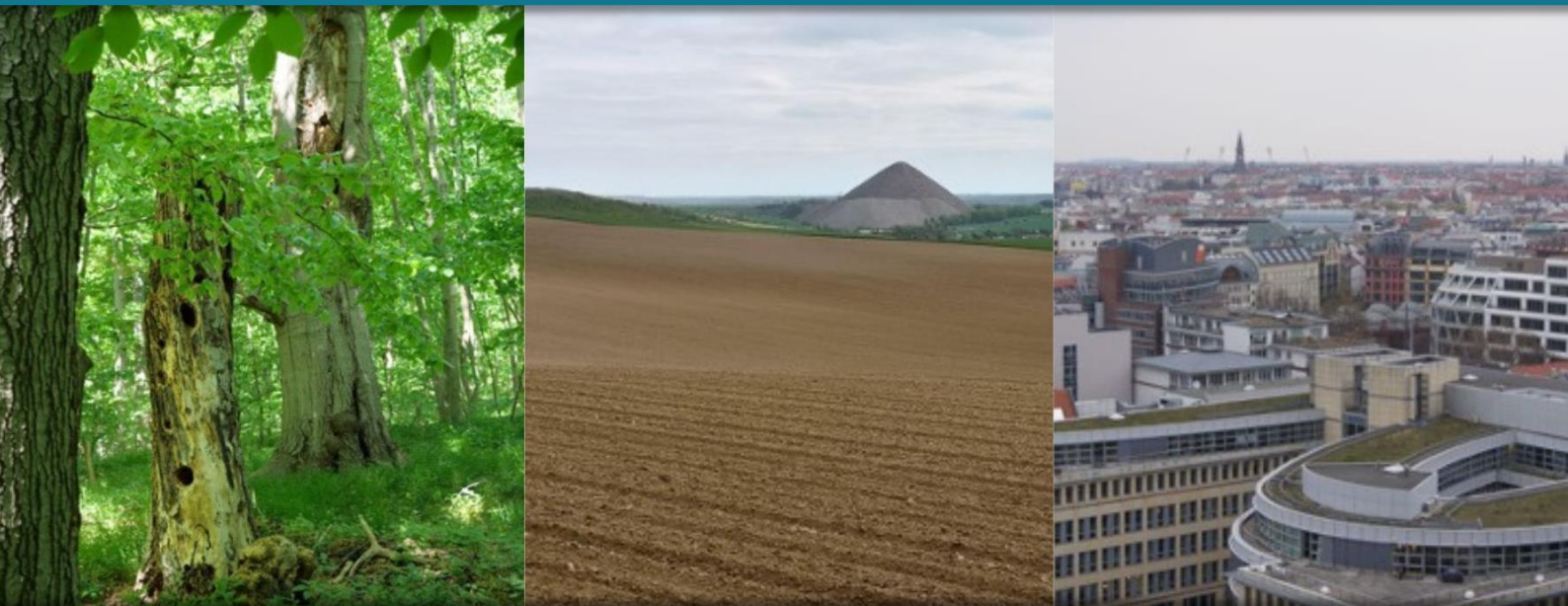


Die Leistungsfähigkeit unserer Landschaften im Klimawandel

Der Grün-Feucht-Kühl-Index für Deutschland



Das 2025 gegründete ECONICS INSTITUTE e.V. ist ein Thinktank für Ökosysteme. Es ist aus dem Centre for Ecnics and Ecosystem Management an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde hervorgegangen und bündelt angewandte wissenschaftliche sowie praktische Expertise zum Umgang mit Ökosystemen in der Klimakrise.

Das ECONICS INSTITUTE e.V. steht für den Ansatz der „Ökonik“, also das Lernen von der wirtschaftenden Natur für ein nachhaltiges Wirtschaften der Menschheit. Die ganzheitliche Betrachtung der Landschaft als komplexes sozialökologisches System ist unser konzeptionelles Fundament. Wir wollen zur Funktionstüchtigkeit von konkreten Ökosystemen beitragen.

Der Sitz des gemeinnützigen Vereins befindet sich in Chorin im UNESCO-Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin.



ECONICS INSTITUTE (2025). Die Leistungsfähigkeit unserer Landschaften im Klimawandel. Der Grün-Feucht-Kühl-Index für Deutschland. Redaktion: Inga M. Engelhardt & Pierre L. Ibisch. Chorin. 23.09.2025.

Basierend auf: Yojana Adhikari, Pierre L. Ibisch, Peter Wohlleben, Anselm Schneider, Daniel Johnson (2025). Working landscapes under climate change need to be green, moist and cool - a case study of Germany. [Preprint](https://zenodo.org/records/17174872) <https://zenodo.org/records/17174872>

Fotonachweis: P.L. Ibisch & I. M. Engelhardt

Karten: Y. Adhikari

Grafik: I. M. Engelhardt

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Arbeitende und wirtschaftende Landschaften – ein neuer Blick auf unsere Natur.....	4
Die „Grün-Feucht-Kühl“-Triade in Deutschland:.....	7
Grün macht feucht und kühl!	7
„Grün-Feucht-Kühl-Index“ Deutschland (2018-2024)	8
Die thermalen Landschaften Deutschlands	11
Nicht nur grüne Landschaften in Deutschland	13
Die ungleiche Verteilung von Regen in Deutschland ist eine Frage der Geographie und der Landnutzung	14
Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	15
Klimainfrastruktur und Klimarefugien	16
Klimaanpassung und Wiederherstellung von Ökosystemen	17
Roadmap für Politik und Management.....	18
Nationales Monitoring der Arbeitskapazität von Ökosystemen und Bestimmung eines „Brutto-Naturprodukts“	18
Aktives Management der „Thermalen Landschaften“	19
Natürlichen Klimaschutz besser definieren	20
Anhang.....	i
Zeitreihenvergleich der Landoberflächentemperaturen	i
.....	i
Ein Transekt durch Deutschland: ausgewählte Beispiellandschaften und ihr Grün-Feucht-Kühl-Index	ii



Zusammenfassung

Die Landbedeckung in Deutschland hat einen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur und beeinflusst sogar die Niederschlagsmenge. Die Triade aus *Grünheit* der Landschaft, relativ *kühlen Temperaturen* und *Feuchtigkeit* - die sich wechselseitig fördern - reflektiert die Arbeits- und Leistungsfähigkeit der Landschaften und ihre Zukunftsfähigkeit im Klimawandel. Der "Grün-Feucht-Kühl-Index" (GFKI) erlaubt ein nationales Monitoring sowie einen Vergleich zwischen Landschaften in Deutschland. Die Leistungsfähigkeit und Regenerationsfähigkeit der Ökosysteme ist eine wesentliche Grundlage des Wohlstands in Deutschland und sollte mit geeigneten Indikatoren als "Brutto-Naturprodukt" bewertet werden. Ausgedehnte Landstriche haben ihre Arbeitsfähigkeit weitgehend eingebüßt und bedürfen intensiver Wiederherstellungsmaßnahmen. Dabei geht es nicht allein um die Produktionsgrundlagen der Primärwirtschaft, sondern ganz wesentlich auch um die Sicherung der Lebensqualität der Menschen und die Bewahrung unverzichtbarer Ressourcen wie Wasser. Der Schutz und Entwicklung von relativ grünen, feuchten und kühlen Räumen verdient eine hohe Priorität etwa im Rahmen der Förderprogramme des natürlichen Klimaschutzes.

Arbeitende und wirtschaftende Landschaften – ein neuer Blick auf unsere Natur

Die vorliegende Studie des neuen ECONICS INSTITUTE zur Arbeits- und Leistungsfähigkeit der Natur in Deutschland¹ erlaubt auf Grundlage von internationalen Ansätzen und satellitenbildbasierten Daten eine neuartige Betrachtung der Landschaft.

Natur ist keine grüne Kulisse, die wir lediglich zur Erholung und Entspannung aufsuchen und betrachten können oder ein Warenlager, in dem wir uns nehmen, was wir für unser Wirtschaften benötigen. Vielmehr besteht die Natur aus komplexen Systemen, die im wahrsten Sinne des Wortes Arbeit verrichten, um zu existieren und zu funktionieren. Durch die physikalische Arbeit schaffen sie auch unsere Existenzgrundlage. Die vielen miteinander verwobenen Ökosysteme sind haushaltende Systeme, die mit knappen Ressourcen wirtschaften müssen: Energie, Nährstoffe und Wasser. Sie sind vor allem Energiewandler, in denen Sonnenenergie vorrangig dafür eingesetzt wird, Biomasse zu produzieren.

Die Biomasse ist wiederum Ausgangspunkt für vielerlei natürliche Funktionen. Wenn Ökosysteme fruchtbaren Boden bilden und schützen, den Wasserkreislauf aufrechterhalten, die die Landschaft befeuchten und kühlen, Treibhausgase binden und speichern oder Trinkwasser reinigen, sind immer Prozesse involviert, die Energie kosten. Ebenso wie die Wirtschaftskraft des Menschen von der Verfügbarkeit von Energie abhängt, muss in Ökosystemen hochwertige Energie

bereitgestellt werden, die für physikalische Arbeit genutzt werden kann.

Die Energieversorger des globalen Ökosystems sind die grünen Pflanzen, die die Lichtenergie mit Hilfe von Wasser und Kohlendioxid in biochemische Energie umwandeln. An Land sind vor allem ausgedehnte Waldlandschaften die produktivsten Kraftwerke. Sonnenstrahlung ist global zwar im Überfluss vorhanden, aber die "Energiewandlungskraftwerke" benötigen geeignete Arbeitsbedingungen, um leistungsfähig zu sein.

Die Idee, dass in Ökosystemen Funktionen vorhanden sind, die Menschen als sogenannte Ökosystemleistungen benötigen und nutzen, wird seit zwei Jahrzehnten intensiv diskutiert, hat jedoch unsere Einstellung zur Natur noch nicht grundlegend verändert. Die aktuell deutlich zunehmenden Witterungsextreme, wie Hitzewellen oder Starkregen lassen allerdings viele Menschen besser verstehen, dass wir nicht nur technische Lösungen zur Bekämpfung der Klimakrise benötigen, sondern dass auch naturbasierte Lösungen von großer Relevanz sind. Hierbei handelt es sich nicht um eine rückwärtsgewandte "naturschwärmerische" Vorstellung, sondern um Physik. Im Laufe der Evolution hat die Fähigkeit des globalen Ökosystems zugenommen, das Weltklima zu regulieren und zu puffern. Dies steht wesentlich mit der Umwandlung von Strahlungsenergie und der Aufnahme sowie Speicherung von Treibhausgasen in Verbindung, aber auch mit der Rückhaltung und Verdunstung von

¹ Yojana Adhikari, Pierre L. Ibisch, Peter Wohlleben, Anselm Schneider, Daniel Johnson (2025). Working landscapes under climate change need to be green, moist and cool - a case study of Germany. Preprint <https://zenodo.org/records/17174872>

Wasser sowie mit Wolkenbildung und von der Vegetation beeinflussten Niederschlägen.

