



# Thermische Wirkungen von Waldökosystemen und Autobahnen unter den Bedingungen des Klimawandels

Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Effekte des geplanten Baus des Autobahnabschnittes der A49 auf den Dannenröder Forst, Hessen





# Thermische Wirkungen von Waldökosystemen und Autobahnen unter den Bedingungen des Klimawandels

Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Effekte des geplanten Baus des Autobahnabschnittes der A49 auf den Dannenröder Forst, Hessen

Charlotte Gohr  
Jeanette S. Blumröder  
Pierre L. Ibisch

(Eberswalde, 5.11.2020)



Hochschule  
für nachhaltige Entwicklung  
Eberswalde

Alfred-Möller-Str. 1 · 16225 Eberswalde  
e-Mail: pibisch@hnee.de

## ➔ Kein Geld von Industrie und Staat

Greenpeace ist international, überparteilich und völlig unabhängig von Politik und Wirtschaft.

Mit gewaltfreien Aktionen kämpft Greenpeace für den Schutz der Lebensgrundlagen.

Mehr als 600.000 Fördermitglieder in Deutschland spenden an Greenpeace und gewährleisten damit unsere tägliche Arbeit zum Schutz der Umwelt, der Völkerverständigung und des Friedens.

# Inhalt

Inhalt.....	2
Zusammenfassung .....	3
1. Einleitung .....	4
Negative Wirkungen von Straßen, Waldkrise und Extremwitterungen .....	4
Ziel dieser Studie.....	8
2. Methodik .....	9
Landnutzung.....	10
Oberflächentemperaturen und Vitalität der Vegetation .....	12
Wirkung von Autobahnen auf Landschafts-Oberflächentemperaturen .....	13
3. Ergebnisse.....	14
Oberflächentemperaturen und Vitalität der Vegetation der letzten Jahre .....	16
Oberflächentemperaturen in Bezug zur Größe von Waldflächen .....	20
Oberflächentemperaturen und Autobahnen .....	21
4. Diskussion .....	23
5. Schlussfolgerung und Empfehlung.....	25
6. Literatur.....	26
7. Anhang .....	28

## Zusammenfassung

Bei der Prüfung von negativen Umweltwirkungen, die sich aus dem geplanten Autobahnbau in Oberhessen (A49) ergeben würden, wurden bislang thermische beziehungsweise mikroklimatische Effekte und ihre Relevanz im sich beschleunigt entfaltenden Klimawandel vernachlässigt. Autobahnen bewirken nicht nur eine physische, sondern auch eine thermische Zerschneidung. Sie erhöhen die auftretenden Maximaltemperaturen in der Landschaft sowie die Wasserverdunstung und bedingen zusätzlichen Hitze- und Trockenstress bei Bäumen. Die Verdunstung und die austrocknende Wirkung von Luft wachsen nichtlinear mit steigender Temperatur an.

Mithilfe von Satellitenbilddaten kann die kühlende Wirkung von Waldflächen in der betroffenen Region einschließlich des Dannenröder Forsts quantifiziert werden. Die Temperaturunterschiede sind vor allem an den heißesten Tagen des Jahres besonders ausgeprägt: Der Temperaturunterschied der durchschnittlichen Oberflächentemperaturen zwischen den kühlest und bewaldeten Bereichen sowie den wärmsten urbanen Gebieten beträgt an diesen heißesten Tagen über 10 °C.

Eine dichte und geschlossene bzw. vitale Vegetation vor allem von größeren Waldflächen wirkt sich deutlich kühlend auf die Oberflächentemperaturen aus. Vitalität und Kühlung von Vegetation beeinflussen sich wechselseitig. In Zeiträumen, in denen die Landschaft durch eine Vegetation mit geringer Vitalität geprägt ist (z. B. 2003 und 2016; gemessen durch den satellitenbasierten NDVI), fallen die Oberflächentemperaturen höher aus als in Jahren mit vergleichsweise hohen Vitalitätswerten der Vegetation (2007-2009).

Hochaufgelöste satellitenbildbasierte Analysen (Landsat) zeigen, wie sehr sich Autobahnen im Untersuchungsgebiet an heißen Tagen aufheizen und einen entsprechenden thermischen Randeffekt auf den Wald ausüben. Es ist davon auszugehen, dass vor allem in Extremwetterperioden entlang der Autobahn eine erhöhte Baumsterblichkeit auftreten wird. Dadurch würden sich die negativen Folgen der Trasse für den Wald selbst verstärken und zeitlich weiterentwickeln. Es muss mit einer fortschreitenden Schwächung und Erwärmung des Dannenröder Forsts gerechnet werden.

Neben den klimawandelbedingten Steigerungen von Extremtemperaturen kommt es durch die Rodung und Versiegelung von Waldbereichen, der Zerschneidung und einer damit zusammenhängenden Zunahme von Waldrandsituationen u.U. zu physiologisch kritischem Hitzestress. Die höheren Landschaftstemperaturen verstärken zudem die Verdunstung und in niederschlagsarmen Zeiten das Wasserdefizit. Damit muss ein deutlich negativer Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt postuliert werden.

Die aus dieser Studie resultierenden Erkenntnisse sollten generell bei aktuellen und zukünftigen Infrastrukturplanungsprozessen berücksichtigt werden. In einer Zeit, in der vom Staat erhebliche finanzielle Mittel zur Bewältigung von bereits entstandenen Waldschäden und zur Wiederherstellung von Waldflächen bereitgestellt werden müssen und gleichzeitig versucht wird, durch Klimawandelanpassungsstrategien die Landnutzung zukunftsfähig zu machen und den Landschaftswasserhaushalt zu stabilisieren, erscheint es unverantwortlich, ökologisch wertvolle Waldrelikte zu zerschneiden und diese dadurch neuen Risiken auszusetzen. Angesichts der bislang ignorierten Gefahr, dass sich Wirkungen von Straßen auf Ökosysteme und den Landschaftswasserhaushalt mit dem Klimawandel verstärken können, wird empfohlen die Bundesverkehrswegeplanung diesbezüglich neu zu bewerten.

# 1. Einleitung

Der Dannenröder Forst<sup>1</sup> ist ein etwa 1000 ha großes Waldgebiet zwischen Marburg und Alsfeld in Hessen. Der Mischwald besteht u. a. aus bis zu 250-300 Jahre alten Buchen und Eichen. Die Waldfläche liegt innerhalb eines Gebiets, in dem Flurbereinigungsmaßnahmen auf einer Gesamtfläche von 2.533 ha für den Ausbau der Autobahn A49 auf 43 km Länge vorgesehen sind. Die Umsetzung der Maßnahme, welche bereits vor fast einem halben Jahrhundert geplant wurde, würde zahlreiche negative ökologische Auswirkungen hervorrufen, von denen einige bereits in entsprechenden Studien analysiert und in der Öffentlichkeit diskutiert wurden. Die Einhaltung von entsprechenden Wasserrechtsverordnungen einschließlich des Trinkwasserschutzes sowie Verstöße gegen das Verschlechterungsverbot im Rahmen der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie stehen dabei im Fokus.

