

Hambacher Forst in der Krise

Studie zur Beurteilung der mikro-
und mesoklimatischen Situation
sowie Randeffekten



Hambacher Forst in der Krise

Studie zur Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Situation sowie Randeffekten

Diese Studie wurde erstellt im Auftrag von Greenpeace e.V.

Autor*innen:

Pierre L. Ibisch, Jeanette S. Blumröder

Centre for Economics and Ecosystem Management
an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde

Steffen Kriewald

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

➔ Kein Geld von Industrie und Staat

Greenpeace ist eine internationale Umweltorganisation, die mit gewaltfreien Aktionen für den Schutz der Lebensgrundlagen kämpft. Unser Ziel ist es, Umweltzerstörung zu verhindern, Verhaltensweisen zu ändern und Lösungen durchzusetzen. Greenpeace ist überparteilich und völlig unabhängig von Politik, Parteien und Industrie. Rund 590.000 Fördermitglieder in Deutschland spenden an Greenpeace und gewährleisten damit unsere tägliche Arbeit zum Schutz der Umwelt.

Impressum

Greenpeace e.V., Hongkongstraße 10, 20457 Hamburg, Tel. 040/3 06 18-0 **Pressestelle** Tel. 040/3 06 18-340, F 040/3 06 18-340, presse@greenpeace.de, www.greenpeace.de
Politische Vertretung Berlin Marienstraße 19-20, 10117 Berlin, Tel. 030/30 88 99-0 **V.i.S.d.P.** Bastian Neuwirth **Foto** Titel: © Greenpeace

Hambacher Forst in der Krise: Studie zur mikro- und mesoklimatischen Situation sowie Randeffekten

Pierre L. Ibisch¹, Steffen Kriewald², Jeanette S. Blumröder¹



Eberswalde/ Potsdam, 14. August 2019

¹ Centre for Ecorics and Ecosystem Management an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde (pibisch@hnee.de)

² Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Telegraphenberg A 31, 14473 Potsdam

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Zusammenfassung.....	2
Einleitung.....	3
Zielsetzung.....	10
Methodik.....	10
Ergebnisse	13
Diskussion.....	20
Empfehlungen	22
Quellen.....	23

Zusammenfassung

Der Hambacher Forst steht wie kein anderer Wald in Deutschland für die aktuelle Klimakrise. Statt neue CO₂-Senken zu schaffen, werden existierende durch Waldvernichtung abgebaut, um an fossile Brennstoffe zu gelangen, deren Verwendung den anthropogenen Klimawandel noch verstärken. Aber die Klimakrise erstreckt sich über mehrere Skalen. Sie ist nicht nur eine globale Krise, sondern existiert auch auf mikro- und mesoklimatischer Ebene.

Das Ziel dieser ersten Untersuchung zu Randeffekten ist die Analyse des vegetationsabhängigen Mikroklimas in und um den Hambacher Forst. Zunächst sollte hierzu festgestellt werden, welchen Einfluss Offenland und vor allem die Tagebaue auf die Oberflächentemperatur haben. Es kann beobachtet werden, dass die vom Tagebau Hambach ausgehenden Randeffekte die Situation des schützenswerten Hambacher Forsts eklatant verschlechtern. An den Waldrändern zeigt sich das vermehrte Absterben von Bäumen, die besonderem Hitze- und Trockenstress ausgesetzt sind. Zudem ist vor allem am dem Tagebau zugewandten Waldrand erheblicher Windwurf zu verzeichnen. Mit Hilfe von satellitengestützten Auswertungsverfahren (MODIS und Landsat 8) wurde bestätigt, dass im Frühling, Sommer und Herbst der Tagebau Hambach der Wärmepol des Untersuchungsraums ist (MODIS: im Hitzesommer 2018 knapp 45°C). Die (größeren) Waldgebiete sind gemäß MODIS-Daten in diesen Jahreszeiten die kühleren Räume. Diese kühlende Wirkung ist insbesondere im Sommer ausgeprägt; in den Monaten Juni/Juli/August sind die kühleren Gebiete bis zu 22°C kühler als die wärmsten, im Winter beträgt die Temperaturdifferenz ca. 3°C. Im Sommer wird auch deutlich, dass das Gebiet des Hambacher Forsts im Durchschnitt 11°C kühler ist als die heißesten Räume im Untersuchungsgebiet. Die räumliche Verteilung des Mittels der Landsat 8 Oberflächentemperaturen bestätigt weitgehend die Muster der MODIS-basierten Analyse. Die Tagebaue und vor allem der Tagebau Hambach sind im Sommer die Hitzepole der Region. Es sind in manchen Jahren durchschnittliche Oberflächentemperaturen von über 45°C zu verzeichnen. Der Temperaturunterschied zwischen den heißesten und den kühleren Punkten im Untersuchungsraum beträgt im relativ heißen Sommer 2018 22°C. Es fällt auf, dass sich v.a. im heißen Sommer 2018 nicht nur die Tagebaue, sondern auch die Offenlandbereiche wie landwirtschaftlich genutzte Flächen und Siedlungsräume relativ stark erwärmen, während Wald- und Gehölzflächen vergleichsweise kühler bleiben.

Durch Wiederbewaldung kann eine sichtliche Kühlung der Landschaft erzielt werden. Wenn der aufgrund seines Alters und der Waldkontinuität schützenswerte Hambacher Forst erhalten werden soll, ist dringend ein Maßnahmenbündel umzusetzen, welches die Kühlung der Landschaft um ihn herum erreicht. Hierzu gehören der sofortige Stopp des weiteren Abbaggers des Tagebaus Hambach, die Rekultivierung und Wiederbewaldung von (ehemaligen) Straßen und auch des Kiestagebaus sowie an den Wald angrenzender Agrarflächen. Hierdurch soll eine thermische Pufferzone von idealerweise bis zu 500 m Breite eingerichtet werden, an der dem Tagebau zugewandten Seite aber mindestens bis zum Grubenrand.

Einleitung

Der Hambacher Forst ist ein Relikt eines ursprünglich kontinuierlichen Waldökosystems im Tiefland der Kölner Bucht, welches in dem seit Jahrtausenden besiedelten Gebiet zusehends unter Druck geriet. Seit Jahrhunderten ist die Landschaft von Agrarökosystemen und verinselten Waldrelikten geprägt, wobei erst im letzten Jahrhundert eine erhebliche Zerschneidung durch Verkehrsinfrastruktur und schließlich Waldvernichtung durch den Tagebau hinzukamen. Der Hambacher Forst bzw. „Die Bürge“ war vor der Zerstörung im 20. Jahrhundert eine der größten verbliebenen Waldinseln der Kölner Bucht (Abb. 1-2). Das nächstgelegene größere und naturnahe Waldgebiet befindet sich ca. 11 km entfernt; es handelt sich um den der Eifel zuzurechnenden Wald südwestlich von Eschweiler bzw. Aachen.



Abb. 1: Karte des Deutschen Reichs 1:100.000 (429) Düren [1902]. „Die Bürge“ nördlich von Mörschenich und der Forst Hambach östlich von Jülich sowie weitere Wälder nordwestlich von Kerpen bildeten bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts ein zusammenhängendes, größeres Waldgebiet.



Abb. 2: Lage des Hambacher Forsts (im Zentrum des Satellitenbildes von 1984) als größere Waldinsel inmitten der Agrarlandschaft der Kölner Bucht (Google Earth).

Seit den 1980er Jahren wurde der Rest des „Bürge-Waldes“ rasch verkleinert. Im Nordosten des Tagebaus entstand auf einer Abraumhalde die heute über 300 m hohe Sophienhöhe (Abb. 3).



Abb. 3: Aufforstung auf der Abraumhalde Sophienhöhe (Foto: Pierre Ibisch, Juli 2019).

1988 wurde mit der Rekultivierung durch Aufforstung begonnen. Auf der Zeitreihe der Satellitenbilder von 1984 bis 2014 lässt sich erkennen, wie die dunklere Färbung anzeigt, dass ein Forst aus jungen Bäumen entstanden ist, welcher inzwischen deutlich größer ist als der Hambacher Forst südlich des Tagebaus (Abb. 4).