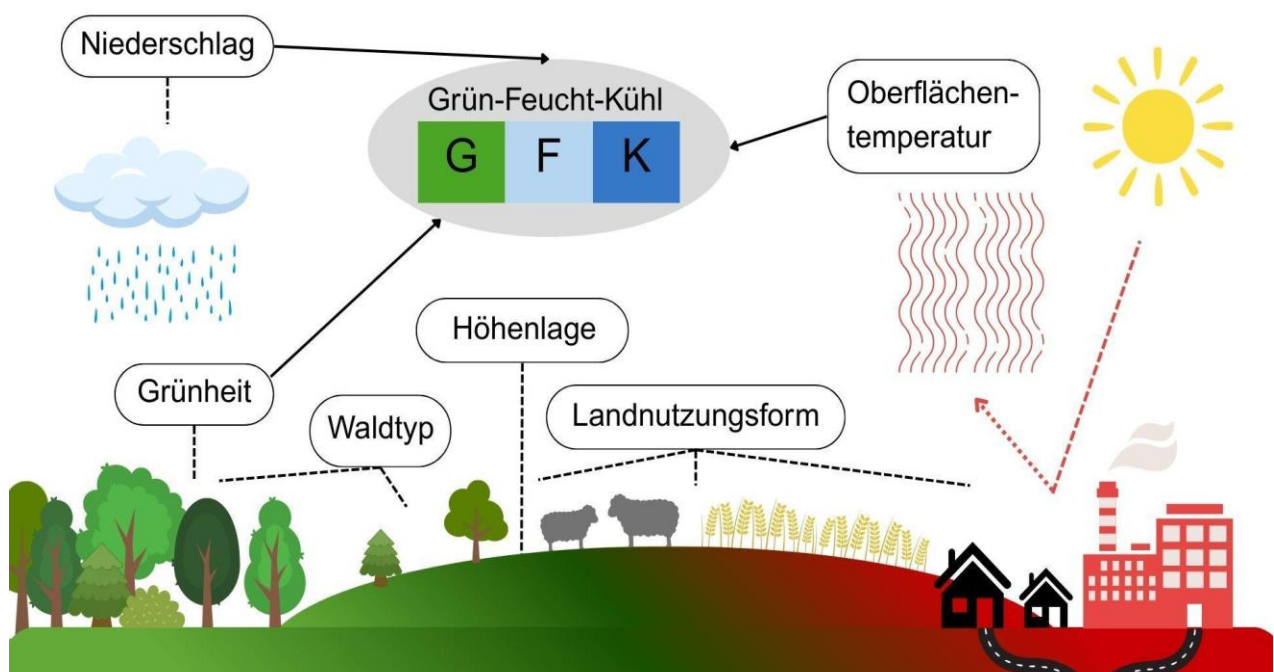
Eine entscheidende Einsicht ist: Ohne die grünen Pflanzen und die von ihnen geprägten Ökosysteme wäre es auf den Kontinenten der Erde heißer, trockener und lebensfeindlicher.

Die grüne Vegetation, die Sonnenenergie einfängt und anderen Lebewesen zur Verfügung stellt, beschattet den Boden, speichert Wasser, reinigt es und pumpt es aus dem Boden; durch Verdunstung sorgt sie für kühlere Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und Wolkenbildung. Grüne Vegetation verringert Hitze und Trockenheit überaus effektiv – aber wenn

die Bedingungen zu extrem werden, leidet sie auch unter ihnen. Wasser und gemäßigte Temperaturen sind wichtige Zutaten für die Arbeitsfähigkeit der Ökosysteme. Hinreichende Mengen Wasser können für Lebewesen höhere Temperaturen erträglicher machen. Kühlere Temperaturen reduzieren den Wasserverlust durch Verdunstung und erleichtern Kondensation.

Zusammenfassend gilt: Grüne Vegetation, Wasser und relative Kühle bilden eine zentrale Dreiecksbeziehung, die das Leben und die Arbeitsfähigkeit der Ökosysteme ermöglicht.

Arbeitende und wirtschaftende Landschaften



Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozesse in der Landschaft

Die Triade „Grün-Feucht-Kühl“ bedeutet eine bessere Leistungsfähigkeit der Natur. Hierbei geht es nicht nur um grüne Wälder und andere grüne Ökosysteme, sondern auch um verfügbares Trinkwasser, menschliche Gesundheit und Wirtschaftskraft. Hohe Temperaturen bedeuten nicht nur ernste Gesundheitsrisiken für immer mehr Menschen, sondern zusammen mit Trockenheit zunehmend auch Ernteverluste in der Landwirtschaft und den Verlust von Forsten und Wäldern.

Die positive „Grün-Feucht-Kühl“-Triade verstärkt sich selbst. Positive Rückkopplungen führen dazu, dass dort, wo es kühler und feuchter ist, grüne Vegetation besser gedeihen kann, die wiederum das Wasser besser zurückhält und sich auch bei höheren Temperaturen kühlen kann. Solche Rückkopplungen gelten allerdings auch dort, wo es kritisch heiß und trocken wird: Die Lebensbedingungen für grüne Pflanzen verschlechtern sich, und sie können ihre Umgebung nicht mehr kühlen und

befeuchten. Hitze, Trockenheit und die Schwächung der grünen Vegetation befeuern sich gegenseitig, was regelrecht zu einer Abwärtsspirale führen kann, mit der die Leistungsfähigkeit der Ökosysteme abnimmt. Dies hat dann Folgen für alle Ökosystemleistungen, an denen Menschen Interesse haben. Dazu gehört nicht zuletzt auch die natürliche Klimaschutzwirkung der Natur: In austrocknenden und geschwächten Wäldern oder Mooren wird der gespeicherte Kohlenstoff freigesetzt, was wiederum den Klimawandel zusätzlich antreibt.

Die Problematik dieser Rückkopplungen und Abwärtsspiralen wird in der wissenschaftlichen Forschung inzwischen intensiv bearbeitet und ist gut dokumentiert. Die Befunde zeigen entsprechend, dass Hitzewellen sich selbst verstärken und ausbreiten können und dass heiße, ausgetrocknete Landschaften weniger Regen erhalten als grüne und feuchte.



Die „Grün-Feucht-Kühl“-Triade in Deutschland:

Grün macht feucht und kühl!

Erstmals wurden jetzt die Wechselwirkungen von Vegetationszustand, Temperatur und Niederschlag in der ECONICS-Studie für Deutschland bearbeitet. Mit Hilfe von hochaufgelösten Daten zur Grünheit der Vegetation, zu den Oberflächentemperaturen und zum Niederschlag sowie zusätzlichen Parametern konnten entsprechende Wechselbeziehungen mit Hilfe von statistischen Modellen nachgewiesen werden. Zum Einsatz kamen als Datengrundlage dabei unter anderem frei verfügbare Satellitenbilddaten für das gesamte Bundesgebiet. Untersucht wurden die Jahre 2018 bis 2024, also einschließlich der Periode miteinander verkoppelter Witterungsextreme und der fünf wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (2020, 2018, 2022, 2023, 2024).

Die Oberflächentemperaturen² der untersuchten Jahre wurden gezielt gefiltert: Untersucht wurden die Tage mit besonders hohen Temperaturen, an denen die Austrocknung, Hitzebelastung und Schädigung von Menschen und Natur besonders ausgeprägt sind. Dies waren in den verschiedenen Jahren jeweils Dutzende von Tagen (maximal über 60 Tage in 2018 und 2022, minimal unter 40 in 2020³).

Die Vegetationsgrünheit wurde unter Ausnutzung eines gebräuchlichen Index⁴ erfasst. Berücksichtigt wurden nur die extremen Tage am Ende des Sommers (September), wenn Dürre und Hitze potenziell die Wälder geschwächt haben, Grasland unter Umständen vertrocknet und braun ist sowie die Äcker im Extremfall ohne Pflanzenbedeckung nach der Ernte brachliegen. Am Ende des Sommers wird deutlich, wo die Ökosysteme unter Hitze und Trockenheit besonders stark gelitten haben.

Es ist ein bemerkenswertes Ergebnis, dass die *Vegetationsgrünheit am Ende des Sommers* sich als derjenige Parameter erwies, der niedrigere Oberflächentemperaturen statistisch verlässlicher vorhersagt als Niederschlag oder die Höhe über dem Meeresspiegel.

Die Landnutzung (z.B. Wald, Wiese, Industriefläche) beeinflusst zu fast einem Fünftel die Verteilung der Oberflächentemperaturen in Deutschland, so viel wie sonst kein anderer Faktor.

Erwartungsgemäß tragen Wälder besonders effektiv zur Kühlung bei, während industrielle und städtische Infrastruktur sowie Landwirtschaft die Landschaften erwärmen.

² Satellit: Landsat 8 & 9; 30 Meter Auflösung; Aufnahmen alle 16 Tage

³ Als heiße Tage gelten hier solche, an denen mindestens ein 30x30-Meter-Pixel eine Temperatur von 40°C erreicht hat. Die Zahl der entsprechenden heißen Tage könnte noch größer gewesen sein, da die Satelliten nicht alle Tage erfassen. Aber die größere Zahl der berücksichtigten Tage führt zur Erfassung verlässlicher räumlicher Muster.

⁴ NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, Satellit: MODIS, 250 Meter Auflösung; Aufnahmen alle 16 Tage

Ganz neu ist das Ergebnis, dass die Vegetationsgrünheit an einem bestimmten Ort in Deutschland offenkundig mit einem bedeutenden Anteil der Niederschläge zusammenhängt. Pro Einheit des benutzten Vegetationsindex ergab sich durchschnittlich ein Plus von 297 Millimetern Jahresniederschlag. Umgekehrt konnte gezeigt werden, dass

hohe Landoberflächentemperaturen zu geringeren Niederschlägen führen, und zwar um minus vier Millimeter pro Grad Celsius (in Bezug auf die Temperaturen an heißen Tagen). Wenn man bedenkt, dass verschiedene Landschaften Deutschlands durchschnittliche Unterschiede von über fünf Grad Celsius aufweisen, ist das ein beträchtlicher Zusammenhang.



„Grün-Feucht-Kühl-Index“ Deutschland (2018-2024)