## Negative Wirkungen von Straßen, Waldkrise und Extremwitterungen

Die *Straßenökologie* ist inzwischen zu einer relevanten Teildisziplin der angewandten Ökologie geworden (Selva et al., 2015, 2011; van der Ree et al., 2015). Globale Analysen zeigen, dass straßenlose Räume eine herausragende ökologische Bedeutung haben und dringlich eines verbesserten Schutzes bedürfen (Ibisch et al., 2016). Viele Gründe sprechen dafür, vor allem in dicht besiedelten und stark von Infrastruktur erschlossenen Gebieten wie Mitteleuropa, die verbleibenden straßenlosen oder straßenarmen Regionen besonders zu schützen (Selva et al., 2015, 2011). Deutschland gehört zu den Gebieten, die praktisch sämtlich von Straßen und ihren Randeffekten beeinträchtigt sind (vgl. interaktive Karte auf [www.roadless.online](http://www.roadless.online)) - negative Wirkungen strahlen teilweise einen Kilometer und darüber hinaus in die Umgebung aus (vgl. Literaturübersicht im Anhang von Ibisch et al. 2016). Es handelt sich um gut bekannte Schädwirkungen wie lokale Versiegelung und Habitatverlust oder auch die Zerschneidung von Populationen mit Konsequenzen für die genetische Vielfalt und Überlebensfähigkeit von Arten (vgl. z. B. Dolgener et al., 2014).

Es ist bislang nicht deutlich geworden, dass die Umweltverträglichkeitsprüfung zum geplanten Autobahnbau den neuesten Stand der Straßenökologie beachtet. Es besteht das Risiko, dass etliche relevante Wirkungen, die vor Jahren weniger gut abgeschätzt werden konnten, nunmehr aber deutlicher zutage treten, vernachlässigt werden. Die Rodungsschneise und die Versiegelung durch den Autobahnbau innerhalb des Wasserschutzgebietes des Dannenröder Forsts bzw. auch in den anderen betroffenen Waldgebieten führen nicht nur zum Verlust von Lebensraum für Waldarten und lokalen Wirkungen auf Böden und Hydrologie, sondern unzweifelhaft auch zu weiteren Konsequenzen wie etwa die Fragmentierung von Populationen mit erst mittel- bis langfristig eintretenden irreversiblen Schädigungen. Völlig unbeachtet blieb bisher das Zusammenwirken von Straßenrandeffekten und klimawandelbedingten Extremwitterungen. Erste Befunde suggerieren, dass angesichts der aktuellen Klimakrise mit akuten Wirkungen

---

<sup>1</sup> Historische Namensbezeichnung, die in der vorliegenden Studie verwendet wurde, ohne damit auf aktuelle Konnotationen der Begriffe ‚Wald‘ und ‚Forst‘ abzuheben.

auf Wasserhaushalt und Waldvegetation eine völlig neue Bewertung von thermisch auf die Landschaft wirkenden Infrastrukturen und Eingriffen erfolgen muss.

Innerhalb der letzten drei Jahre hat sich der Zustand von Wäldern in weiten Teilen Deutschlands erheblich verschlechtert. Die Sommer mit einer hohen Zahl von außergewöhnlich heißen Tagen sowie die insgesamt überdurchschnittlich trockenen Jahre haben ein ausgeprägtes Wasserdefizit im Boden hervorgerufen und v. a. auf Standorten mit flachgründigen Böden sowie auf Waldflächen mit Bodenverschädigungen (wie z. B. Bodenverdichtung durch Befahren) und reduzierter Wasserspeicherkapazität die Vitalität von Bäumen geschwächt. Teilweise kam und kommt es - insbesondere in Monokulturen, aber auch vermehrt an Waldrändern wie z. B. entlang von Autobahnen (Abbildungen 1-4) - zum flächigen Absterben von Bäumen und Baumbeständen. Es handelt sich um eine akute Waldkrise und vielerorts vor allem um eine ‚Waldrandkrise‘.



**Abbildung 1: Geschädigte Buchen an einer waldzerschneidenden Autobahn (A11 in Brandenburg, Mai 2020; Foto: P. Ibisch).**





**Abbildung 2:** Die von Autobahnen ausgehende mikroklimatischen Randeffekte bedingen zunächst ein Absterben von Bäumen ‚in der ersten Reihe‘. Nach ihrem Ausfall wirken die Randeffekte immer tiefer in den Wald hinein (A11 in Brandenburg, Mai 2020; Foto: P. Ibisch).



**Abbildung 3:** Entlang von Autobahnen in ganz Deutschland ist vermehrt das Absterben von einzelnen Bäumen diverser Arten sowie Baumgruppen bis hin zum flächigen Absterben ganzer Baumbestände zu beobachten (A7 bei Alfershausen, August 2020; Foto: P. Ibisch).



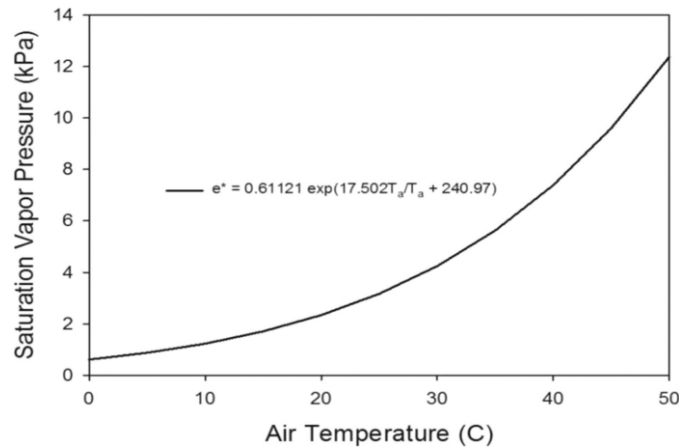
**Abbildung 4: An den der Autobahn zugewandten Waldrändern sterben Waldkiefern ab. Die Bäume direkt an der Autobahn sind zuerst und am stärksten betroffen.** (A4 bei Stadtröda, August 2020; Foto: P. Ibisch).

Auch die hier zu untersuchende oberhessische Region zwischen dem Vogelsberg und dem Kellerwald war in der jüngsten Vergangenheit zumindest von schwerer oder gar extremer Dürre betroffen. Vielerorts sind die Böden nach wie vor tiefgründig ausgetrocknet, und teilweise ist selbst im Spätherbst 2020 noch eine vergleichsweise geringe Wasserverfügbarkeit auch im Oberboden gegeben (vgl. Dürremonitor UFZ, 2020). Die Phänomene extrem reduzierter Grundwasserneubildung und der starken Austrocknung von Böden werden sowohl von überdurchschnittlich geringen Niederschlägen als auch von deutlich erhöhter Verdunstung getrieben. Die resultierende, bereits langanhaltende Trockenheit stellt ein bedeutsames Risiko für die Ökosysteme der Region und die von ihnen bereitgestellten Leistungen dar. Besonders die Wälder sind betroffen.

Eine erhöhte Mortalität von Bäumen tritt in besonderem Maße an Waldrändern aller Art auf - hierzu gehören Flächen, die an sich stark erwärmende landwirtschaftliche Flächen, Tagebaue und auch Straßenränder angrenzen. Hierbei dürften direkte thermische Effekte eine Rolle spielen, aber auch die mit ihnen in Verbindung stehende erhöhte Verdunstung und Austrocknung. Hatfield & Prueger (2015) weisen auf diesen Zusammenhang hin: "Ein oft übersehener Aspekt von hohen Temperaturextremen ist die Auswirkung von Extremereignissen auf den atmosphärischen Wasserdampfbedarf. (...) Die Auswirkungen von Temperaturextremen auf die Pflanze könnten sich aus der kombinierten Wirkung der warmen Lufttemperaturen und des steigenden atmosphärischen Bedarfs ergeben" (aus dem Englischen, Abbildung 5). Das Problem eines sich verstärkenden Dampfdruckdefizits könnte



zu einem bedeutenden Treiber von Vegetationsdynamik werden; das Dampfdruckdefizit - welches die austrocknende Wirkung von Luft beschreibt – wurde bereits mit erhöhter Mortalität von großen Bäumen in Waldökosystemen in Verbindung gebracht (Breshears et al., 2013; Williams et al., 2013). Erstaunlicherweise galt dem Phänomen lange Zeit eine geringere Aufmerksamkeit als den direkten Temperaturwirkungen oder dem Rückgang von Niederschlägen (Grossiord et al., 2020).



