., Balmford, A., Brooks, T.M., Hockings, M., Knights, K., Mascia, M.B., others (2018): A global analysis of management capacity and ecological outcomes in terrestrial protected areas. *Conserv. Lett.* 11, e12434.
- Kennedy, R.E., Andréfouët, S., Cohen, W.B., Gómez, C., Griffiths, P., Hais, M., Healey, S.P., Helmer, E.H., Hostert, P., Lyons, M.B., others (2014): Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. In: *Front. Ecol. Environ.* 12, 339–346.
- Lausch, A., Bannehr, L., Beckmann, M., Boehm, C., Feilhauer, H., Hacker, J.M., Heurich, M., Jung, A., Klenke, R., Neumann, C., Pause, M., Rocchini, D., Schaeppman, M.E., Schmidlein, S., Schulz, K., Selsam, P., Settele, J., Skidmore, A.K., Cord, A.F. (2016): Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: Local to ecosystem perspectives. In: *Ecol. Indic.* 70, 317–339.
- Luft, L., Neumann, C., Itzerott, S., Lausch, A., Doktor, D., Freude, M., Blaum, N., Jeltsch, F. (2016): Digital and real-habitat modeling of *Hipparchia statilinus* based on hyper spectral remote sensing data. In: *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 13, 187–200.
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J.P., Jongman, R.H.G., Tarantino, C., Adamo, M., Mairotta, P. (2013): Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. In: *Ecol. Indic.* 33, 45–59.
- Neumann, C. (o.J.): Habitat Sampler – A Sampling Algorithm for Habitat Type Delineation in Remote Sensing Imagery. In: Diversity and Distributions, in rev.
- Neumann, C., Behling, R., Schindhelm, A., Itzerott, S., Weiss, G., Wichmann, M., Müller, J. (2020): The colors of heath flowering – quantifying spatial patterns of phenology in *Calluna* life-cycle phases using high-resolution drone imagery. In: *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 6, 35–51.
- Neumann, C., Itzerott, S., Weiss, G., Kleinschmit, B., Schmidlein, S. (2016): Mapping multiple plant species abundance patterns – A multi objective optimization procedure for combining reflectance spectroscopy and species ordination. In: *Ecol. Inform.* 36, 61–76.
- Neumann, C., Weiss, G., Schmidlein, S., Itzerott, S., Lausch, A., Doktor, D., Brell, M. (2015): Gradient-Based Assessment of Habitat Quality for Spectral Ecosystem Monitoring. In: *Remote Sens.* 7, 2871–2898.
- Petrischak, H. (2019): Expedition Artenvielfalt Heide, Sand & Seen als Hotspots der Biodiversität. Hrsg. von der Heinz Sielmann Stiftung, oekom, München.
- Pettorelli, N., Schulte to Bühne, H., Tulloch, A., Dubois, G., Macinnis-Ng, C., Queirós, A.M., Keith, D.A., Wegmann, M., Schrot, F., Stellmes, M., others (2018): Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. *Remote Sens.* In: *Ecol. Conserv.* 4, 71–93.
- UNEP-WCMC, IUCN, NGS (2018): Protected Planet Report 2018. Camb. UK, Gland Switz, Wash. DC USA.
- Warren, S.D., Holbrook, S.W., Dale, D.A., Whelan, N.L., Elyn, M., Grimm, W., Jentsch, A. (2007): Biodiversity and the Heterogeneous Disturbance Regime on Military Training Lands. *Restor.* In: *Ecol.* 15, 606–612.
- Zentelis, R., Lindenmayer, D. (2015): Bombing for Biodiversity-Enhancing Conservation Values of Military Training Areas: Bombing for biodiversity. In: *Conserv. Lett.* 8, 299–305.

Kontakt

Dr. Carsten Neumann | Dr. Sibylle Itzerott
Helmholtz-Zentrum Potsdam GFZ Deutsches Geoforschungszentrum
Telegrafenberg A17, 14473 Potsdam
carsten.neumann@gfz-potsdam.de | sibylle.itzerott@gfz-potsdam.de

Jörg Fürstenow | Peter Nitschke
Heinz Sielmann Stiftung
Unter den Kiefern 9, 14641 Wustermark / OT Elstal
joerg.fuerstenow@sielmann-stiftung.de | peter.nitschke@sielmann-stiftung.de