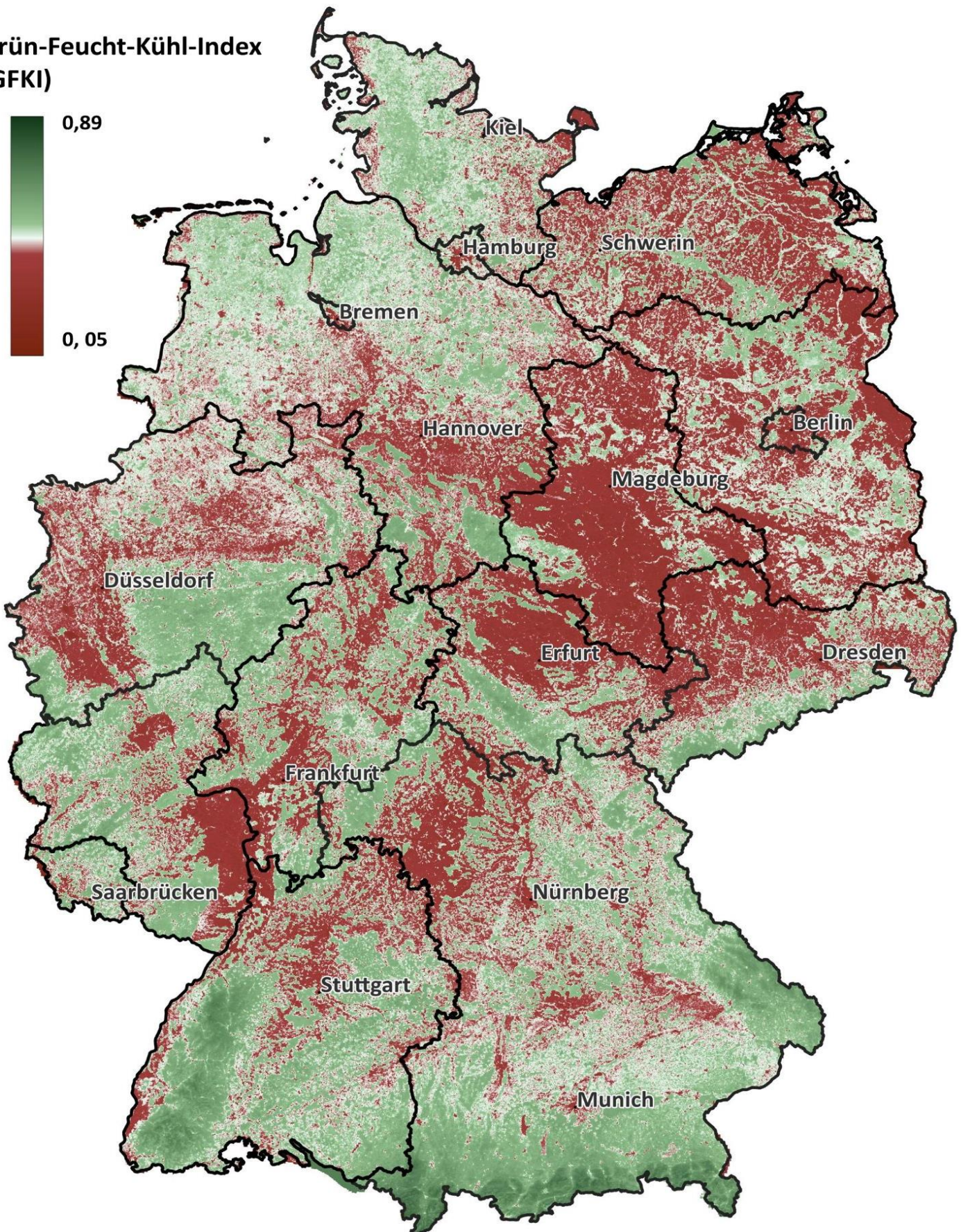
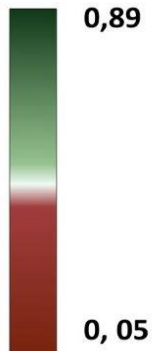
Mit dem Grün-Feucht-Kühl-Index (GFKI) wird ein neues, hochauflösendes Monitoringinstrument vorgeschlagen, um die Funktionsfähigkeit der Landschaft auf der Grundlage der „Grün-feucht-kühl“-Triade zu erfassen und messbar zu machen. Die Kombination der Oberflächentemperaturen an heißen Tagen, der Grünheit des Landes am Ende des Sommers (September) sowie die jährlichen Niederschläge ergeben den Index. Die dimensionslosen Index-Werte reflektieren die Gesamtarbeits- und

Leistungsfähigkeit der Ökosysteme, welche nicht nur die Biomasseproduktion, sondern vor allem auch die regulierenden Ökosystemleistungen wie etwa Kühlung und Befeuchtung der Landschaft bei Hitze und Trockenheit umfassen.

Unten wird der Index als Mehrjahresdurchschnitt für die Periode von 2018 bis 2024 dargestellt. Je höher der Indexwert, desto leistungsfähiger ist die Landschaft und umgekehrt. Die Werte streuen in Deutschland in der genannten Periode von 0,05 bis 0,89.

Der „Grün-Feucht-Kühl-Index“ (GFKI) für Deutschland (2018-2024)

Grün-Feucht-Kühl-Index
(GFKI)

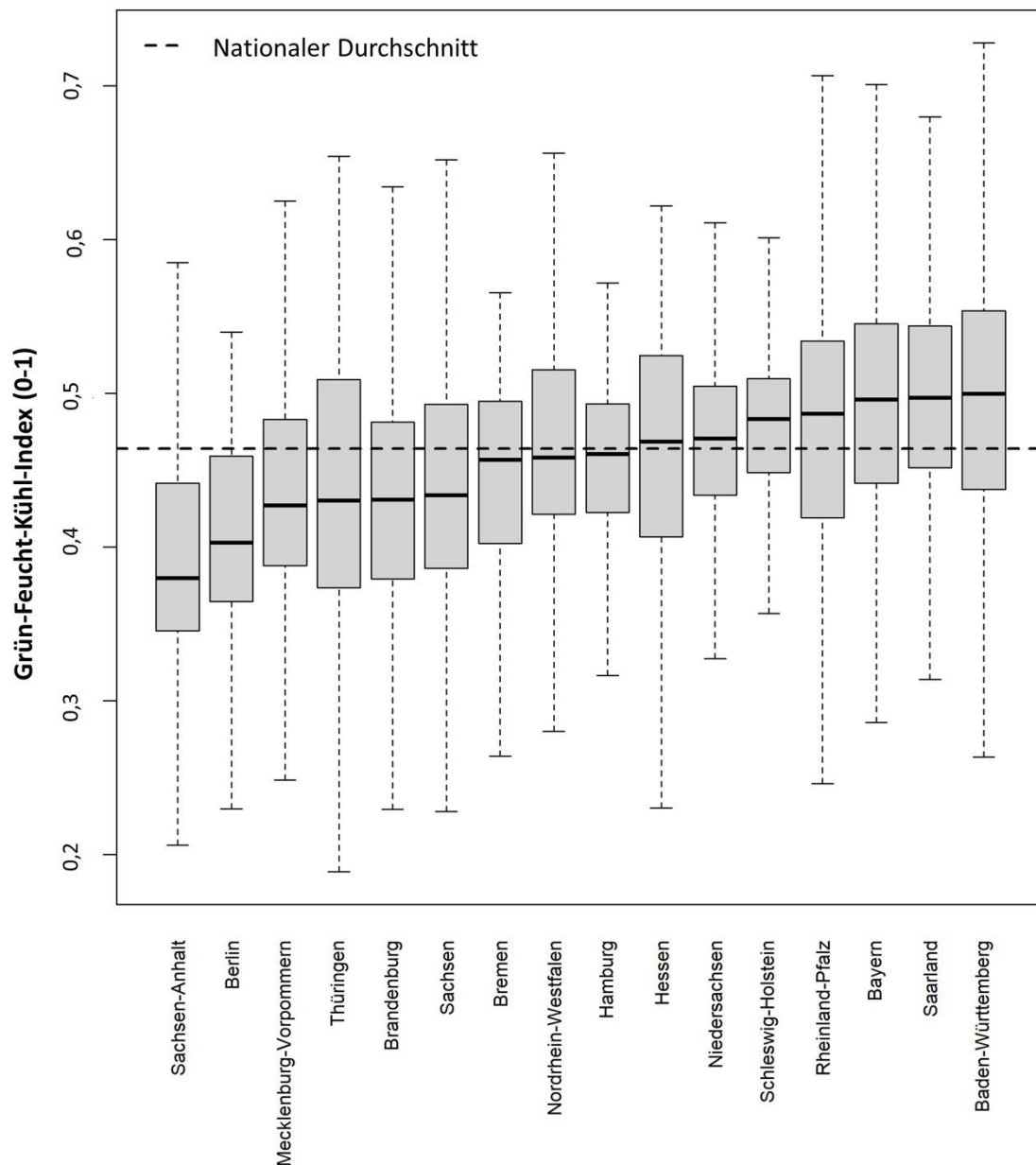


Die GFKI-Karte zeigt eine klare räumliche Differenzierung der Funktionsfähigkeit der Landschaften in Deutschland.

Hohe GFKI-Werte finden sich besonders in größeren, zusammenhängenden Waldgebieten, in denen biomassereiche Vegetation, kühlere Oberflächentemperaturen und höhere Niederschlagsmengen zusammenkommen. Niedrige GFKI-Werte

finden sich u.a. im Tiefland mit starker Besiedlung und in Gebieten mit intensiver Landwirtschaft. Es zeigt sich deutlich, dass die Intensität der Landnutzung der wichtigste Hebel für die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Landschaft ist.

Die Landschaften der östlichen Bundesländer sowie Bremen, Nordrhein-Westfalen und Hamburg weisen unterdurchschnittliche „Grün-Feucht-Kühl“-Werte auf.



„Grün-Feucht-Kühl-Index“ Deutschland (2018-2024): Ranking der Bundesländer

Die thermalen Landschaften Deutschlands

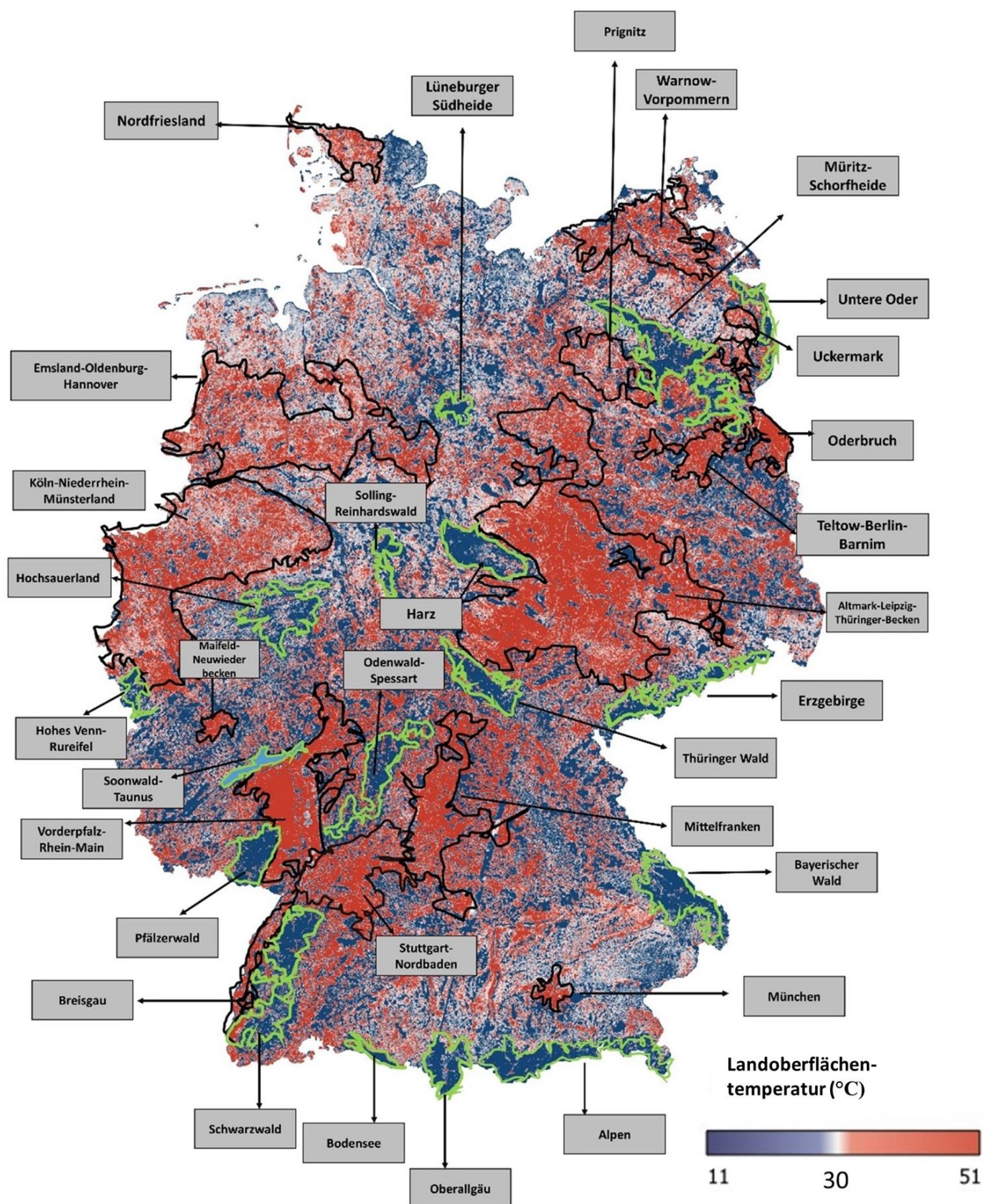
Die Erwärmung der Landoberfläche ist ein wichtiger Indikator der Funktionstüchtigkeit der Ökosysteme und gleichzeitig auch für Menschen ganz unmittelbar fühlbar. Deutschland kann regelrecht in "thermale Landschaften" gegliedert werden, die insbesondere an heißen Tagen zeigen, ob sie ein Kühlungsvermögen besitzen oder sich stark erwärmen.