**Abbildung 5: Der Sättigungsdampfdruck relativ zur Lufttemperatur zeigt den exponentiellen Anstieg des Sättigungsdampfdrucks mit der Temperatur** (aus Hatfield & Prueger 2015).

Hinzu kommt das Problem, dass auf Flächen, die sich stark erwärmen, Luft aufsteigt und auf diese Weise Feuchtigkeit aus der Vegetation entzogen werden kann. Die Hitze-Inseleffekte von Siedlungen mit ausgedehnten überbauten Flächen sind gut bekannt. Umgekehrt ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Bedeutung von kühlenden Landschaftselementen mit fortschreitendem Klimawandel und extremeren Witterungen zunimmt. Die Reduktion von Temperaturspitzen, die Kühlungsleistung von Wäldern und damit auch die Reduktion von Wasserverlust ist nicht nur für die Stabilität der Ökosysteme selbst bedeutsam, sondern auch auf landschaftlicher Ebene, etwa für den Landschaftswasserhaushalt, überaus relevant. Die Kühlungsfunktion ist v. a. dann stark ausgeprägt wenn Wälder dicht und biomassereich sind; der relative Kühlungseffekt ist bei hohen Temperaturen stärker ausgeprägt (De Frenne et al., 2019; Norris et al., 2012; Zellweger et al., 2019). Das Quantifizieren von Oberflächentemperaturen hat sich als geeigneter Indikator für die Bewertung der Funktionstüchtigkeit von Wäldern und den Einfluss von Landnutzung sowie Randeffekten erwiesen (vgl. z. B. Blumröder et al., 2020, 2019a, 2019b; Ibsch et al., 2019).

## Ziel dieser Studie

Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Ausführungen besteht die Befürchtung, dass der Autobahnbau die landschaftsthermischen Gegebenheiten ungünstig beeinflusst und dass die Waldschädigung deutlich komplexer und anhaltender ausfällt, als es bislang diskutiert wird. Entsprechend sollen die mikroklimatischen Auswirkungen der Verkleinerung und Zerschneidung des Dannenröder Forsts im Rahmen des Ausbaus der Autobahn A49 genauer untersucht werden. In dieser vorliegenden Studie sollen zunächst einmal das Zusammenspiel von Landschaftstemperatur und Vitalität der Vegetation quantifiziert und die Wirkung von Landnutzung und Fragmentierung beurteilt werden. Anhand einer

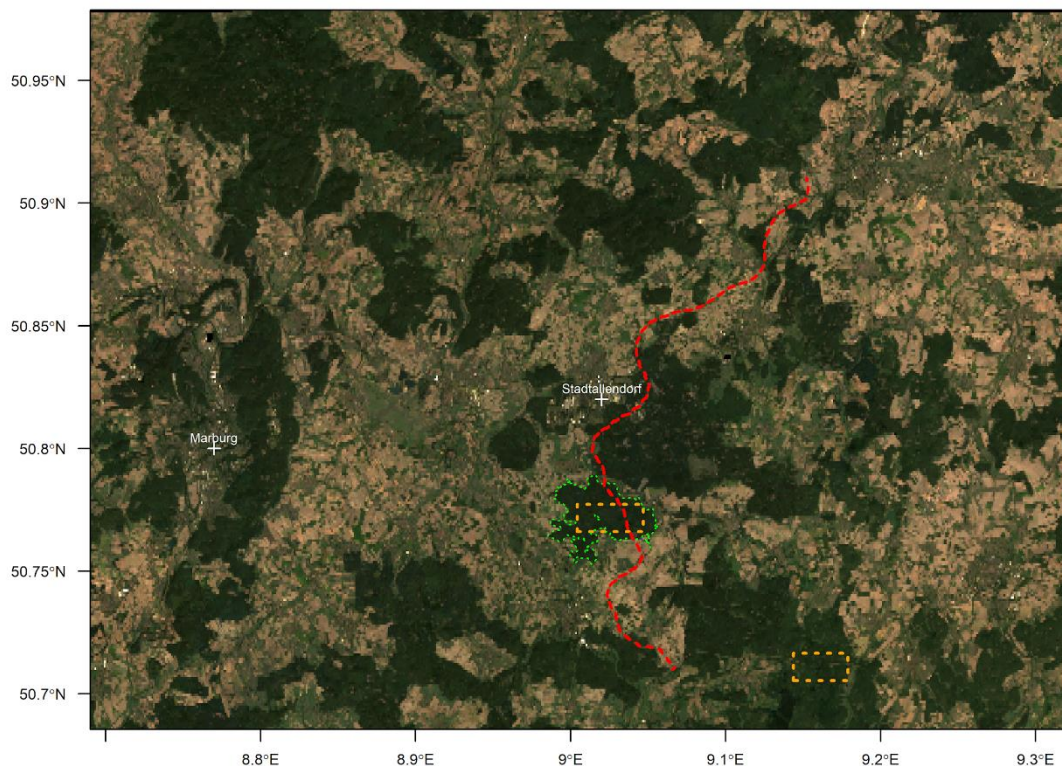
satellitenbildbasierten Analyse wird bestimmt, wie sich die Oberflächentemperaturen in einem großräumigen Untersuchungsgebiet um den Dannenröder Forst in Bezug auf

- a) verschiedene Landnutzungsklassen;
- b) die Vitalität der Vegetation;
- c) die Größe von Waldgebieten; und
- d) das Vorhandensein von Autobahnstrecken

verhalten.

## 2. Methodik

Das Untersuchungsgebiet umfasst rund 1450 km<sup>2</sup> des westhessischen Berg- und Beckenlands und deckt, neben dem Dannenröder Forst zwischen Stadtallendorf und Homberg (Ohm), große Teile des Burgwaldes nördlich von Marburg sowie den Herrenwald östlich von Stadtallendorf ab (Abbildung 6). Die größte Stadt im Gebiet ist Marburg, westlich des Dannenröder Forsts.



**Abbildung 6: Landsat 8-Satellitenbild des Untersuchungsgebietes (Median RGB) Juli-Oktober 2020 mit den Städten Marburg und Stadtallendorf.** Der Dannenröder Forst ist mit einer grünen Linie gekennzeichnet. Der Verlauf der geplanten A49 ist rot markiert. Die orangefarbene Ausschnitte zeigen die Gebiete, die für den Vergleich der Oberflächentemperatur von Wäldern mit und ohne Autobahnverlauf genauer untersucht wurden. Datengrundlage: Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1. Projektion: WGS 84. Auflösung: 30 m.