1984



1994



2004



2014

Abb. 4: Landschaftsveränderungen um den Tagebau Hambach (Google Earth).

Der relikthartige Hambacher Forst muss aus ökologischen und waldhistorischen Gründen als schützenswert eingestuft werden. Hervorzuheben sind ohne Zweifel die verbliebenen Altbäume (vgl. Abb. 5) sowie vor allem der Tatbestand der jahrhundertelangen Waldkontinuität auf dieser Fläche inmitten einer ausgeräumten Agrar- und Industrielandschaft. Eine derartige Kontinuität manifestiert sich mutmaßlich in der Artenausstattung (vor allem auch im Boden) sowie einer stärker ausgeprägten Resilienz. Dafür sprechen zumindest verschiedene Studien in anderen Teilen Deutschlands bzw. Europas [z.B. 1]. Derartige Flächen mit Waldkontinuität sind in ganz Deutschland und vor allem im Rheinland sehr selten.



Abb. 5: Ältteste Buche des Hambacher Forsts (Foto: Pierre Ibisch, Juli 2019).

Angesichts der Verkleinerung der Fläche und der Beschaffenheit der an den Wald angrenzenden Gebiete stellt sich allerdings die Frage der Lebensfähigkeit des Waldes und der in ihm lebenden Organismen. Dabei geht es um Verinselung bzw. Verlust von Konnektivität sowie in besonderem Maße auch um Randeffekte. Der Wald grenzt zu allen Seiten an Offenland, entweder landwirtschaftlich genutzte Flächen oder Tagebaue (inkl. Kies). Zur weiteren Beeinträchtigung des Waldes kam auch die Zerschneidung durch die Autobahn A4 und weitere Straßen hinzu. Die A4 wurde inzwischen südlich umgeleitet. Die ehemalige Autobahn-Fläche im Wald stellt sich heute als überwiegend vegetationslose Trasse mit verdichtetem Boden aus standortfremdem Material dar (Abb. 6).



Abb. 6: Ehemalige Autobahn A4 durch den Hambacher Forst (Foto: Pierre Ibisch, Juli 2019).

Zu den für Waldökosysteme besonders relevanten Randeffekten gehört das auf den Waldrand wirkende Offenlandmikroklima. Während intakte Wälder mit reicher Biomasseausstattung sowie geschlossenem Kronendach in erheblichem Maße dazu in der Lage sind, ein eigenes, relativ gemäßigtes Mikroklima auszubilden, zeichnet sich Offenland ganz allgemein durch höhere Durchschnitts- und Maximal-Temperaturen, stärkere Austrocknung sowie größere Schwankungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit aus. Dies ist gerade in Zeiten des voranschreitenden Klimawandels von erheblicher Bedeutung. Vor allem 2018 und 2019 zeichnen sich durch eine hohe Zahl von Hitzetagen sowie durch ausgeprägte Trockenheit aus. Verschärfend könnten auch hydrologische Veränderungen durch die Ausweitung des Tagesbaus wirken. Umso bedeutsamer ist es, dass die Umgebung des Hambacher Forsts nicht erwärmend und austrocknend auf diesen einwirkt. Weitere Randeffekte ergeben sich auch durch Windeinwirkungen, v.a. wenn der Wald ohne einen strukturreichen Waldrand auf das Offenland trifft, wie es am Rand zum Tagebau der Fall ist. Es kommt zu Windwurf von Bäumen und zur weiteren Verstärkung der Austrocknung.

Im Rahmen einer Begehung des Waldes Mitte Juni 2019 konnte beobachtet werden, dass derartige Randeffekte die Situation des Waldes eklatant verschlechtern. An den Waldrändern zeigte sich das vermehrte Absterben von Bäumen (Abb. 7). Betroffen sind nicht allein die wenig standortgerechten Fichten, sondern vor allem auch die Buchen.



Abb. 7: Absterbende Bäume, darunter Buchen und Fichten am dem Tagebau zugewandten Waldrand im Hambacher Forst (Fotos: Pierre Ibisch, Juli 2019).

Das Absterben der mittelalten Buchen erfolgt offenkundig sehr plötzlich; teilweise wurde vor der Austrocknung nicht einmal mehr das Chlorophyll der Blätter abgebaut; es handelt sich offenkundig um einen raschen Hitze- und Trocknistod (Abb. 8).



Abb. 8: Mutmaßlich durch starke Hitzeeinwirkung abgestorbene Buche an dem Tagebau zugewandten Waldrand (Foto: Pierre Ibisch, Juli 2019).

Zudem ist vor allem am dem Tagebau zugewandten Waldrand erheblicher Windwurf zu verzeichnen (Abb. 9). Es steht zu vermuten, dass mikroklimatische Einwirkungen hier besonders stark ausfallen und auch u.a. die Haltefunktion der Wurzeln beeinträchtigt wurde.



Abb. 9: Windwurf an dem Tagebau zugewandten Waldrand (Foto: Pierre Ibisch, Juli 2019).

Zielsetzung

Das Ziel dieser ersten Untersuchung zu Randeffekten ist die Analyse des vegetationsabhängigen Mikroklimas in und um den Hambacher Forst. Zunächst soll hierzu festgestellt werden, welchen Einfluss Offenland und vor allem die Tagebaue sowie der Wald auf die Oberflächentemperatur haben. Hierzu sollen zunächst satellitengestützte Auswertungsverfahren genutzt werden.

Methodik

Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von ca. 2.700 km² zwischen Aachen und Köln, in dessen Zentrum der Hambacher Forst liegt und sich über den Tagebau Hambach, Inden und Garzweiler erstreckt und somit ein Gebiet von ca. 20 km um den Tagebau Hambach abdeckt (Abb. 10).



Abb. 10: Untersuchungsgebiet (roter Rahmen): Im Zentrum der Tagebau Hambach mit dem Hambacher Forst (südlich des Tagebaus). Westlich davon der Tagebau Inden und nördlich der Tagebau Garzweiler. Am rechten Rand die westlichen Ausläufer von Köln. Nordwestlich des Tagebaus Hambach die rekultivierte Braumhalde Sophienhöhe.

Um die Oberflächentemperaturen in einen besseren Kontext setzen zu können, wurde zunächst die mittlere Tageshöchsttemperatur (Lufttemperatur in 2 m Höhe) näher betrachtet. Durch einen Mangel an aktiven Wetterstationen im Untersuchungsgebiet wurden hierfür die gerasterten Daten von E-OBS [2] genutzt. E-OBS erstellt aus Beobachtungsdaten von umliegenden Wetterstationen unter Nutzung robuster statistischer Interpolationsverfahren ein homogenes Temperatur-Gitter mit einer räumlichen Auflösung von 7 km [3]. Die durchschnittliche Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet wurde dann durch den Mittelwert bestimmt.

Die Erstellung der Oberflächentemperaturkarten erfolgte zum einen aus MODIS-Daten [4] mit einer groben räumlichen Auflösung von 1 km und zum anderen aus Landsat 8-Daten [5] mit 30 m Auflösung.

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) ist ein Radiospektrometer an Bord des *Aqua EOS-PM1* Satelliten der NASA, welches Bilder der Erdoberfläche über einen breiten Spektralbereich erstellt und damit unter anderem eine großflächige Untersuchung des Strahlenhaushalts erlaubt. Aus der gemessenen Strahlungsintensität im Infrarotbereich (Bänder 31 & 32 mit 10.8 – 12.3 μm) wird unter Berücksichtigung der Emissivität und des Wasserdampfanteils der Luftsäule mit Hilfe des „*Generalized Split Window Algorithm*“ (GSWA) die tägliche Oberflächentemperatur mit einer Auflösung von rund 1 km berechnet.