Die städtische Hitze zieht bereits eine größere öffentliche Aufmerksamkeit auf sich, weil sehr viele Menschen direkt betroffen sind. Zu Recht werden die Entsiegelung und Begrünung von Städten gefordert. Die ausgedehnten „Hitzelandschaften“ außerhalb der urbanen Räume bleiben allerdings bisher weitgehend unbeachtet.

In der neuen ECONICS-Studie wird deutlich, dass sich Großlandschaften, in denen die natürliche Vegetation weitestgehend entfernt wurde, stark erwärmen. Der Grund dafür ist, dass es sich um „ausgeräumte“ Landschaften handelt, steht oftmals mit den eher guten Böden in Verbindung, die schon in historischen Zeiten zu intensiver Landwirtschaft führten. Flurbereinigung bzw. die sogenannte Melioration haben oft zur kritischen Situation erheblich beigetragen. In der Klimakrise werden hier nunmehr u.a. die Land- und Wasserwirtschaft durch Hitze und Trockenheit gefährdet.

Zu den auffälligen Hotspots in Deutschlands gehören das Oderbruch, das Maifeld–Neuwieder Becken, die Region Vorderpfalz–Rhein-Main, die Uckermark, die Region Altmark–Leipzig–Thüringer Becken, Teltow–Berlin–Barnim, Warnow–Vorpommern und die Prignitz. Diese Gebiete wiesen an heißen Tagen der Jahre 2018-2024 deutlich überdurchschnittlich hohe Oberflächentemperaturen auf. Gründe sind fehlendes Grün, intensive Bewirtschaftung und eine geringere Höhenlage über dem Meeresspiegel. Kleinere Hotspots waren außerdem in Mittelfranken, Stuttgart–Nordbaden, Köln–Niederrhein–Münsterland und München zu erkennen.

Im Gegensatz dazu konzentrieren sich vergleichsweise kühle und kühlende Landschaften in den Mittelgebirgs- und Waldregionen, darunter der Harz, Thüringer Wald, Erzgebirge, Solling–Reinhardswald, Odenwald–Spessart, Soonwald–Taunus, Hochsauerland, oder Hohes Venn–Rureifel. Selbstverständlich sind auch die höheren Lagen etwa im Schwarzwald, Bayerischer Wald, Oberallgäu oder Alpen kühler und feuchter. Diese Gebiete puffern Hitzeextreme und sorgen für eine stabile Kühlung der Ökosysteme. Dabei sind nicht allein die Höhen über dem Meeresspiegel relevant, sondern vor allem die grüne Vegetation, die vom Menschen stark geprägt wurde und wird.

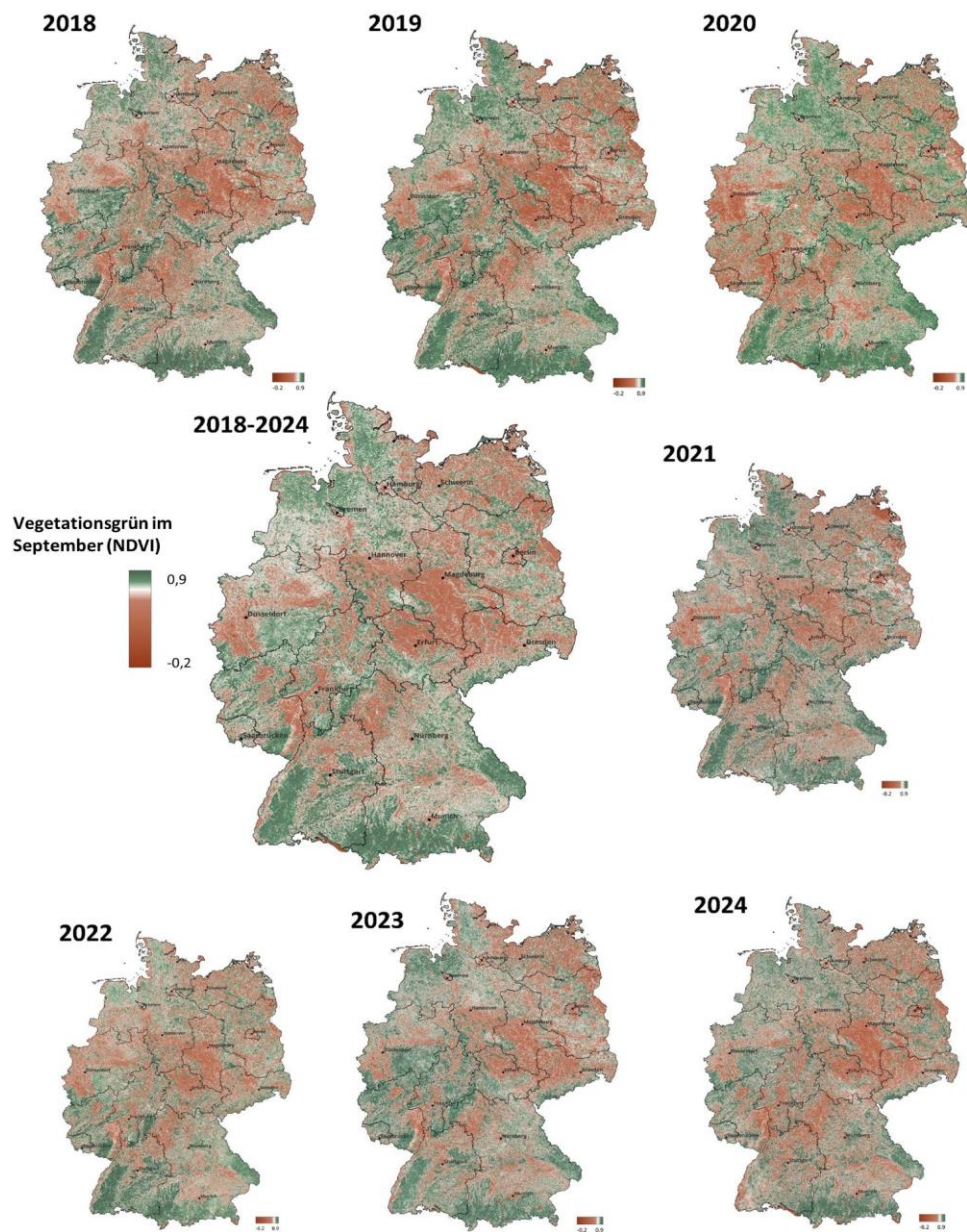


Hitze- und Kühlungslandschaften in Deutschland (an heißen Tagen 2018-2024, mittags; rot: überdurchschnittlich warm, blau: überdurchschnittlich kühl)

Nicht nur grüne Landschaften in Deutschland

Ohne Landnutzung und Besiedlung wäre die gesamte Landesfläche Deutschlands auch im Spätsommer von grüner Vegetation geprägt. Am Ende des Sommers sind auf einem beträchtlichen Teil der Fläche Deutschlands die Ackerfrüchte abgeerntet; oftmals ist der nackte Boden wochenlang immer extremeren Witterungen ausgesetzt. In

den letzten Jahren verloren auch Teile der Wälder in Folge des Baumsterbens ab 2018 ihr dunkles Grün. Die Intensität des Vegetationsgrüns im September variiert von Jahr zu Jahr in Abhängigkeit von der Austrocknung der Landschaft im Sommer. Es gibt allerdings große, markante Landschaften, die nur wenig Pflanzenbiomasse aufweisen.

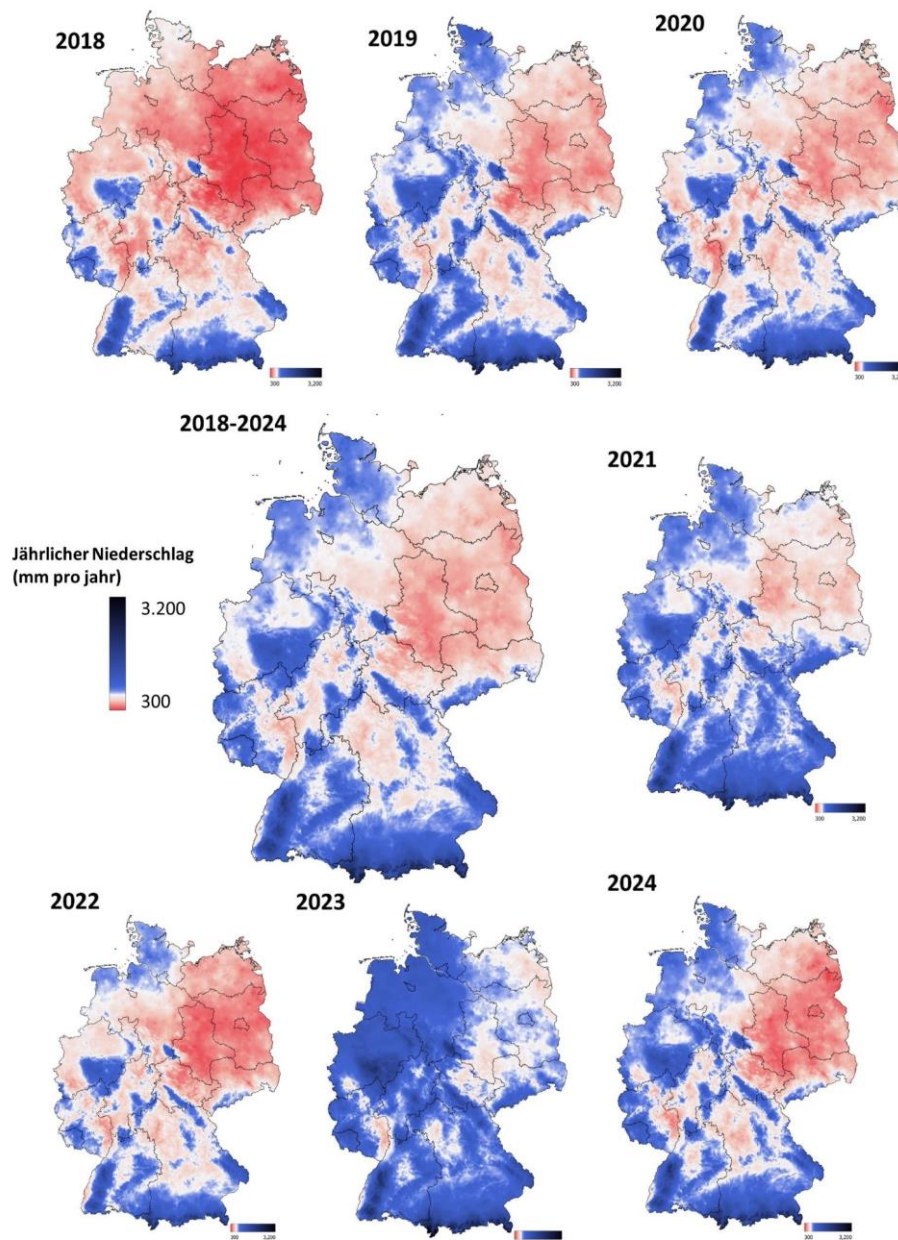


Spätsommer-Grünheit der Landschaften in Deutschland (September; 2018-2024)

Die ungleiche Verteilung von Regen in Deutschland ist eine Frage der Geographie und der Landnutzung

Der Niederschlag (nach Daten des Deutschen Wetterdienstes) ist in Deutschland ungleich verteilt. Hierbei spielen die Entfernung von den Meeren sowie die Höhe über dem Meeresspiegel eine Rolle. Die ECONICS-Studie zeigt allerdings, dass auch die Landnutzung einen starken Einfluss zu haben scheint.