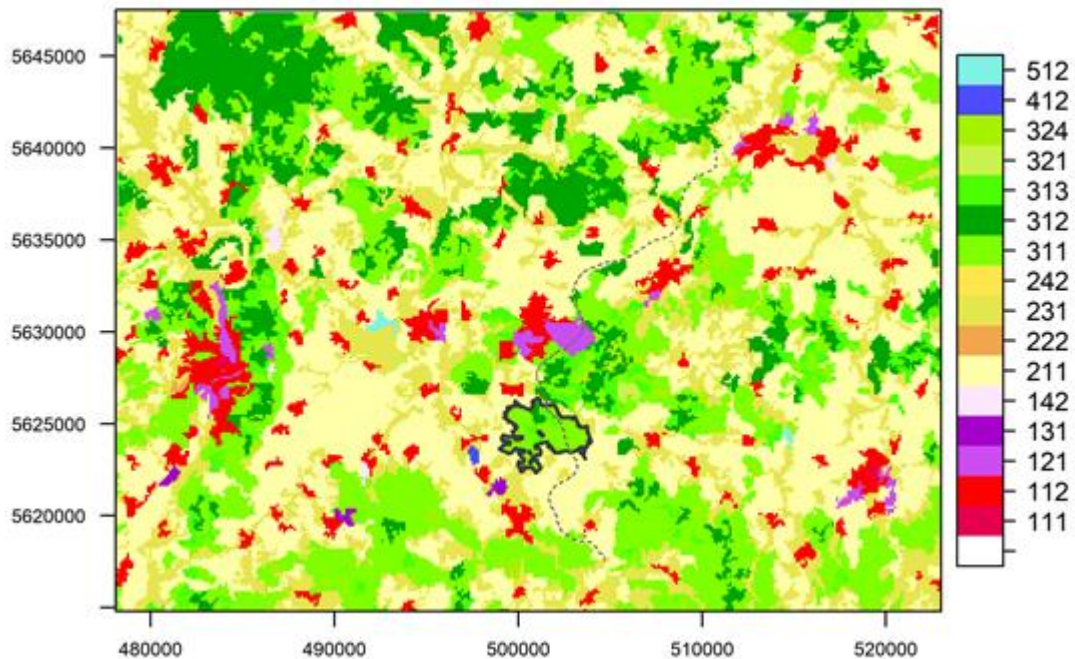


Für die Analyse wurden unterschiedliche, frei verfügbare Geodaten verwendet (Anhang, Tabelle A1). Die Oberflächentemperaturen wurden mit Hilfe von Satellitenaufnahmen ermittelt. Die räumlich gröber aufgelösten Daten stammen vom Radiospektrometer MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), der auf dem Aqua EOS PM-1 Satelliten installiert ist. Oberflächentemperaturen des MODIS, berechnet aus der Strahlungsintensität der Infrarotbänder (Bänder 31 und 32 mit 10.8-12.3  $\mu\text{m}$ ), sind mit ihrer räumlichen Auflösung von rund 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 1 Tag verfügbar. Der Aqua EOS PM-1 Satellit überfliegt das Untersuchungsgebiet täglich gegen 13 Uhr. Die räumlich feiner aufgelösten Daten der Oberflächentemperaturen stammen von den Landsat-Missionen 5, 7 sowie 8 und haben eine zeitliche Auflösung im 16-Tage Rhythmus. Sie werden mit Hilfe der verschiedenen Scanner ebenfalls über die Infrarotbänder und mit zusätzlichen Daten zur Atmosphäre und Oberflächenemissivität berechnet. Die Aufnahmen der Landsat-Missionen im Untersuchungsgebiet erfolgen immer gegen 10 Uhr. Dies bedeutet, dass weder die MODIS- noch die Landsat-Daten die Situation der nachmittäglichen Tageszeiten wiedergeben, welche normalerweise die wärmsten sind.

Die Daten zur Vitalität der Vegetation stammen vom MODIS-Radiospektrometer auf dem Terra EOS AM-1 Satelliten, sind prozessiert und in einer zeitlichen Auflösung von 16 Tagen und u. a. in einer räumlichen Auflösung von 1 km verfügbar. Der Datensatz zur Vitalität der Vegetation entsteht durch das *Compositing* von täglichen Aufnahmen der Erdoberfläche, in das Berechnungen zu bestimmten Qualitätsmerkmalen wie Wolkenlosigkeit einfließen. Da der Datensatz aus verschiedenen Satellitenaufnahmen (MOD09GHK, MOD09GQK, MOD09GST, MOD09GAD, MOD09THKM, MOD09TQKM) generiert wird, kann eine Tageszeit nicht angegeben werden (Didan et al., 2015). Alle Analysen wurden mit der Cloud-Computing-Plattform GoogleEarthEngine und der integrierten Entwicklungsumgebung RStudio durchgeführt.

## Landnutzung

Das gesamte Untersuchungsgebiet wurde anhand des 2018er CORINE-Datensatzes des Copernicus-Programms der *European Environment Agency* zur Landbedeckung und Landnutzung in entsprechende Klassen, wie z. B. unterschiedliche Offenland- und Waldflächen sowie urbane Bereiche, unterteilt (CORINE: *Coordination of Information on the Environment*; Abbildung 7).



**Abbildung 7: CORINE-Landnutzungsklassen mit Umrissen des Dannenröder Forsts und der geplanten A49.** Legende: 111 durchgängig städtische Prägung, 112 nicht durchgängig städtische Prägung, 121 Industrie- und Gewerbeflächen, 131 Abbauflächen, 142 Sport- und Freizeitanlagen, 211 Nicht bewässertes Ackerland, 222 Obst- und Beerenobstbestände, 231 Wiesen und Weiden, 242 Komplexe Parzellenstrukturen, 311 Laubwälder, 312 Nadelwälder, 313 Mischwälder, 321 Natürliches Grünland, 324 Wald-Strauch-Übergangsstadien, 412 Torfmoore, 512 Wasserflächen. Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung 100 m.

Die CORINE-Landnutzungsdaten wurden zur Anpassung an die Daten zur Oberflächentemperatur von ihrer Auflösung von 100 m auf 1 km hochskaliert. Nach der Skalierung umfasst das Untersuchungsgebiet noch 11 verschiedene Landnutzungsklassen (Tabelle 1). Vier Kategorien (Wasserflächen, Obst- und Beerenobstbestände, komplexe Parzellenstrukturen und Torfmoore) kamen nur in einem oder zwei Pixeln vor und wurden daher von der Analyse ausgeschlossen. Um die Aufheizung bzw. auch die Kühlungsfunktion der verschiedenen Landnutzungssysteme bestimmen zu können, fokussierte die Untersuchung auf die besonders warmen Tage. Entsprechend wurden für die weitere Analyse Daten aller Tage (zwischen 2002-2020) verwendet, die über das gesamte Untersuchungsgebiet einen Mittelwert von mindestens 25 °C aufwiesen. Im Zeitraum 04.07.2002 bis 10.04.2020 lagen insgesamt 630 Tage im Mittel bei  $\geq 25$  °C. Diese wurden auf ihren Zusammenhang mit verschiedenen Landnutzungsklassen untersucht.



**Tabelle 1: Anzahl der Pixel der im Untersuchungsgebiet vorzufindenden Landnutzungsklassen (nach 1 km Skalierung).** Grau eingefärbte Kategorien wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da sie flächenmäßig unterrepräsentiert waren.

	Durchgängig städtische Prägung	Nicht durchgängig städtische Prägung	Industrie- und Gewerbe- flächen	Abbauflächen	Sport- und Freizeit- anlagen	Nicht bewässertes Ackerland	Wiesen und Weiden	Laubwälder	Nadelwälder	Mischwälder	Wald-Strauch- Übergangsstadien	Wasserflächen
Klasse	111	112	121	131	142	211	231	311	312	313	324	512
Pixel- zahl	1	66	19	1	2	601	244	332	150	26	9	1

## Oberflächentemperaturen und Vitalität der Vegetation

Für die Untersuchung der Vitalität der Vegetation im Untersuchungsgebiet wurde der Vegetationsindex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) verwendet. Der NDVI berechnet sich aus den Nah-Infrarot Bändern und den Bändern des sichtbaren Spektrums von Satellitenbildern (Didan et al., 2015). Vegetationsfreie Oberflächen reagieren auf das Licht entgegengesetzt zu Oberflächen, die von Vegetation bedeckt sind. Über den Index können Aussagen zur Vegetationsbedeckung auf der Skala von 0 (vegetationsfrei) bis 1 (hohe Vegetationsbedeckung) getroffen werden. Ein hoher Index-Wert kann eine hohe Vitalität der Vegetation bedeuten (vgl. z. B. Bajocco et al., 2012).