Landsat 8, gestartet im Februar 2013, ist auch ein Erdbeobachtungssatellit der NASA, der mit dem *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) ebenfalls die Bestimmung der Oberflächentemperatur erlaubt, jedoch mit der deutlich höheren räumlichen Auflösung von 30 m. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber Streulicht wird auf die Verwendung des GSWA unter Nutzung von Band 11 verzichtet [6]. Stattdessen wird aus der an der oberen Atmosphäre mit Band 10 gemessenen Strahlungstemperatur und den in [6] beschriebenen Umrechnungsfaktoren sowie der aus dem NDVI berechneten Emissivität gearbeitet. Die Bestimmung des NDVI (Normierter Differenzierter Vegetations-Index) erfolgt wie üblich aus dem Band 4 (*red*) und Band 5 (*near infrared*).

Für MODIS stehen tägliche Beobachtungen zur Mittagszeit von 2003 bis 2018 zur Verfügung, wohingegen Landsat 8-Beobachtungen nur zweiwöchentlich für den Zeitraum von 2013 bis 2018 um zehn Uhr morgens vorliegen. Dies resultiert in einer deutlich geringeren Anzahl von Beobachtungen im Untersuchungszeitraum für die räumlich hochaufgelösten Landsat 8-Daten. Zusätzlich variiert die Anzahl der Beobachtungen im Untersuchungsgebiet durch unterschiedliche Wolkenbedeckungen von Pixel zu Pixel; dies kann insbesondere für die Landsat 8-Daten dazu führen, dass vereinzelte Pixel nur durch sehr wenige bzw. keine Beobachtungen repräsentiert werden können.

Tab. 1 zeigt die durchschnittliche Anzahl der sommerlichen Beobachtungen im Untersuchungsgebiet für beide Datensätze. Aufgrund der hohen Anzahl von Beobachtungen liefern die MODIS-Daten die statistisch robusteren Ergebnisse - jedoch zum Preis einer deutlich geringeren räumlichen Auflösung im Vergleich zu den Ergebnissen, die anhand der Landsat 8-Daten generiert wurden.

Tab. 1: Durchschnittliche Anzahl der Beobachtungen in den Sommermonaten.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	alle
MODIS	37	24	30	32	23	29	31	31	20	26	30	24	35	28	23	38	460
Landsat 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2	2	1	1	2	11

Für beide Datensätze wurden die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen für die einzelnen Jahreszeiten oder Jahre für die hier dargestellten Untersuchungen aus dem Median jedes einzelnen Pixels/Gitterzelle der Tage im jeweiligen Untersuchungszeitraum berechnet. Um witterungsbedingte Einflüsse bei der Analyse zu vermeiden und zusätzlich durch geringe Beobachtungen entstandene Temperatursprünge im Untersuchungsgebiet auszugleichen, wurden zusätzlich normierte Oberflächentemperaturen erstellt. Hierfür wurden die Temperaturpixel der einzelnen Beobachtungstage durch ihr räumliches Mittel geteilt. Werte größer als 1 weisen Flächen aus, die in

diesem Zeitraum wärmer, und Werte kleiner 1, die kälter als das räumliche Mittel waren (wobei Werte gleich 1 genau dem Mittelwert entsprechen). Abschließend wurde die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Landnutzung (CORINE [7]) dargestellt.

Obwohl Oberflächentemperatur und Lufttemperatur nicht grundsätzlich das Gleiche beschreiben, stehen sie trotzdem in einem direkten Verhältnis zueinander. Die Oberflächentemperatur ist das direkte Resultat der Erwärmung der Landflächen durch die Sonneneinstrahlung. Hierbei spielen verschiedene Faktoren wie Albedo oder Emissivität eine Rolle, die auf kleinsten Flächen sehr unterschiedlich sein können. Demgegenüber steht die Lufttemperatur, die üblicherweise in 2 m Höhe gemessen und maßgeblich von der Wetterlage beeinflusst wird. Gerade im Sommer können sich die Landoberflächen deutlich stärker aufheizen als die sich darüber bewegende Luft. Allerdings gibt es natürlich einen kontinuierlichen Austausch von Wärme zwischen der Landoberfläche und der sich darüber befindenden Luft. Rund 87% der Variabilität der Lufttemperatur konnte mit einem einfachen linearen Modell durch die Oberflächentemperatur beschrieben werden. Im Untersuchungsgebiet ist an wärmeren Tagen (mit über 19°C) die Oberflächentemperatur höher als die Lufttemperatur und an kühleren Tagen verhält es sich genau umgekehrt (Abb. 11).

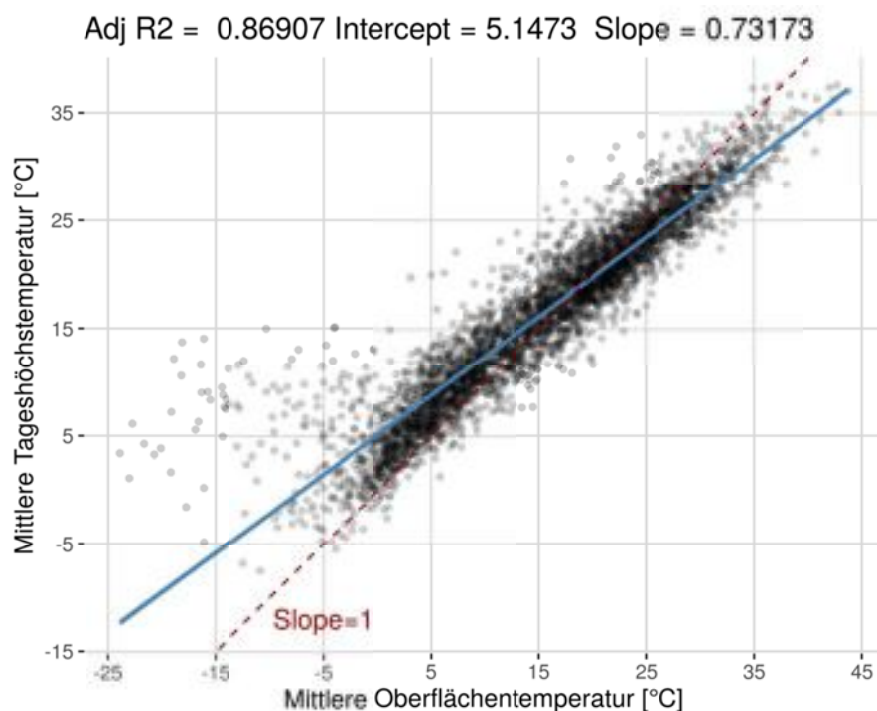


Abb. 11: Korrelation zwischen Lufttemperatur (Tageshöchsttemperatur in 2 m Höhe) und mittlerer Oberflächentemperatur (MODIS) im Untersuchungsgebiet über den gesamten Untersuchungszeitraum als lineare Regression.

Ergebnisse

Die Jahresdurchschnittswerte der E-OBS-Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet zeigen eine Tendenz der Erwärmung, was mit den regionalen Trends konform geht. Die drei höchsten Werte ($\geq 16^\circ\text{C}$) ergaben sich allesamt in den letzten 8 Jahren. Seit 2014 lagen die Temperaturen über dem langjährigen Durchschnitt ($15,3^\circ\text{C}$), und das Jahr 2018 war mit Abstand das wärmste (Abb. 12 oben).

Anhand der Tages-Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet von 2003 bis 2018 (Abb. 12 unten) ergeben sich interessante Hinweise auf die Veränderung v.a. klimatischer Bedingungen im Sommer. Es ist bemerkenswert, dass die 58 Sommertage mit über 25°C Durchschnittstemperatur im recht heißen Jahrhundertssommer des Jahres 2003 erst im Jahr 2018 übertroffen wurden. Dies geht v.a. auf die erhebliche Anzahl der Tage mit Durchschnittstemperaturen zwischen 25 bis 30°C zurück (die sich gegenüber dem langjährigen Mittel verdoppelte). Deutlich ist auch eine geringe Zahl von Frosttagen seit 2014.



Abb. 12: Jahresdurchschnittswerte der Tageshöchsttemperaturen (oben) und Anzahl der Frost-, Sommer- und heißen Tage von 2003 bis 2018 auf Grundlage der E-OBS-Durchschnittswerte im Untersuchungsgebiet (unten).