Es fällt schon bei Betrachtung der Karten auf, dass es insbesondere in heißen Jahren dort weniger geregnet hat, wo sich die Landschaft stärker erwärmt hat und weniger grün ist (siehe etwa 2018 oder 2022). Ein solcher Zusammenhang konnte statistisch belegt werden.



Jahresniederschläge in Deutschland (2018-2024)

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

„Grün, Feucht und Kühl“ als voneinander abhängige Dimensionen der Funktionstüchtigkeit von Landschaften

Die vorliegende ECONICS-Studie zeigt sehr deutlich, dass Wärmeregulierung, Vegetationsdecke und Feuchtigkeitsverfügbarkeit stark miteinander verbunden sind, was das Konzept von „grün – feucht – kühl“ als grundlegende ökologische Triade zur Aufrechterhaltung der Landschaftsfunktionalität unterstützt. Die gegenseitige Abhängigkeit von Grünflächen, Feuchtigkeit und Kühlung ist nicht nur eine Korrelation, sondern lässt sich thermodynamisch erklären.

Wie schon von verschiedenen Wissenschaftlerinnen hervorgehoben wurde⁵, sollte die Verdunstung von Pflanzen nicht als „Verschwendung“ von Bodenwasser betrachtet werden, sondern als eine Investition, die den Eintrag von

Feuchtigkeit in die Atmosphäre verstärkt und das Niederschlagspotenzial erhöht. Unsere Ergebnisse aus Deutschland bestätigen dieses Prinzip: Grünere und kühlere Landschaften erhielten durchweg mehr Niederschläge, während biomassearme und heißere Landschaften vergleichsweise trockener waren.

Obwohl (jährlicher) Niederschlag und Feuchtigkeit nicht dasselbe sind, wurde in der Studie der Niederschlag als verfügbarer Parameter für den Wassereintrag in unsere Analyse einbezogen. Er liefert die notwendige Basis für die Wasserversorgung, auf der die Vegetation funktioniert. Die Autor:innen sind sich bewusst, dass auch die saisonale Verteilung der Niederschläge eine Rolle spielt, obwohl ihre Bedeutung zwischen offenem Land und Wäldern variiert. Beispielsweise können Bäume mit tieferen Wurzeln auch Wasser aus den Winterniederschlägen im Sommer nutzen.



⁵ Makarieva, A. M., Nefiodov, A. V., Cuartas, L. A., Nobre, A. D., Pasini, F., Andrade, D., & Nobre, P. (2025). Assessing changes in atmospheric circulation due to ecohydrological restoration: How can global climate models help? *Frontiers in Environmental Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1516747>

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vegetationsgrünheit bei der Vorhersage der Kühlung durchweg besser abschnitt als die Niederschlagswerte, was unterstreicht, dass Regen allein keine ökologische Feuchtigkeit garantiert. Vielmehr ist es die Vegetation, die darüber entscheidet, ob Niederschläge effektiv zurückgehalten und recycelt werden, was zu kühleren und widerstandsfähigeren Landschaften führt. Dieser Prozess spiegelt die Rolle von grünem Wasser wider – dem Teil des Niederschlags, der in den Boden eindringt und direkt von Pflanzen für die Photosynthese, das Wachstum und die durch Verdunstung angetriebene Kühlung genutzt wird.

Die Einbeziehung von Niederschlägen in die Modelle verdeutlicht den Kontrast zwischen reinem Wassereintrag und des durch die Vegetation bedingten Wasserhaushalts. Degradiertere oder

spärlich bewachsene Regionen geraten in einen Teufelskreis der Dysfunktion: Eine reduzierte Vegetation senkt die Verdunstung, was die Oberflächentemperatur erhöht, den Niederschlag unterdrückt und die Erholung der Vegetation weiter hemmt. Solche Rückkopplungen sind für aride und semiaride Gebiete gut dokumentiert, werden aber jetzt auch in gemäßigten Breiten wie in Deutschland unter dem Einfluss des Klimawandels immer deutlicher. Das Entstehen und Verschärfung von Hitze-Hotspots wie der Region Altmark-Leipzig-Thüringer Becken oder dem Oderbruch zeigt, wie die Intensivierung der Landnutzung Landschaften in einen Zustand mit geringerer Funktionsfähigkeit versetzen kann, die vor allem auch mit einer verminderten Fähigkeit einhergeht, Hitze zu puffern und Wasser zu speichern.

Klimainfrastruktur und Klimarefugien

Wald- und Feuchtgebiete sind eine effektive „Klima-Infrastruktur“. Ihre Kühlfunktion ist nicht nur eine „Nebenleistung“ des Ökosystems, sondern eine wichtige biophysikalische Funktion, die sie durch ihre Fähigkeit, Energie und Wasser aufzunehmen, umzuwandeln und zu speichern, erfüllen.

Bewaldete Hochlagen wie der Schwarzwald oder der Bayerische Wald können als „Klimarefugien“ betrachtet werden, da sie nicht nur für regionale Abkühlung und hydrologische Stabilität sorgen, sondern auch Lebensräume für Arten bieten, die an kühlere Bedingungen angepasst sind. Die Bewahrung solcher Klimarefugien ist deshalb ein wesentliches Element von Strategien zur Anpassung an den Klimawandel und für den Erhalt der biologischen Vielfalt unter anthropogenen

Klimaveränderungen, da sie als vorübergehende oder langfristige Zufluchtsorte dienen, an denen Arten und Ökosysteme überleben können. Doch selbst innerhalb dieser kühleren Regionen zeigen unsere Ergebnisse deutliche Unterschiede. Die Intensität der Landnutzung (z.B. Forstwirtschaft, Tourismusinfrastruktur) kann den natürlichen Kühleffekt der Höhenlage und der Waldbedeckung fördern oder zunichte machen. Andere Studien haben auch gezeigt, dass Wälder im Vergleich zu anderen Landbedeckungen zwar generell kühlen, dieser Effekt aber innerhalb bewaldeter Regionen je nach Waldtyp, Intensität der Nutzung und den Eigenschaften der umgebenden

Landschaft variieren kann⁶. So wurde schon gezeigt, dass ältere und biomassereichere Buchenwälder in der Kernzone von Schutzgebieten selbst während extrem heißer und trockener Sommer grüner und kühler blieben als der Wald in der Umgebung⁷.

Waldökosysteme dürfen nicht selbstverständlich als “Kühlungsautomaten” angesehen werden,

da die Art und Weise der Bewirtschaftung maßgeblich Einfluss darauf nimmt, wie sich die Leistungsfunktion der Wälder unter Einfluss des Klimawandels entwickeln wird. In den vergangenen Jahren konnte gut beobachtet werden, dass ein zu starkes Auflichten von Laubwäldern einem “Heißschlagen” gleichkommt - zahllose Wälder haben dadurch ihren zu sehr aufgelichteten Oberstand verloren.

Klimaanpassung und Wiederherstellung von Ökosystemen

Das aus unserer Analyse abgeleitete Landschaftsrating bietet einen praktischen Rahmen für die Identifikation sowohl von Krisenregionen als auch der ökologischen „Kraftwerke“ in Deutschland. Gebiete können bewertet und priorisiert werden, damit Managementmaßnahmen und Naturschutzressourcen dort eingesetzt werden können, wo sie die größte Wirkung erzielen.

Landschaften mit verminderter ökologischer Funktionsfähigkeit sollten bestmöglich wiederhergestellt werden, während diejenigen mit hoher Funktionstüchtigkeit erhalten bleiben müssen. Ein angepasstes und effektives Management ist erforderlich, um die Ökosystemleistungen für die regionale und nationale Klimaresilienz zu sichern.

Die Stärkung der thermodynamischen Funktionen von Ökosystemen bringt mehrere Vorteile mit sich. Kühle und feuchte Landschaften reduzieren

Hitzestress und senken damit menschliche Gesundheitsrisiken bei extremen Temperaturen. Eine verbesserte Wasserspeicherung unterstützt die Landwirtschaft, sichert die Trinkwasserversorgung und verringert das Hochwasserrisiko. Gleichzeitig stabilisiert eine gesunde Vegetation die land- und forstwirtschaftlichen Erträge und fördert das menschliche Wohlergehen. Versorgende und kulturelle sowie regulierende Ökosystemleistungen stehen eng miteinander in Verbindung – aber die grundlegende Bedingung ist immer das Funktionieren der Ökosysteme. Umgekehrt gibt es in degradierten Landschaften eine Kaskade von Problemen: geringere Ernteerträge, Baumsterben und Waldschädigung, Verlust von Kohlenstoffsinken und stärkerer Oberflächenabfluss bei Starkregen mit einem gesteigerten Überschwemmungsrisiko.

⁶ Z.B.: Gohr, C., Blumröder, J. S., Sheil, D., & Ibisch, P. L. (2021). Quantifying the mitigation of temperature extremes by forests and wetlands in a temperate landscape. *Ecological Informatics*, 66, 101442. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101442>

⁷ Adhikari, Y., Bachstein, N., Gohr, C., Blumröder, J. S., Meier, C., & Ibisch, P. L. (2024). Old-growth beech forests in Germany as cool islands in a warming landscape. *Scientific Reports*, 14(1), 30311. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81209-0>

Roadmap für Politik und Management

Die Ergebnisse der ECONICS-Studie zeigen, dass eine bewusste und intensivere Auseinandersetzung mit sich erwärmenden und austrocknenden Landschaften in Deutschland eine dringliche Aufgabe ist, um weitere größere Schäden durch nicht angepasste Landnutzung abzuwenden. Die Landnutzung ist ein Wirtschaftsfaktor, aber sie vermag, sich selbst Schaden zuzufügen und klimawandelbedingten Risiken für Menschen und Wirtschaft vervielfachen.

Die Erkenntnis, dass grüne, feuchte und kühle Bedingungen die physikalische Arbeit von Ökosystemen widerspiegeln, bietet einen praktischen und messbaren Rahmen für die Bewertung der Umweltverträglichkeit und die Priorisierung von Maßnahmen.