Für die vorliegende Studie wurden die Oberflächentemperaturen der Vitalität der Vegetation gegenübergestellt. Dafür standen zwischen Juli 2002 und September 2020 Rasterdaten von 6618 Tagen zur Oberflächentemperatur und Rasterdaten von 418 Tagen zur Vitalität der Vegetation zur Verfügung. Von den insgesamt 6618 verfügbaren Aufnahmen der Oberflächentemperatur im genannten Zeitraum zeigten 622 einen Tagesmittelwert  $\geq 25$  °C. Die Zeitreihe des NDVI überschneidet sich in 36 (von 418 verfügbaren) Bildern zwischen 2002 und 2020 mit den heißesten Tagen ( $\geq 25$  °C) innerhalb desselben Zeitraums (Tabelle 2). Aus beiden Datensätzen wurden also die 36 Tage ausgewählt, an denen der Mittelwert der Oberflächentemperatur im Untersuchungsraum bei  $\geq 25$  °C lag. Zusätzlich wurde ein 100 m breiter Puffer um alle größere Straßen (OSM, 2020) herum erstellt und ausgespart, um die Daten ohne den Einfluss von Straßen zu untersuchen.

Tabelle 2: Anzahl der Tage pro Jahr im Zeitraum 04.07.2002 bis 13.09.2020, deren Mittel bei  $\geq 25$  °C liegen, (Oberflächentemperaturen/LST und Vegetationsvitalität/NDVI).

	Total	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>L S T</b>	<b>622</b>	10	53	23	29	39	23	27	27	28	31	23	31	19	40	39	23	76	46	35
<b>N D V I</b>	<b>36</b>	1	1	2	3	2	2	2	1	2	4	2	1	2	3	2	1	0	3	2

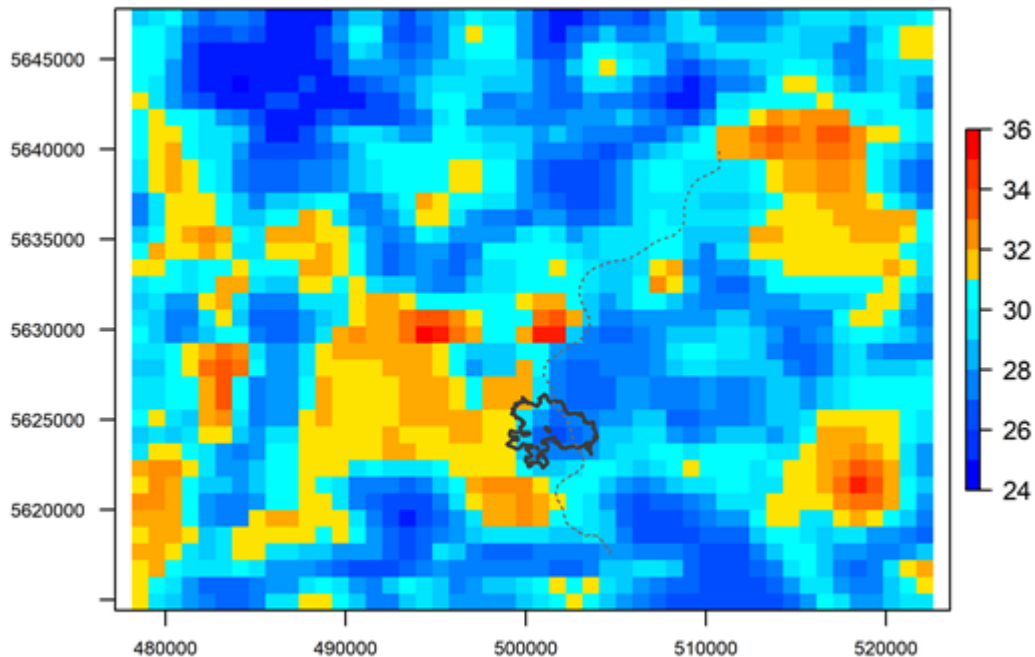
## Wirkung von Autobahnen auf Landschafts-Oberflächentemperaturen

Zur Abschätzung der Auswirkung von Autobahnen auf die Oberflächentemperatur wurden zwei kleinräumigere Ausschnitte von je ca. 800 m<sup>2</sup> innerhalb des Untersuchungsgebiets genauer betrachtet. Dabei wurde ein Ausschnitt des Dannenröder Forsts ausgewählt sowie ein ähnlich bewaldetes Gebiet in der Nähe, durch das bereits eine Autobahn (A5) verläuft, um die mögliche thermische Wirkung des geplanten Autobahnabschnitts durch den Dannenröder Wald abschätzen zu können. Für die Untersuchung der Oberflächentemperaturen in den zwei Ausschnitten wurden die räumlich feiner aufgelösten Daten (30 m) der Landsat Missionen 5, 7 und 8 verwendet. Der Algorithmus zur Anwendung in der webbasierten Google Earth Engine zur Verarbeitung der Landsat-Satellitendaten wurde von Ermida et al. übernommen (Ermida et al., 2020).



### 3. Ergebnisse

Innerhalb des Untersuchungsgebiets streuen die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen der heißesten Tage ( $\geq 25\text{ °C}$ ) über den Zeitraum von 2002-2020 von  $25\text{ °C}$  bis  $34\text{ °C}$  (Abbildung 8).

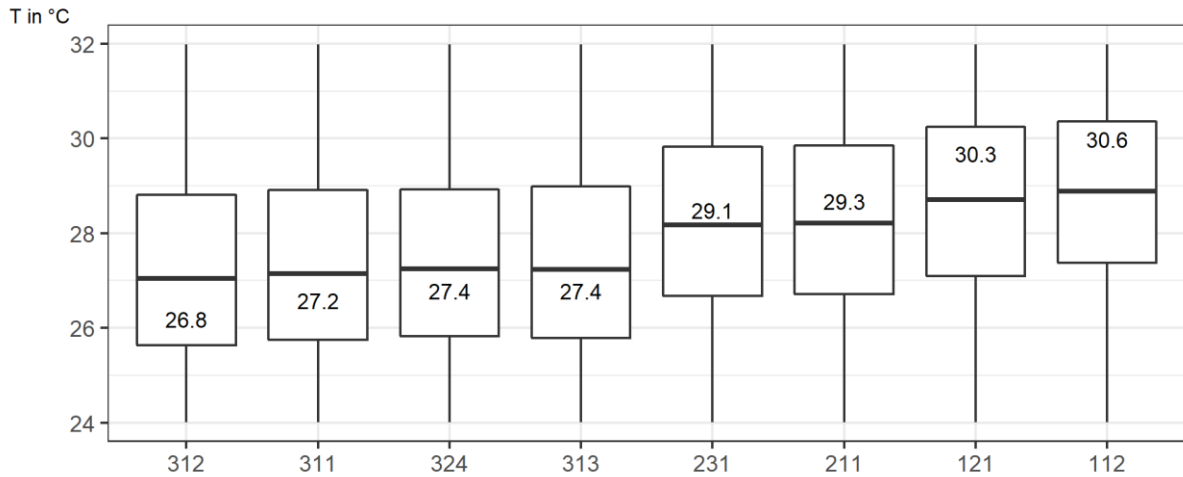


**Abbildung 8: Mittelwerte der Oberflächentemperaturen im Untersuchungsgebiet über alle Tage (n = 622), die im Mittel bei  $\geq 25\text{ °C}$  lagen, über den gesamten Untersuchungszeitraum (2002-2020).** Der schwarz umrandete Bereich stellt den Dannenröder Forst dar; die gestrichelte Linie den Verlauf der geplanten Autobahn A49. Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6). Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung: 1 km.