MODIS-Oberflächentemperaturen

Die räumliche Verteilung des langjährigen Mittels der MODIS-Oberflächentemperaturen (Abb. 14) zeigt einen deutlichen Bezug zu Landnutzung bzw. zur Bodenbedeckung. Dabei weisen die Jahreszeiten unterschiedliche Muster auf. Im Frühling (März/April/Mai), Sommer (Juni/Juli/August) und Herbst (September/Okttober/November) ist der Tagebau Hambach der Wärmepol des Untersuchungsraums. Die (größeren) Waldgebiete sind in diesen Jahreszeiten die kühlpsten Räume. Diese kühlende Wirkung ist insbesondere im Sommer ausgeprägt; in den Monaten Juni/Juli/August sind die kühlpsten Gebiete ca. 22°C kühlpfer als die wärmepsten. Die Temperaturdifferenz zwischen Sophienhöhe und Tagebau betragen im Schnitt 14,8°C und maximal 16,4°C im Jahr 2018. Im Winter (Dezember/Januar/Februar) beträgt der Temperaturabstand ca. 3°C. Im Sommer wird auch deutlich, dass das Gebiet des Hambacher Forsts im Durchschnitt ca. 11°C und im Sommer 2006 sogar bis knapp 15°C kühlpfer ist als die heißepsten Räume (im Tagebau Hambach). Die Kühlungswirkung von Wäldern hängt u.a. von der Größe und Bestockung sowie der Struktur von Waldgebieten ab. Gerade im Sommer ist auch die Aufforstung auf den Rekultivierungsflächen der Sophienhöhe deutlich kühlpfer als die Umgebung.

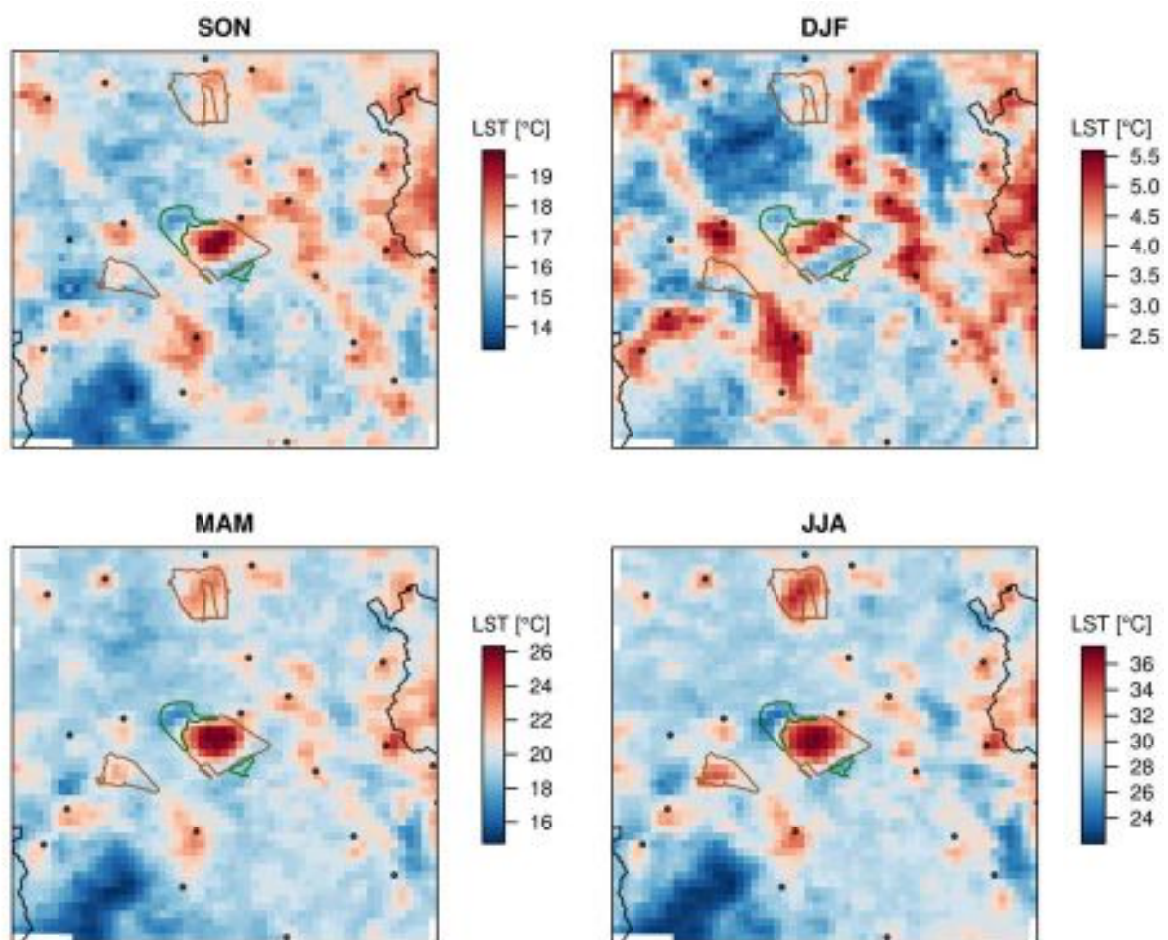


Abb. 14: Räumliche Verteilung des langjährigen Mittels der MODIS-Oberflächentemperaturen (tagsüber) im Untersuchungsgebiet um den Hambacher Forst.

Aufschlussreich sind auch die MODIS-Oberflächentemperaturen in den verschiedenen Sommern von 2003 bis 2018 (Abb. 15). Die Temperaturunterschiede zwischen den kältesten Waldgebieten und den wärmsten Oberflächen (in Siedlungsräumen und v.a. in den Tagebauen) sind in den heißesten Sommern am stärksten ausgeprägt. Die Thermokarten zeichnen das Wachstum der Tagebaue nach, was dazu führt, dass im Jahr 2018 deutlich größere Flächen relative Höchsttemperaturen erreichen als noch im Jahr 2003. Der kühlende Effekt des Hambacher Forsts reduziert sich stetig im Laufe der Jahre (mit fortschreitendem Waldverlust). Die relative Kühlung der aufgeforsteten Sophienhöhe verstärkt sich im Laufe der Jahre (mit dem fortschreitenden Baumwachstum). Im Hitzesommer 2018 wurden im Tagebau Hambach die Spitzenwerte der durchschnittlichen Sommertemperatur in der Region von ca. 45°C erreicht. Deutlich ist auch, dass in heißen Sommern die Unterschiede zwischen Agrarlandschaft und besiedelten Räumen geringer ausfallen und die relativ starke Kühlung nur noch in größeren Waldgebieten gegeben ist.