Basierend auf unseren Ergebnissen ergeben sich konkrete politische Handlungsansätze:

Nationales Monitoring der Arbeitskapazität von Ökosystemen und Bestimmung eines „Brutto-Naturprodukts“

1. Erarbeitung und Bewertung einer nationalen **fernerkundungsgestützten Inventur der Ökosystemfunktionalität**. Die Ergebnisse einer solchen Inventur sollten in die Landnutzungsplanung, Siedlungsplanung und den Katastrophenschutz einfließen sowie Renaturierungsmaßnahmen derart orientieren, dass sie den größtmöglichen Nutzen auch für die Biodiversitätserhaltung und natürlichen Klimaschutz erbringen. Die Konzentration auf grüne, feuchte und kühle Gebiete ist hierbei besonders synergistisch. Das Monitoring positiver und negativer Veränderungen sowie eine

Quantifizierung der daraus resultierenden Wert- und Schadschöpfung können für die Schaffung von landnutzungslenkenden Instrumenten genutzt werden (z.B. Förderung des natürlichen Klimaschutzes).

2. Die **Berichterstattung mit Hilfe von neuen Indikatoren sollte institutionalisiert werden**. Die verfügbaren Daten sollten in regelmäßige nationale Berichte einfließen und eine neue Perspektive auf die Ökosysteme Deutschlands und ihre Produktionskapazität bieten. Dies darf nicht nur eine sektorale Aufgabe im Zusammenhang mit dem Naturschutz sein, sondern muss auch als grundlegend für die wirtschaftliche Entwicklung, den Lebensunterhalt und das Wohlergehen der Menschen anerkannt werden.
3. Im Rahmen der Berichterstattung können ökologische Leistungen neben der Wirtschaftsleistung in „nationalen Resilienzbewertungen“ quantifiziert werden. Dies würde die **Anerkennung der Ökosystemfunktionalität als Schlüsselbedingung für ökonomische Aktivitäten** erleichtern und den entscheidenden Beitrag der Ökosysteme zur nationalen Sicherheit und zum Wohlstand würdigen.
4. **Auf Grundlage eines Systems von funktionalen Indikatoren sollte ein „Brutto-Naturprodukt“ regelmäßig bewertet werden – die Gesamtheit aller Arbeitsleistungen bzw. die Funktionstüchtigkeit der Ökosysteme Deutschlands**. Hierbei geht es nicht um die Monetarisierung von Ökosystemleistungen, sondern die Etablierung eines grundlegenden Maßstabs für die Bewertung des „natürlichen Wohlstands“, der auch für die Messung einer nachhaltigen Entwicklung herangezogen werden kann.

Aktives Management der „Thermalen Landschaften“

1. **Kühlung von Agrarlandschaften durch strukturelle Diversifizierung:** Maßnahmen wie Agroforstwirtschaft, Hecken und Gehölzen können die Wärmebelastung reduzieren, Böden schützen und die Wasserrückhaltung verbessern sowie gleichzeitig zusätzliche Vorteile für die Kohlenstoffbindung und die Biodiversität bieten. Das Brachliegen von Äckern ohne Zwischenfrüchte ist zu vermeiden.
2. **Anerkennung des Schutzes von Mikro- und Mesoklima sowie Klimarefugien als eigenständige Schutzgüter:** Die Erhaltung von kühlenden und puffernden Klimarefugien muss in Schutzkonzepte integriert werden.
3. **Zielorientiertes Management von „Krisenlandschaften“ mit geringer Funktionsfähigkeit:** Ohne aktives Management in Form des Einbringens von Vegetationselementen droht diesen Gebieten mit geringen Werten des „Grün-Feucht-Kühl-Index“ eine weitere Verschlechterung der ökologischen Arbeitsfähigkeit: verminderte landwirtschaftliche Produktivität, Baumsterben, schlechtere Trinkwasserversorgung, Verlust von Kohlenstoffsinken und vermehrter Oberflächenabfluss. In „ausgeräumten Landschaften“ sollte auch die Entwicklung neuer Wälder ermöglicht werden.

Natürlichen Klimaschutz besser definieren

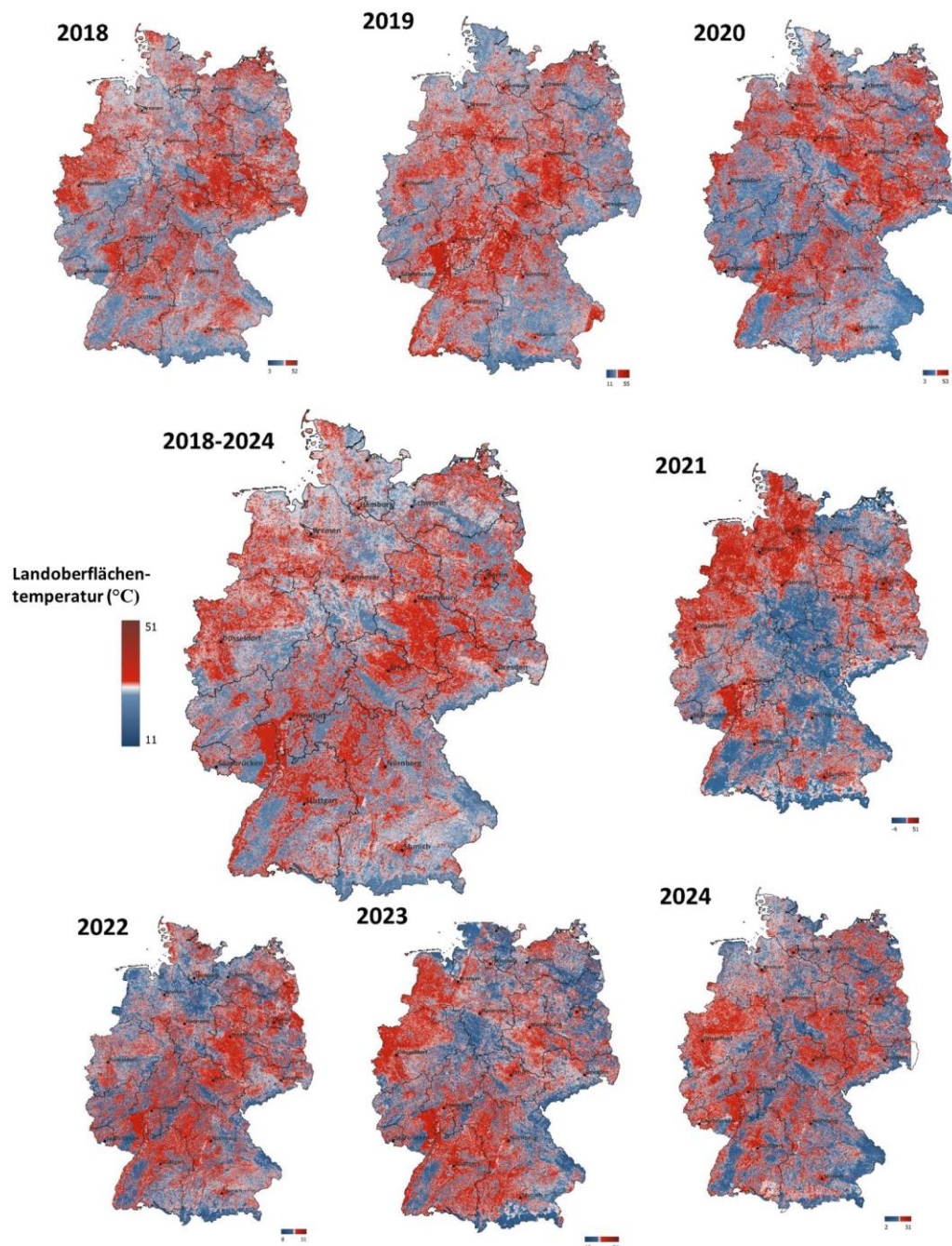
1. **Stabilisierung von Kohlenstoffspeichern durch Mikro- und Mesoklimaschutz:**
Die Analyse zeigt, dass die Bewertung menschlicher Eingriffe in die Landschaft und die Nutzung pflanzlicher Biomasse im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf das Klima erweitert werden sollte. Neben der Verhinderung von Kohlenstoffemissionen in der Landschaft bzw. der Unterstützung kohlenstoffspeichernder Ökosysteme, sollte der Schutz kühlerer und gepufferter Mikroklimata zur Stabilisierung der Ökosystemkohlenstoffspeicher dringend gefördert werden.
2. Weitere Studien sollten **Mindestgrößen für die wirksame und nachhaltige Funktion kühlender Landschaften** ermitteln. Dies könnte dazu beitragen, dass künftige Genehmigungsverfahren für die Landnutzung eine weitere Fragmentierung relativ funktionstüchtiger Ökosysteme verhindern und ausreichend große, funktionsfähige Ökosysteme schaffen. Es wird vorgeschlagen, eine entsprechende **Klimaflurbereinigung** zu konzipieren.
3. Die Ergebnisse der Studie sollten auch im Rahmen der **Bewirtschaftung und Nutzung von Wäldern** einfließen, einem Bereich, in dem der Klimaschutz eine immer wichtigere Rolle spielt. Da die Biomasse, die Zusammensetzung der Baumarten und die durch Maschinen verursachten Bodenschäden einen erheblichen Einfluss auf die Funktion des Ökosystems in Bezug auf Kühlung und Niederschlag haben, muss dies in Förderrichtlinien sowie auch in Gesetzen und Vorschriften Beachtung finden.



Anhang

Zeitreihenvergleich der Landoberflächentemperaturen

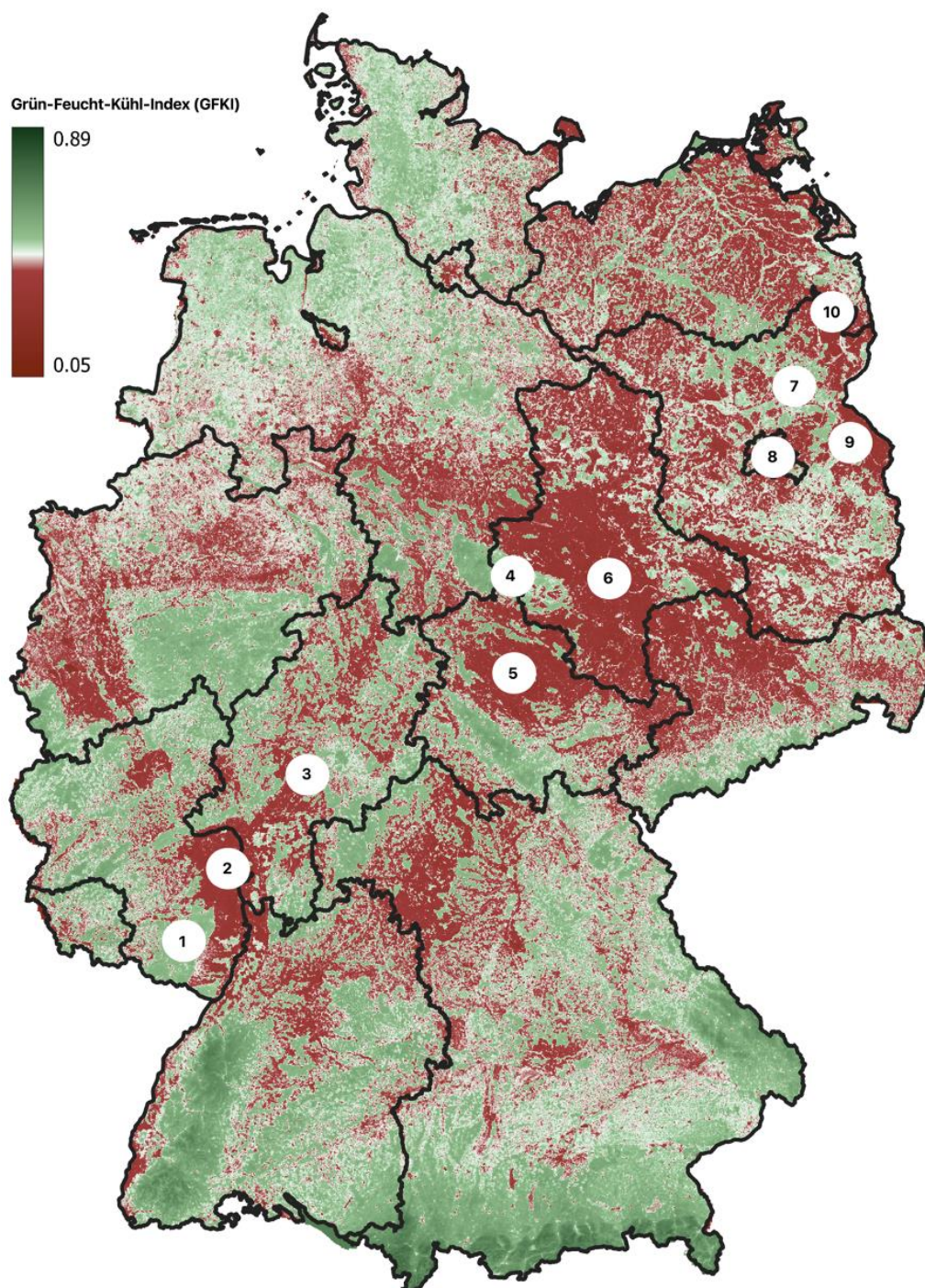
Die nachfolgende Karte zeigt einen Zeitreihenvergleich der mittleren Landoberflächentemperaturen an den heißen Tagen zwischen 2018 und 2024.