Die Oberflächentemperaturen unterscheiden sich deutlich zwischen den verschiedenen Landnutzungsklassen. Die Betrachtung der Tage mit Tagesdurchschnittstemperaturen  $\geq 25\text{ °C}$  über den gesamten Untersuchungszeitraum (2002-2020) zeigt, dass die mit Wald bedeckten Bereiche sowie Wald-Strauch-Übergangsstadien die kältesten Areale im Untersuchungsgebiet sind und im Kontrast zu wärmeren landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen sowie zu Stadt- und Industrieflächen stehen (vgl. Abbildung 9). Die versiegelten urbanen Gebiete wie Marburg, Stadtallendorf oder Alsfeld sind die wärmsten Bereiche. Der Temperaturunterschied der durchschnittlichen Oberflächentemperaturen zwischen den kühlpsten und bewaldeten Bereichen sowie den wärmsten urbanen Gebieten beträgt über  $10\text{ °C}$ .

Der Dannenröder Forst zeigt über alle heißen Tage innerhalb des gesamten Betrachtungszeitraums durchschnittliche Oberflächentemperaturen unter  $30\text{ °C}$ , wobei sich die angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen, die sich westlich bis zur Stadt Marburg erstrecken, deutlich über  $30\text{ °C}$  erwärmen. Gerade der östliche Bereich des Dannenröder

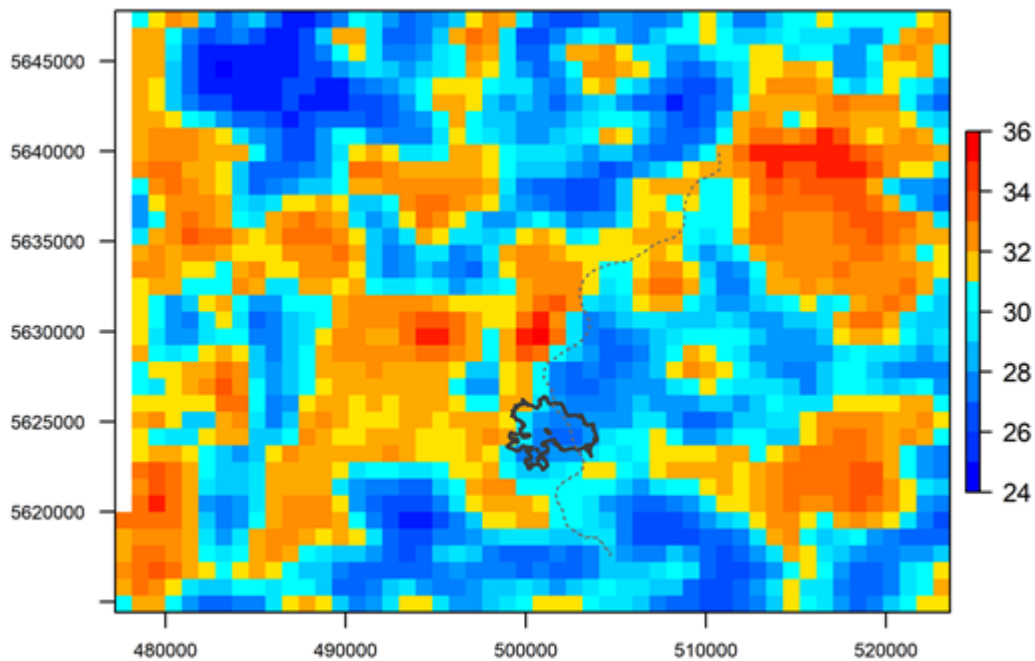
Forsts (genau dort, wo die geplante Autobahn verlaufen soll), stellt den kühlestem Bereich innerhalb des Waldgebiets dar.



**Abbildung 9: Oberflächentemperaturen der heißesten Tage ( $\geq 25$  °C) im gesamten Untersuchungszeitraum (2002-2020) für das gesamte Untersuchungsgebiet und die einzelnen Landnutzungsclassen.** Die fetten waagerechten Linien und die Zahlen innerhalb eines Boxplots stellen den Median, die senkrechten Linien die Streuung der Werte dar. Eine starke Streuung ergibt sich u. a. durch die räumliche Auflösung und die Tatsache, dass in Pixeln, die einer bestimmten Landnutzungsclass zugeordnet werden, sich auch Anteile anderer Landnutzungen finden können. X-Achse: nach steigender Oberflächentemperatur geordneten Landnutzungsclassen: 312 Nadelwälder (150 Pixel), 311 Laubwälder (332 Pixel), 324 Wald-Strauch-Übergangsstadien (9 Pixel), 313 Mischwälder (26 Pixel), 231 Wiesen und Weiden (244 Pixel), 211 Nicht bewässertes Ackerland (601 Pixel), 121 Industrie und Gewerbeflächen (19 Pixel), 112 Nicht durchgängige städtische Bebauung (66 Pixel). Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6) und CORINE Land Cover.

## Oberflächentemperaturen und Vitalität der Vegetation der letzten Jahre

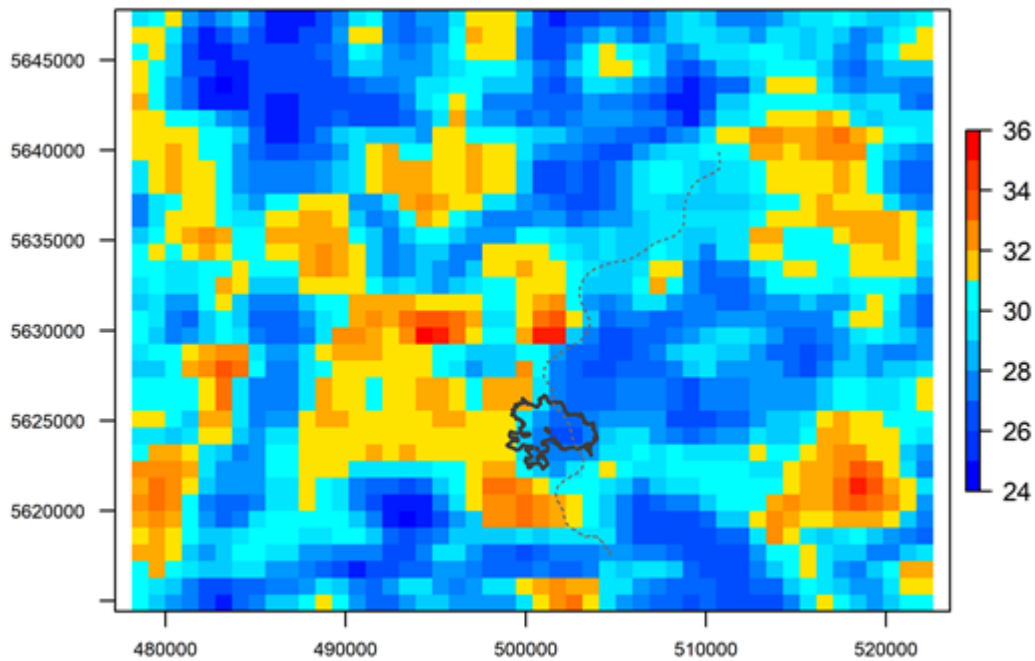
Das Jahr 2018 war eines der heißesten Jahre im Untersuchungszeitraum. Innerhalb des Untersuchungsgebiets stiegen die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen, gemittelt über alle Tage mit einer Tagesdurchschnittstemperatur  $\geq 25$  °C, auf insgesamt 28 Pixeln (im Vergleich 2019: 7 Pixel; 2020: 1 Pixel) auf über 35 °C an. Gerade die größeren Waldflächen stellen dabei die kälteren Bereiche dar. Sie sind von sich bis auf über 35 °C erwärmenden landwirtschaftlichen und urbanen Flächen umgeben. Auch der Dannenröder Forst bleibt vergleichsweise kühl, v. a. in dem Bereich, der von der geplanten Autobahn durchschnitten werden soll (Abbildung 10).