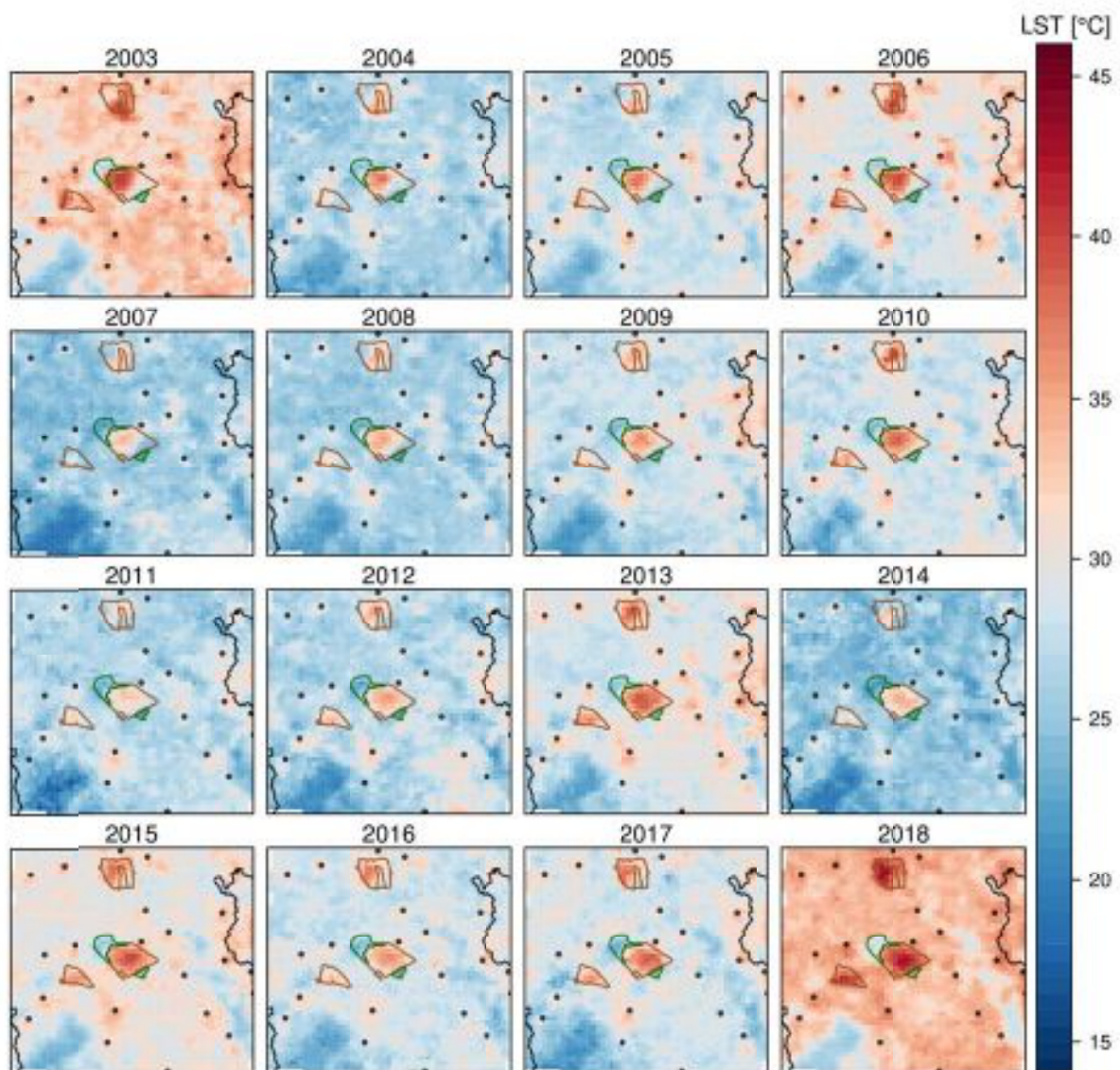


Abb. 15: Die räumliche Verteilung der MODIS-Oberflächentemperaturen (tagsüber) im Untersuchungsgebiet um den Hambacher Forst von 2003 bis 2018.

Abb. 16 zeigt die statistische Verteilung der normierten MODIS-Oberflächentemperaturwerte für drei ausgewählte Sommer über die verschiedenen Landnutzungsklassen der europäischen CORINE-Klassifikation L2. Hier ist die jeweilige Abweichung vom Mittel des Untersuchungsgebiets (1,0) zu erkennen. Die Tagebaue (*Mine*) liegen deutlich über dem Mittelwert und sind die wärmsten aller betrachteten Landnutzungstypen, wobei die Wälder deutlich kühler als das Mittel sind. Es gibt eine durchaus breite Streuung der Werte (die u.a. mit der Auflösung von ca. 1 km x 1 km zu erklären ist, da viele Zellen gemischte Landnutzung aufweisen).

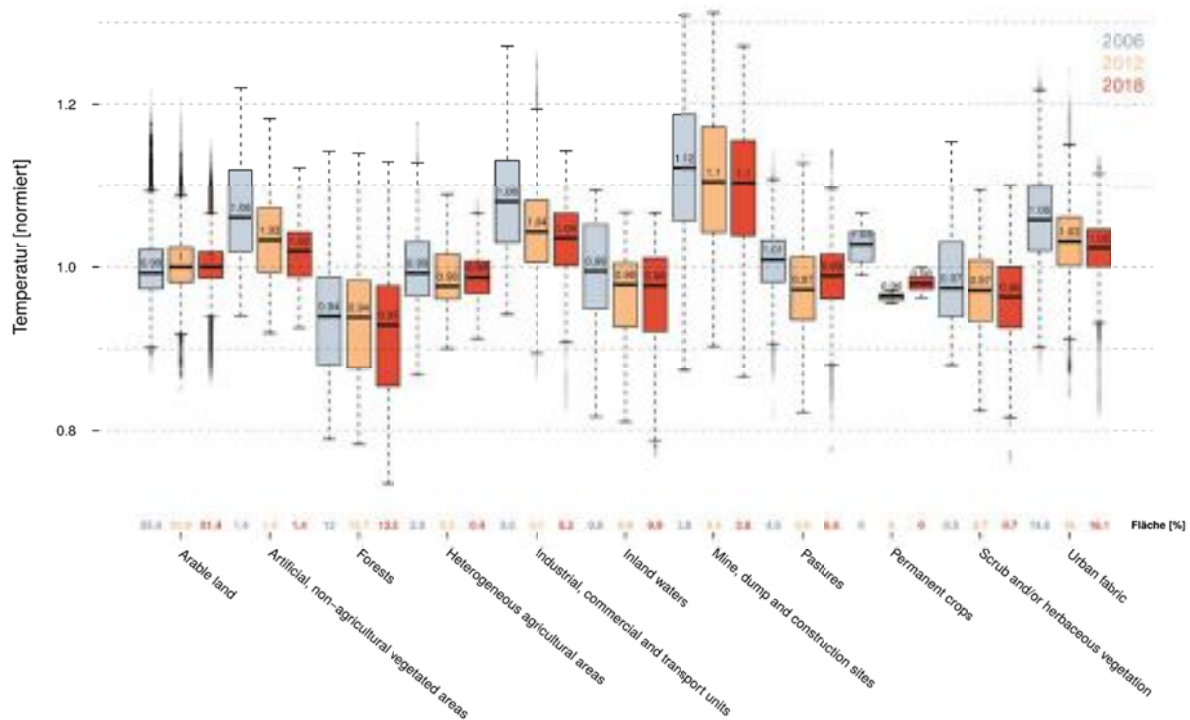


Abb. 16: Verteilung der normierten MODIS-Oberflächentemperaturwerte in den Sommern 2006, 2013 und 2018 über die verschiedenen CORINE-Landnutzungsklassen.

Abb. 17 zeigt dass die Differenz der Oberflächentemperatur des schrumpfenden Hambacher Forsts im Vergleich zum Tagebau Hambach im Laufe der Jahre abnimmt. Im gleichen Zeitraum wird mit dem Wachstum der Bäume die kühlende Wirkung auf der aufgeforsteten Sophienhöhe größer.

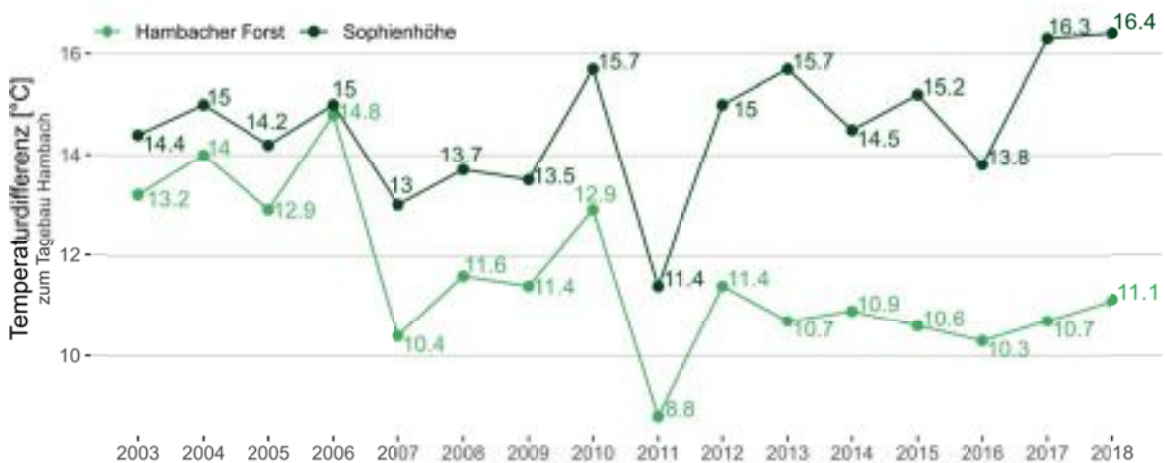


Abb. 17: Temperaturdifferenz der MODIS Oberflächentemperaturen (Sommer) zwischen Sophienhöhe bzw. Hambacher Forst und Tagebau Hambach.