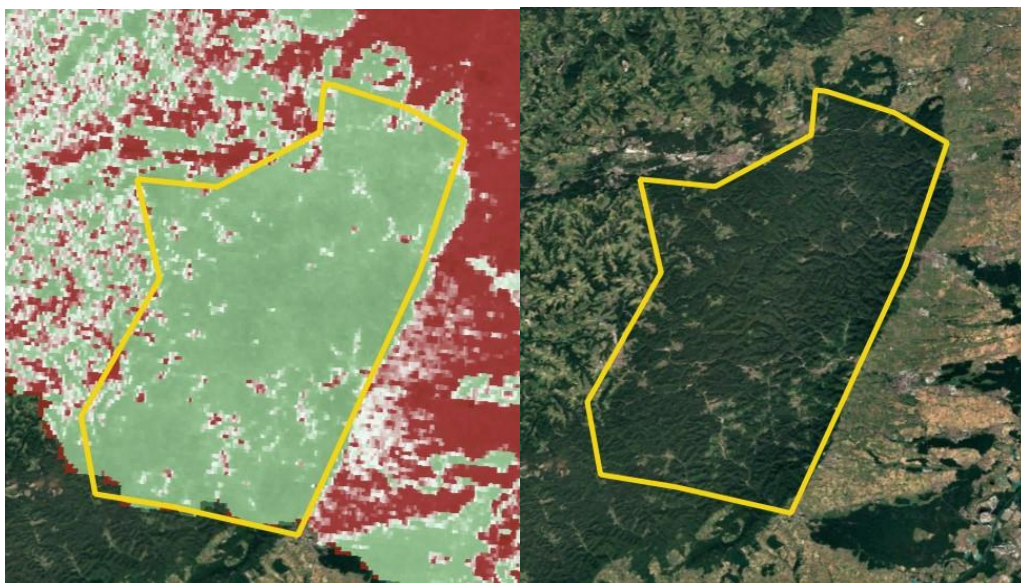


Jahresvergleich der mittleren Landoberflächentemperatur an den heißen Tagen in Deutschland von 2018-2024

Ein Transekt durch Deutschland: ausgewählte Beispiellandschaften und ihr Grün-Feucht-Kühl-Index

Der nachfolgende Abschnitt enthält eine Auswahl an Landschaften mit Detailansichten in Regionen, in denen sich sowohl positive, als auch negative Beispiele für Rückkopplungseffekte zeigen. Die Auswahl zeigt: nicht nur die geographische Lage oder Geländehöhe sind verantwortlich für die Leistungsfähigkeit der Landschaft – auch die Form der Landnutzung nimmt einen großen Einfluss. Grüne Landschaften bleiben kühl und feucht, während sich vegetationslose Landschaften aufheizen und gleichzeitig trockener sind und weniger Niederschlag erhalten.



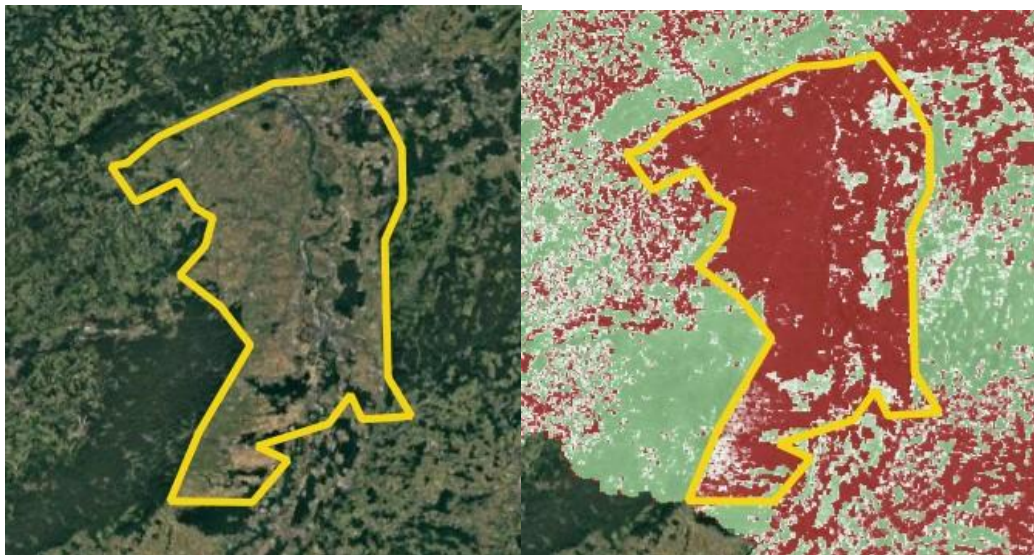


1. Nördlicher Pfälzerwald (Südwesten)

Mittelgebirge mit größtem zusammenhängenden Waldgebiet Deutschlands mit Misch- und Nadelwäldern.

GFKI-Wert: 0.54 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 26.2 °C

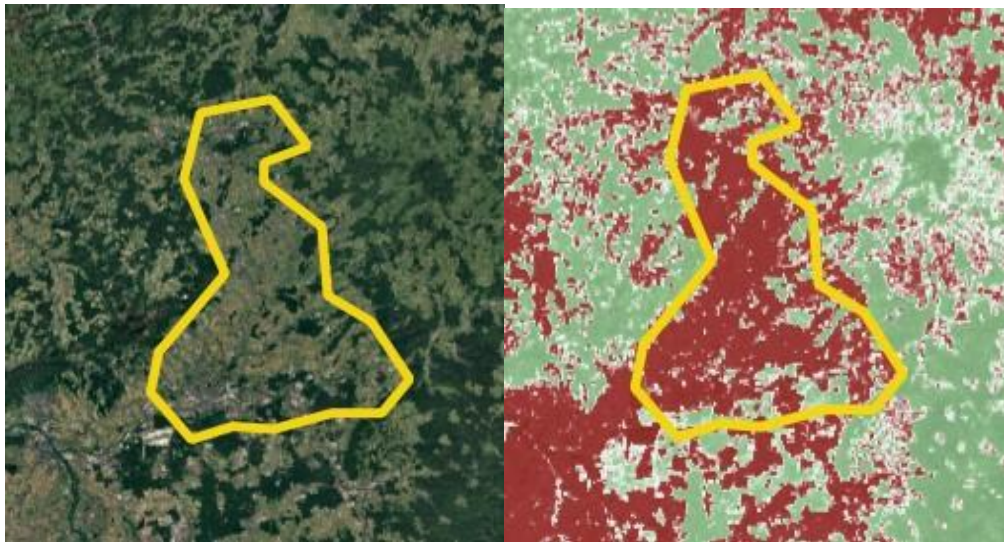


2. Vorderpfalz und Rhein-Main-Gebiet (Südwesten)

Intensiver Anbau von Wein, Gemüse und Obst (Vorderpfalz) sowie stark urbanisierte Flächen mit Verkehrsflächen, Siedlungsbereichen und Industriegebieten (Rhein-Main-Gebiet; u.a. Darmstadt, Mainz, Wiesbaden); im Norden angrenzend an den Taunus

GFKI-Wert: 0.37 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 33.8 °C

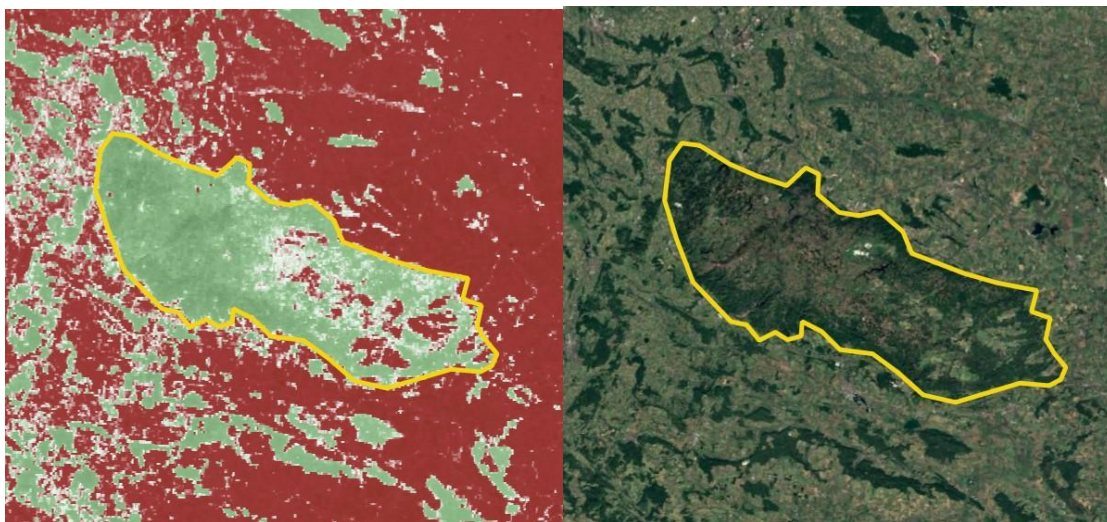


3. Nördliches Rhein-Main-Gebiet (mittlerer Westen)

Urbanisierter Raum mit Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur in Frankfurt am Main bis Hanau sowie mit von Ackerbau geprägten Landschaften geht im Osten in den Büdinger Wald und den Vorderen Spessart über

GFKI-Wert: 0.38 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 32.4 °C

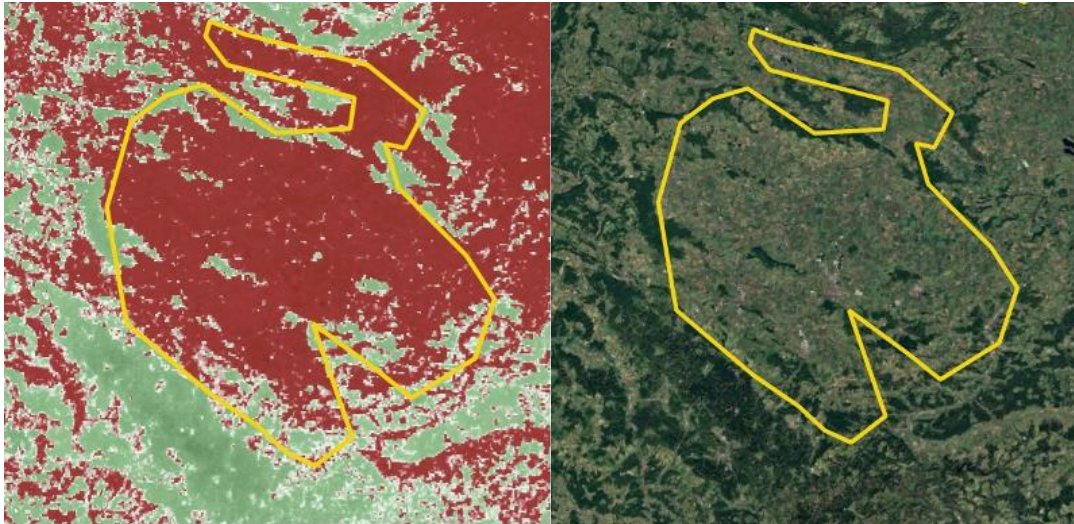


4. Harz (südliches Norddeutschland)

Mittelgebirge mit ehemals von Fichten geprägten Nadelforsten. Im östlichen Teil erscheinen waldfreie Gebiete mit höheren Indexwerten, ebenso deutliche Abgrenzung zum Harzvorland, der Magdeburger-Börde und der Altmark im Norden bzw. Nordosten.