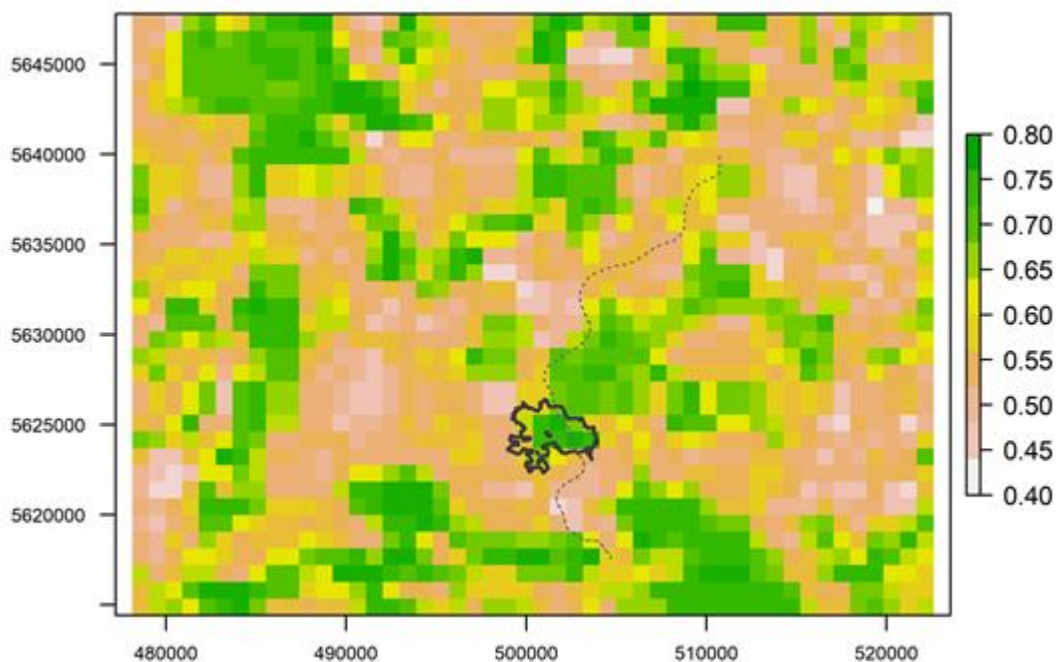
**Abbildung 10: Mittelwerte der Oberflächentemperatur in der Region über alle Tage im Jahr 2018, die im Mittel  $\geq 25$  °C sind (n = 76 Tage).** Der schwarz umrandete Bereich stellt den Dannenröder Forst dar; die gestrichelte Linie den Verlauf der geplanten Autobahn A49. Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6). Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung: 1 km.

Der räumliche Vergleich von Oberflächentemperatur und der Vitalität der Vegetation (NDVI) zeigt, dass v. a. die Bereiche mit hohen NDVI-Werten niedrige Oberflächentemperaturen aufweisen (Abbildungen 11-15). Demnach wirkt sich eine dichte und geschlossene bzw. vitale Vegetation kühlend auf die Oberflächentemperaturen aus.

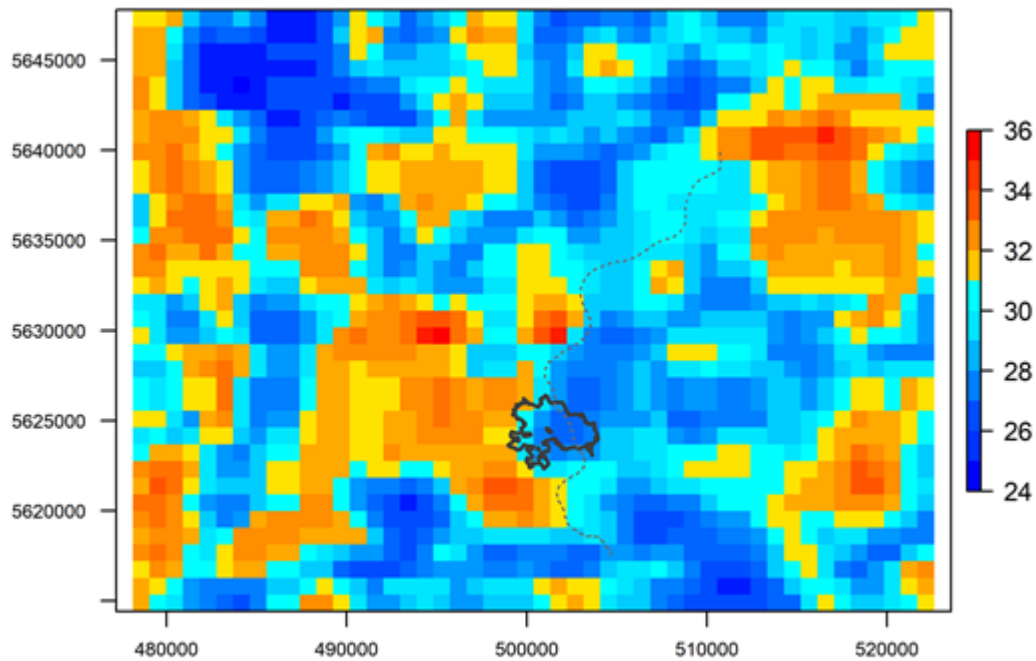




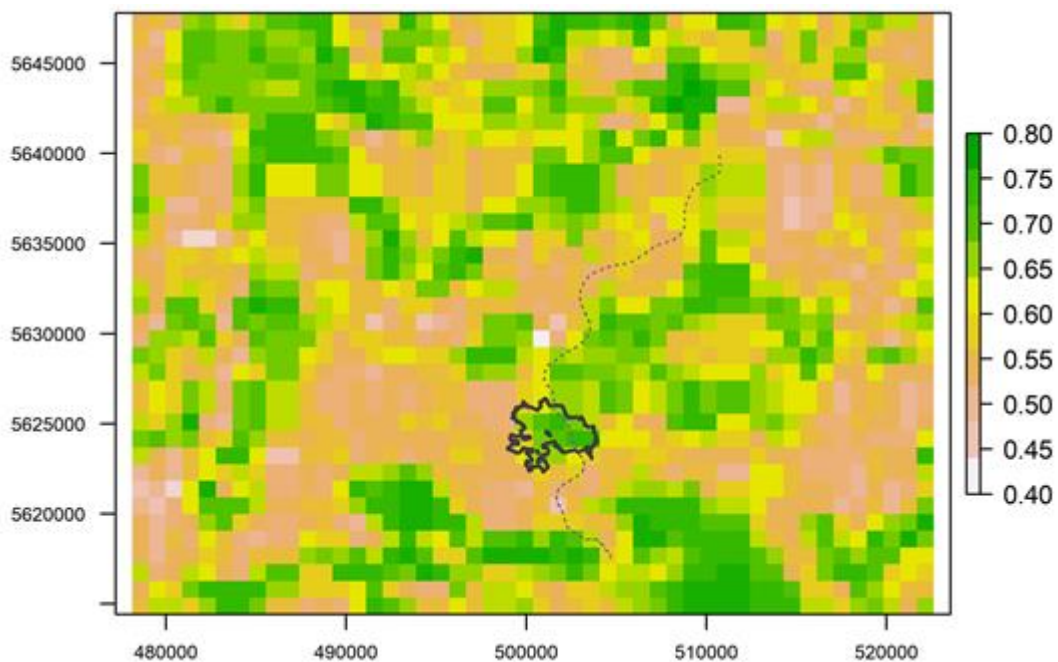
**Abbildung 11: Mittelwerte der Oberflächentemperatur in der Region über alle Tage im Jahr 2019, die im Mittel bei  $\geq 25$  °C liegen (46 Tage).** Der schwarz umrandete Bereich stellt den Dannenröder Forst dar; die gestrichelte Linie den Verlauf der geplanten Autobahn A49. Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6). Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung: 1 km.