Landsat 8-Oberflächentemperaturen

Die räumliche Verteilung des Mittels der Landsat 8-Oberflächentemperaturen (Abb. 18) bestätigt weitgehend die Muster der MODIS-basierten Analyse. Die Tagebaue und vor allem der Tagebau Hambach (im Zentrum) sind im Sommer die Hitzepole der Region. Es sind teilweise durchschnittliche Oberflächentemperaturen von über 45°C zu verzeichnen. Der Temperaturunterschied zwischen den heißesten und den kühlfsten Punkten im Untersuchungsraum beträgt im relativ heißen Sommer 2018 bis über 20°C. Es fällt auf, dass sich v.a. im heißen Sommer 2018 nicht nur die Tagebaue, sondern auch die Offenlandbereiche wie landwirtschaftlich genutzte Flächen und Siedlungsräume relativ stark erwärmen, während Wald- und Gehölzflächen vergleichsweise kühler bleiben.

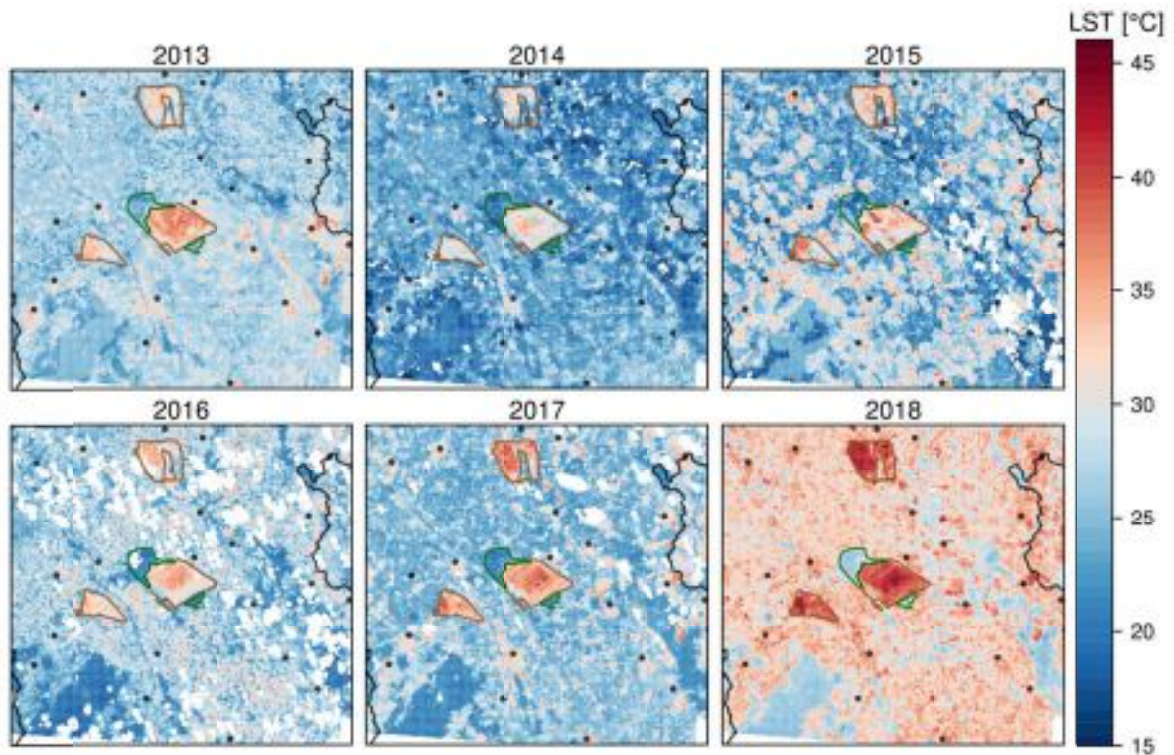


Abb. 18: Räumliche Verteilung der Landsat 8 Oberflächentemperaturen (tagsüber) im Untersuchungsgebiet um den Hambacher Forst (im Zentrum der Karten) von 2013 bis 2018.

Abb. 19 stellt eine Ausschnittvergrößerung um den Tagebau Hambach dar. Deutlich zu erkennen sind die Sophienhöhe (oben links) und der Rest des Hambacher Forsts (unten rechts). Gerade im heißen Sommer 2018 tritt der mikroklimatische Randeffekt deutlich hervor: Das kühlere Zentrum des Waldes ist von einem wärmeren Gürtel umgeben – hier handelt es sich um Wald, der sich aufgrund der strukturellen Gegebenheiten der unmittelbaren Umgebung stärker erwärmt. Es wird deutlich, dass größere Wald- und Gehölzgebiete kühler sind – v.a. in ihrer Kernzone.

Am Südrand des Tagebaus ist zudem erkennbar, dass ab 2016 die Temperaturpufferung zum sehr warmen Grubenrand hin weggefallen ist. Die den Restwald durchschneidenden Straßen bzw. Trassen sind deutlich als Hitzetrassen erkennbar, welche die negativen Randeffekte im Wald vergrößern. Auch die Kiesabbaugebiete südlich/südöstlich des Hambacher Forst tragen deutlich zur Erwärmung des Randbereichs um den Hambacher Forst bei. Es ist bemerkenswert, dass das durch landwirtschaftliche Nutzung geprägte Offenland sich im durch stärkere Hitze geprägten Sommer 2018 thermisch den Siedlungs- und äußeren Tagebaubereichen annähert ($>30^{\circ}\text{C}$).

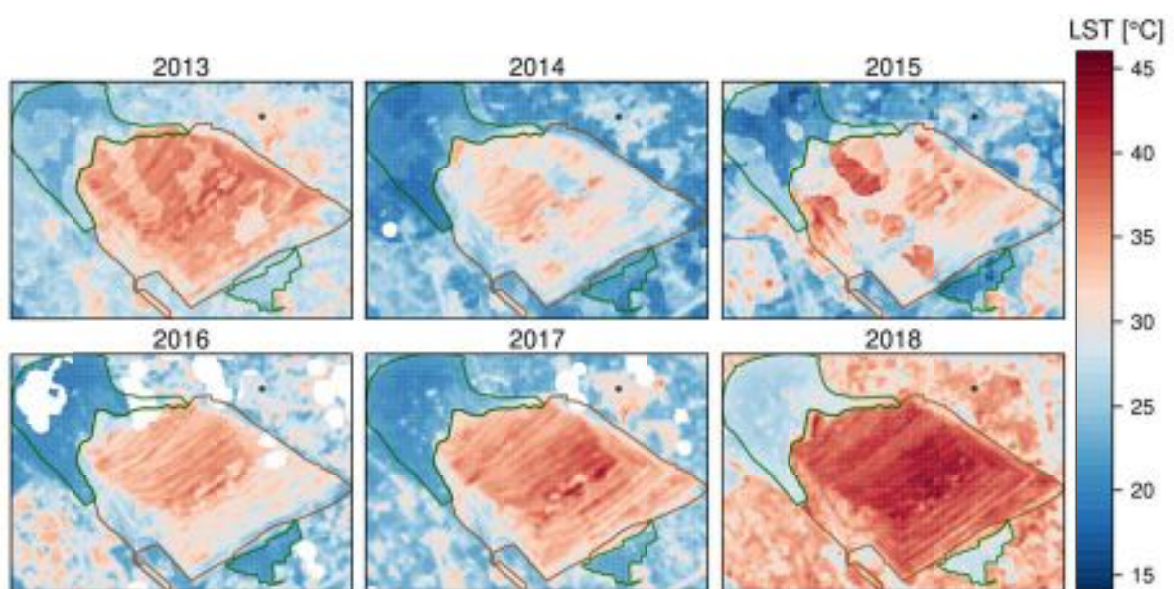


Abb. 19: Räumliche Verteilung der Landsat 8 Oberflächentemperaturen (tagsüber) um den Tagebau Hambach von 2013 bis 2018 (Sommer).