GFKI-Wert: 0.52 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 26.2 °C

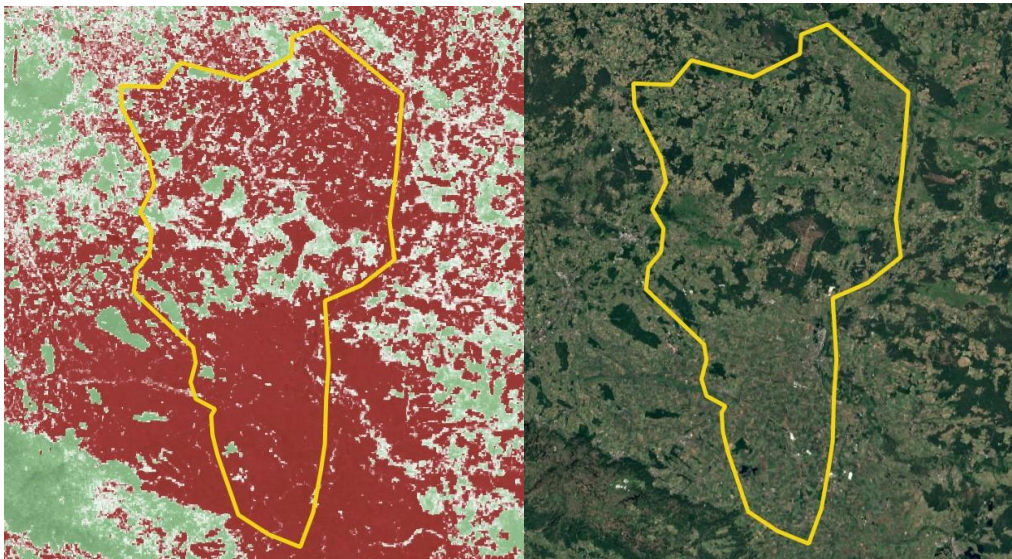


5. Thüringer Becken (Ostdeutschland)

Fruchtbare Löss- und Ackerböden mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung für Getreide-, Obst- und Gemüseanbau; weitgehender Verlust von Wäldern und Gehölzen

GFKI-Wert: 0.36 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 32.6 °C

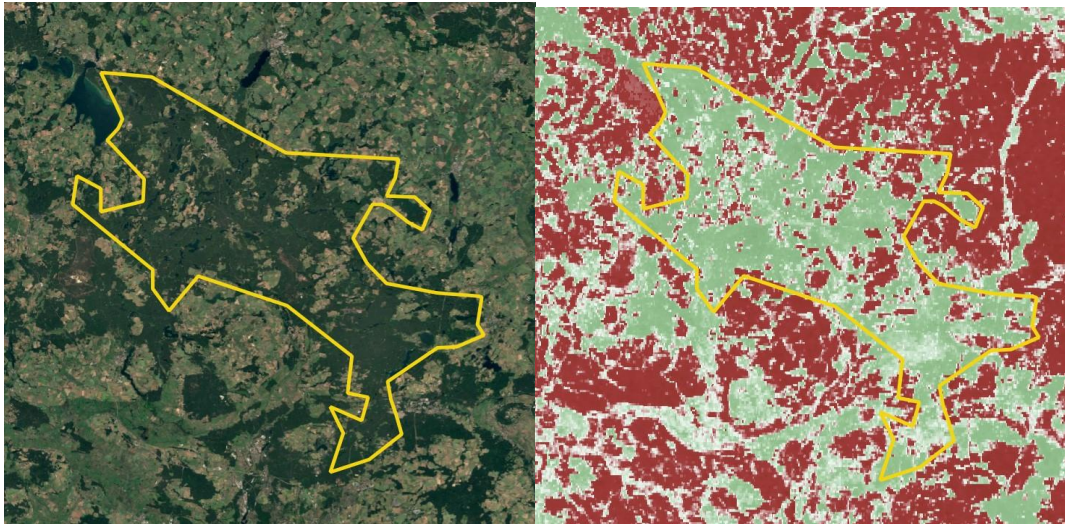


6. Altmark und Magdeburger-Börde (und weitere Landschaften) (Ostdeutschland)

Offene Agrarlandschaft nordöstlich des Harzes mit besonders fruchtbaren Lössböden, für Getreide- und Kartoffelanbau, sowie Zuckerrüben und Raps oder Wiesen. Nur kleine Siedlungen oder Städte.

GFKI-Wert: 0.36 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 31.9 °C

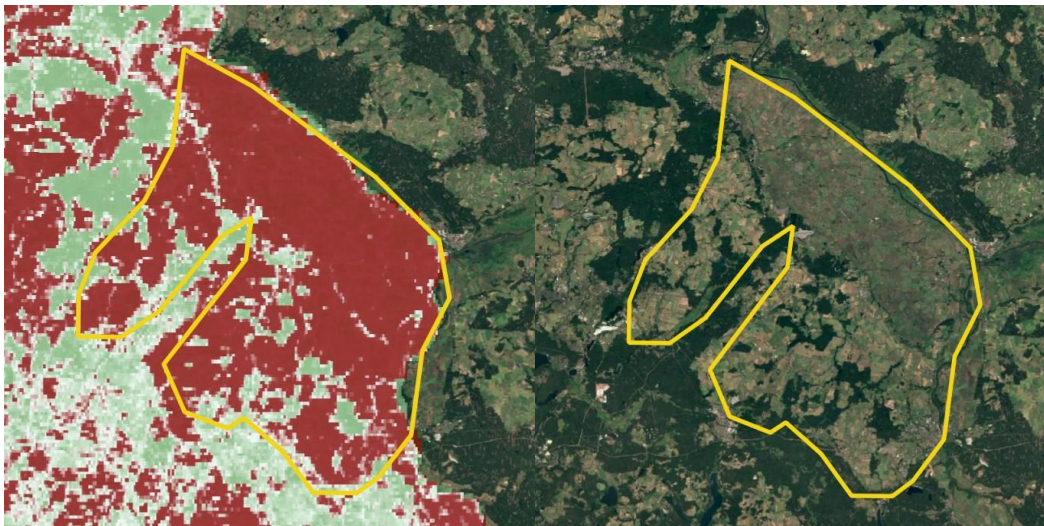


7. Uckermärkische Seenlandschaft, Schorfheide und nördlicher Barnim(Nordosten)

Endmoränenlandschaft mit größeren Nadelforsten und Laubwäldern, Seen, Mooren sowie extensiv genutztem Grünland.

GFKI-Wert: 0.50 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 26.5 °C

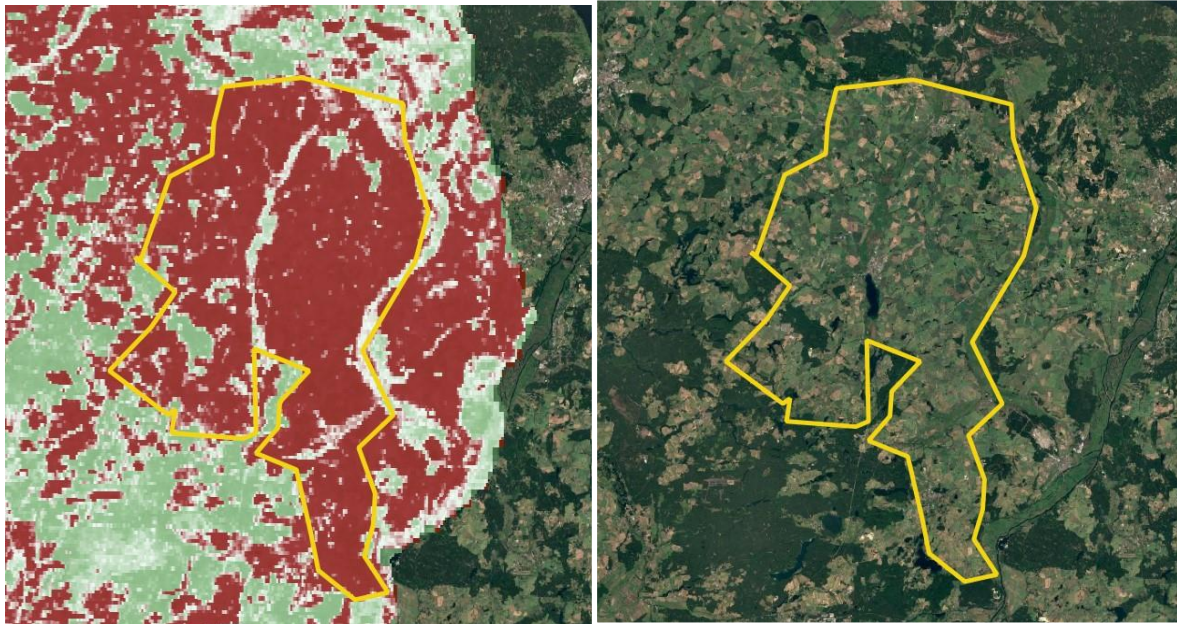


9. Oderbruch (Nordosten)

Das Oderbruch ist eine der größten Meliorationslandschaften Mitteleuropas. Ausgedehnte Sümpfe, Moore und Auenwälder wurden schon im 18. Jahrhundert trockengelegt; heute gibt es hauptsächlich Acker- und Grünlandnutzung. Wälder und Agrarlandschaften auf dem angrenzenden Barnim-Plateau.

GFKI-Wert: 0.37 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 31.9 °C



10. Uckermark (Ausschnitt) (Nordosten)

Die Uckermark ist geprägt von einer weitgehend offenen, stark meliorierten Kulturlandschaft mit intensiv genutzten Ackerflächen, Grünland und kleineren Waldfragmenten die inselartig auf der Karte erscheinen.

GFKI-Wert: 0.37 °C

Mittelwert der Oberflächentemperatur an heißen Tagen (mittags): 31 °C