Der Sommer 2013 war mit durchschnittlichen Tageshöchsttemperaturen von rund 24°C kühler als der Sommer 2018 mit rund 27°C. Die folgende Grafik (Abb. 20) zeigt die Temperaturverteilung pro Landnutzungs-kategorie für die Sommermonate der Jahre 2013 und 2018. Im Sommer 2018 erwärmen sich die flächenmäßig dominierenden Agrarlandschaften deutlich stärker und gleichen sich den urbanen Gebieten und den Tagebauen tendenziell an. Die Flächen mit Wald und Gehölz sind dagegen relativ kühler und erreichen im Mittel nur noch 83% der durchschnittlichen Gebietstemperatur, rund 22°C. In Bezug auf die Durchschnittstemperatur im gesamten Untersuchungsgebiet verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen den Tagebauen und landwirtschaftlichen Flächen von 22% in 2013 auf 19% in 2018, wohingegen sich die Differenz zwischen Waldgebieten und landwirtschaftlichen Flächen von 9% auf 17% erhöht.

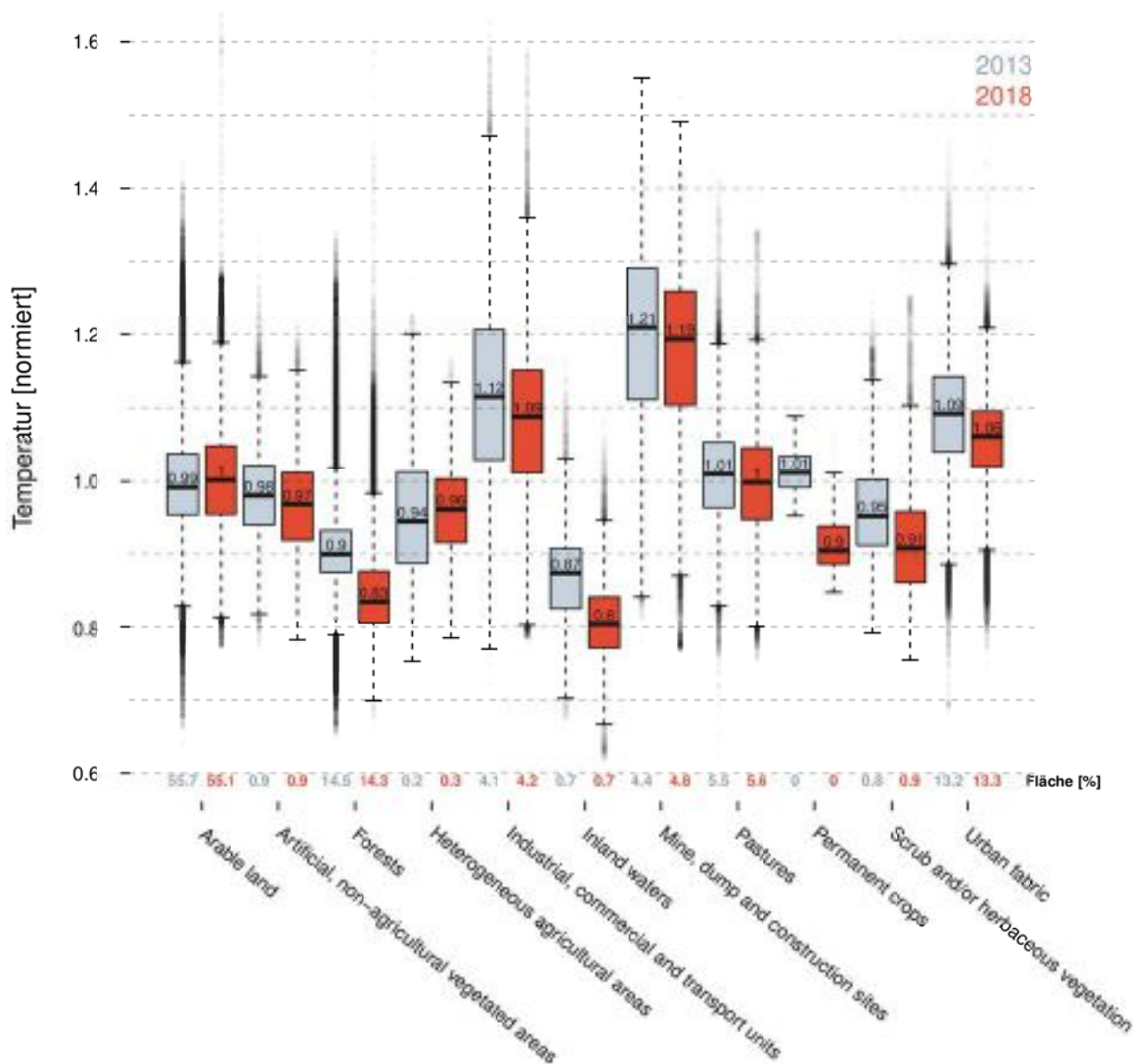


Abb. 20: Verteilung der normierten Landsat 8 Oberflächentemperaturwerte in den Sommern 2013 und 2018 über die verschiedenen CORINE-Landnutzungs-klassen.

Diskussion

Der Hambacher Forst steht auch in diesem Kontext stellvertretend für eine ‚Mikro- (und Meso-)Klimakrise‘ der Waldrelikte in unserer Landschaft, welche mit den Effekten des globalen Klimawandels überaus schädlich zusammenwirkt. Die Mikroklimakrise des Hambacher Forsts wird nicht – wie in vielen anderen Fällen – von landwirtschaftlicher oder forstlicher Landnutzung bzw. Urbanisierung getrieben, sondern vom Tagebau.

Die thermischen Landschaftswirkungen der Tagebaue um den Hambacher Forst sind deutlich erkennbar. Die flächenmäßige Erweiterung der Tagebaue hat bereits zur Erwärmung der Gesamtlandschaft beigetragen. Es ist überaus plausibel, dass von den heißen Tagebauen thermische Effekte auf die unmittelbar angrenzende Umgebung wirken. In besonderem Maße betrifft dies Waldökosysteme, die grundsätzlich eine erheblich niedrigere Landschaftstemperatur bewirken, zumindest, wenn sie eine entsprechende Größe und ökologische Ausstattung haben. Im Falle der Fläche zwischen dem Tagebau Hambach und dem Hambacher Forst wird in Sommermonaten ein starker Temperaturgradient beobachtet. Es handelt sich hierbei um eine Differenz von ca. 11°C (MODIS) bzw. bis zu 19°C (Landsat 8) im Sommer 2018. Es ist davon auszugehen, dass der Tagebau Hambach eine stark erhitzende und damit einhergehende austrocknende Wirkung auf den relativ kleinen Restwald ausübt.

Es besteht das Risiko, dass die derzeitige Hitze- und Trockenperiode in Kombination mit den vom Tagebau ausgehenden Randeffekten den Hambacher Forst nachhaltig schädigen wird. Mehrere Baumarten sind ohnehin besonders anfällig. Die nicht standortgerechten Nadelbäume sind stark gefährdet oder bereits abgängig bzw. abgestorben. Die Fichten werden in kürzester Zeit lokal verschwunden sein, was derzeit in weiten Teilen Deutschlands zu beobachten ist (bedingt durch Trockenstress und Borkenkäfer). Insbesondere steht aber auch zu befürchten, dass die heimische Buche sich im Hambacher Forst nicht halten kann. Dies bedeutet dennoch nicht ein Absterben des Waldökosystems. Andere Baumarten wie die Hainbuchen oder Linden dürften die weitere Waldentwicklung entscheidend mitprägen. Es ist zu hoffen, dass auch die Eichen bei fortschreitender Erwärmung noch eine geraume Weile überleben können. Es kommt nun im Wesentlichen auch auf das Management einer thermischen Pufferzone an, wie sich Sensitivität bzw. Vulnerabilität des Hambacher Forsts weiterentwickeln. Wenn sich Erwärmung und Trockenheit zu stark ausprägen, steht die zukünftige Waldkontinuität in der kleinen Waldinsel auf dem Spiel. Um die Funktionstüchtigkeit des Waldes und damit auch die von ihm ausgehenden regulierenden Leistungen, wie z.B. die mikroklimatische Regulation, Wasserspeicherung, Grundwasserneubildung, Kohlenstoffspeicherung und Sauerstoffproduktion sowie auch die zahlreichen Habitats aller Organismengruppen aufrechtzuerhalten, ist es wichtig, dass der vom Tagebau Hambach ausgehenden ökologischen (Hitze- und Trockenheits-)Stress gemindert wird.

Die Ergebnisse zu den Oberflächentemperaturen um den Hambacher Forst bestätigen aktuell diskutierte Befunde zur Bedeutung von Wäldern für die Kühlung der Landschaft (vgl. u.a. [8]). Tschechische Autoren haben unter Nutzung von Landsat 8-Daten herausgearbeitet, wie sich die Temperatur in Gebieten des Sumava-Nationalparks erhöht hat, wo Wälder zusammengebrochen sind [9]. Sie weisen auch darauf hin, dass die höheren Oberflächentemperaturen dazu führen, dass fühlbare Wärme¹ statt Evapotranspiration² generiert wird, welche Wälder kühlt. Die fühlbare Wärme treibe zudem turbulente Luftmassenbewegungen in die Atmosphäre. Die aufsteigende warme Luft

¹ Hinzu- oder abgeführte thermische Energie, die unmittelbar zu Temperaturveränderungen führt.

² Summe der Verdunstung von Böden, Wasserflächen und Vegetation.

transportiere Wasserdampf in die Atmosphäre (Advektion) und trockne deshalb die Landschaft aus. Die Wassermenge, die durch Advektion in die Atmosphäre transportiert werde, könne substanziell größer sein als die Menge, die sonst von Bäumen verdunstet wird. Es handelt sich regelrecht um „Luft-Flüsse“, die die Landschaft unsichtbar entwässern. Der Verlust von Wasser ist vor allem in verlängerten Trockenperioden überaus kritisch, da er sich im Sinne einer positiven Rückkopplung negativ auf den verbleibenden Baumbestand auswirkt: Der Verlust von verfügbarem Wasser führt zur nachhaltigen Abnahme der Produktivität und Vitalität von Gehölzen [10].

Die Analyse der Oberflächentemperatur der Sophienhöhe zeigt, dass durch Aufforstung bzw. Wiederbewaldung nach einigen Jahren bzw. eher Jahrzehnten grundsätzlich eine Kühlung der Landoberfläche erzielt werden kann. Rekultivierung und Bepflanzung von Rohböden in Bergbaufolgelandschaften ersetzen jedoch keinesfalls ein altes Waldökosystem mit seinen besonderen Arten, Strukturen und Prozessen. Dies gilt in besonderem Maße für den Boden und seine Organismen. Rekultivierungsflächen würden Jahrtausende benötigen, um die vernichteten alten Wälder annähernd zu ersetzen. Die Aufforstungsflächen auf der Sophienhöhe sind eher als Naherholungsgebiet und Landschaftspark (auch mit nichtheimischen Baumarten) gestaltet worden und weisen ökologisch einen vergleichsweise geringen Wert auf. Die Fläche zeigt, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem Hambacher Tagebau und der bepflanzten Sophienhöhe im Sommer 2018 ca. 16°C (MODIS) bzw. bis zu ca. 22°C (Landsat 8) betrug. Damit ist plausibel, dass - wenn also Flächen um den Hambacher Forst wiederbewaldet würden - in absehbarer Zeit die Landschaftstemperatur und die schädlichen thermischen Randeffekte reduziert werden könnten.

Empfehlungen

1. Zur Erhaltung des Hambacher Forst ist die Einrichtung einer thermischen Pufferzone dringend geraten. Diese sollte ein Band von idealerweise 500 m um den gesamten Wald umfassen, in der die Oberflächentemperatur durch Wiederbewaldung um mehrere Grad Celsius abgesenkt wird.
2. Das weitere Abbaggern des Tagebaus ist zum Hambacher Forst hin unbedingt sofort einzustellen. Auf dem verbliebenen entwaldeten Randstreifen ist schleunigst eine Wiederbewaldung einzuleiten. Dabei ist durch schnellwüchsige einheimische Baumarten auf eine möglichst rasche Einrichtung eines schützenden Waldrands hinzuwirken.
3. Ebenso sind die Kiestagebaue am Hambacher Forst sofort einzustellen; die Agrarflächen südlich des Hambacher Forsts bzw. des Tagebaus sind möglichst rasch mit heimischen Bäumen aufzuforsten. Von der Verwendung nichtheimischer Arten ist abzusehen.
4. Zur Sicherstellung einer effektiven Rekultivierung sollte in der Vegetationsperiode bei gleichzeitig anhaltender Hitze und Trockenheit, zumindest vorübergehend, eine (ökologisch verträgliche) Bewässerung der Wiederbewaldungsflächen vorgesehen werden.
5. Der Hambacher Forst ist durch das Anlegen von Hecken und Gehölzkorridoren mit den anderen verbliebenen Waldflächen der Region zu verbinden. Diese Korridore sollten mindestens 100 m breit sein.
6. Zu den Sofortmaßnahmen für die Reduktion der thermischen Randeffekte gehört auch die schnelle Kühlung der Wegeschneisen und Straßen innerhalb des Waldes. Die L276 ist rückzubauen und zu rekultivieren. Die aufgeschütteten Wege im Hambacher Forst sind auf die Hälfte der Wegebreite zu verschmälern, damit eine natürliche Sukzession an den Wegesrändern einsetzen kann.
7. Die Trasse der ehemaligen Autobahn ist schnellstmöglich zu rekultivieren und wiederzubewalden. Humushaltiger Oberboden ist vor der Bepflanzung aufzubringen und eine (ökologisch verträgliche) Bewässerung ist zumindest temporär vorzusehen.
8. Etwaige Drainagesysteme, Rohre oder Kanäle, die den Hambacher Forst entwässern, sind schnellstmöglich zu verschließen.
9. Das Alt- und Totholz absterbender Bäume (aller Arten) muss unbedingt im Wald verbleiben, um nicht nur Habitatfunktionen zu erfüllen, sondern auch um mikroklimatische Kühlung und Wasserrückhaltung zu befördern.
10. Die mikroklimatische Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen ist mit Hilfe von Datenloggern nachzuweisen und zu dokumentieren. Ein entsprechendes mikroklimatisches Monitoring sollte umgehend begonnen werden.

Quellen

- [1] Mausolf, K., et al., "Legacy effects of land-use modulate tree growth responses to climate extremes", *Oecologia*, 0123456789 (2018), 1–13.
- [2] E-OBS Version 19.0e TX dataset from the EU-FP6 project UERRA (<http://www.uerra.eu>) and the Copernicus Climate Change Service, and the data providers in the ECA&D project (<https://www.ecad.eu>)
- [3] Cornes, Richard C., et al. "An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123.17 (2018): 9391-9409.
- [4] Wan, Z., Hook, S., Hulley, G., 2015, MYD11A1 MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS LP DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MYD11A1.006
- [5] NASA USGS. Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS(Thermal Infrared Sensor), 2019. Data available from the U.S. Geological Survey.
- [6] US Department of the Interior, "Landsat8 Data Users Handbook," Mar. 2016. [Online]. Available: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- [7] EEA (European Environment Agency), 2019, CORINE Land Cover (CLC) 2018, Version 20, <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>
- [8] Ellison, D., et al., "Trees, forests and water: Cool insights for a hot world", *Global Environmental Change* 43 (2017), 51–61.
- [9] Hesslerová, P., H. Huryňa, J. Pokorný, J. Procházka, "The effect of forest disturbance on landscape temperature", *Ecological Engineering* 120 (2018): 345-354.
- [10] Belyazid, S. & Z. Giuliana, "Water limitation can negate the effect of higher temperatures on forest carbon sequestration", *European Journal of Forest Research* 138 (2019):287–297.