**Abbildung 12: Mittelwerte der Vitalität der Vegetation in der Region über alle Tage im Jahr 2019, die im Mittel bei  $\geq 25$  °C lagen (3 Tage).** Der schwarz umrandete Bereich stellt den Dannenröder Forst dar; die gestrichelte Linie den Verlauf der geplanten Autobahn A49. Datengrundlage: MODIS (MOD13A2 Version 6). Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung: 1 km.

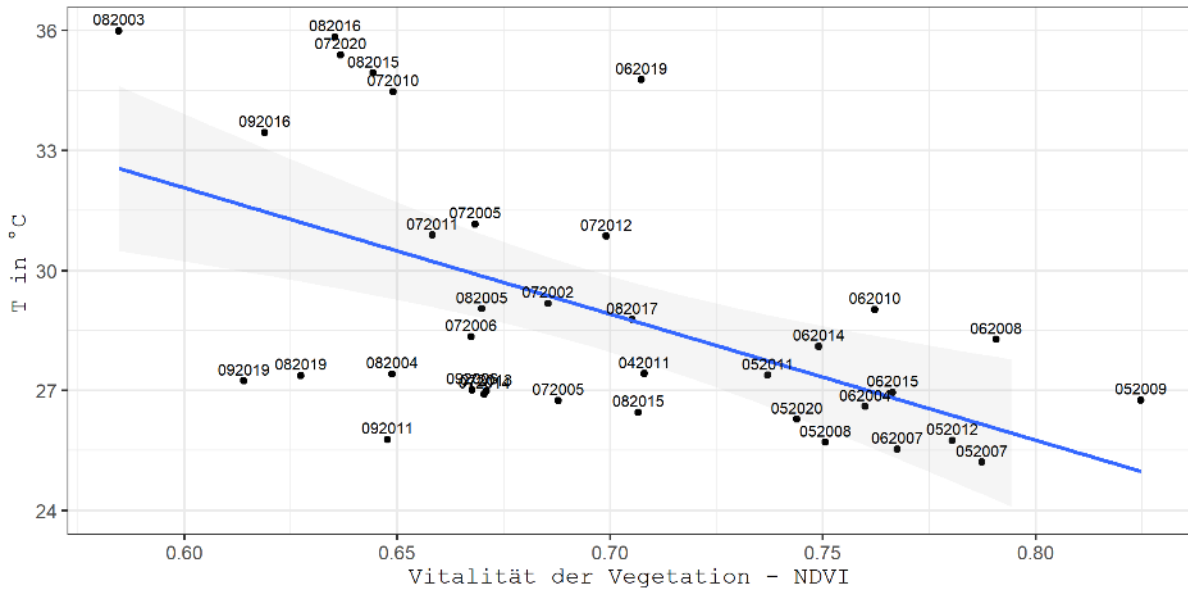


**Abbildung 13: Mittelwerte der Oberflächentemperatur in der Region über alle Tage im Jahr 2020, die im Mittel bei  $\geq 25$  °C liegen (34 Tage).** Der schwarz umrandete Bereich stellt den Dannenröder Forst dar; die gestrichelte Linie den Verlauf der geplanten Autobahn A49. Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6). Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung: 1 km.



**Abbildung 14: Mittelwerte der Vitalität der Vegetation in der Region über alle Tage im Jahr 2020, die im Mittel bei  $\geq 25$  °C lagen (2 Tage).** Der schwarz umrandete Bereich stellt den Dannenröder Forst dar; die gestrichelte Linie den Verlauf der geplanten Autobahn A49. Datengrundlage: MODIS (MOD13A2 Version 6). Projektion: ETRS89/UTM32N. Auflösung: 1 km.

Die Zeitreihenanalyse über den gesamten Untersuchungszeitraum (2002-2020) der Oberflächentemperaturen an den heißesten Tagen ( $\geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und der Vitalität der Vegetation (NDVI) zeigt einen deutlichen Zusammenhang der beiden Größen (Abbildung 15). In Zeiträumen, in denen die Landschaft durch eine Vegetation mit geringer Vitalität (niedrige NDVI Werte, z. B. 2003 und 2016) geprägt sind, zeigen sich höhere Oberflächentemperaturen als in Jahren mit vergleichsweise höherer Vitalität der Vegetation (2007-2009).

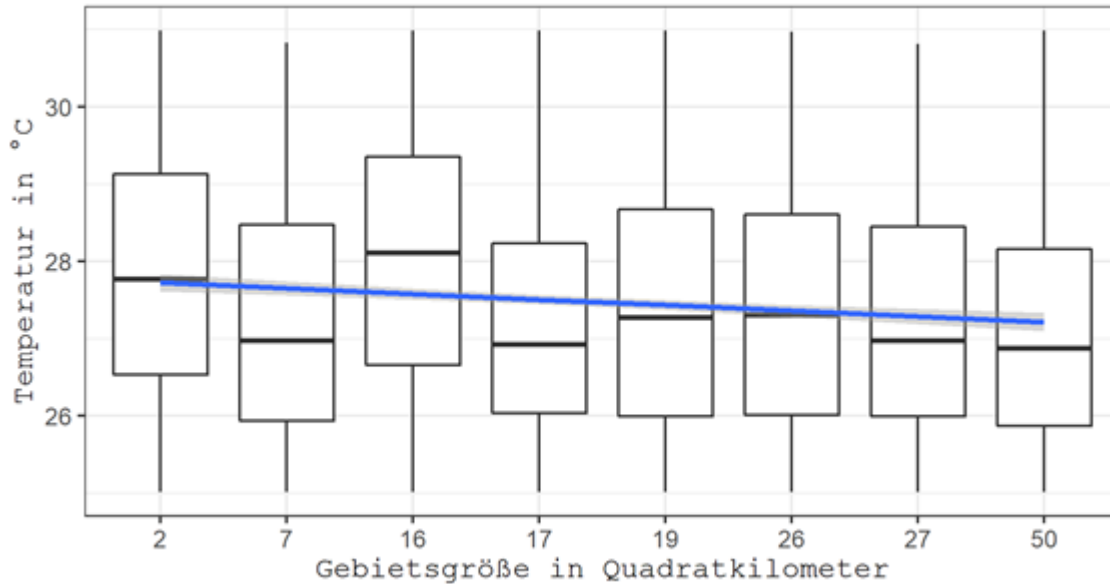


**Abbildung 15: Verhältnis der Mittelwerte der Oberflächentemperaturen und der Vitalität der Vegetation (NDVI) an den heißesten Tagen (Tagesmitteltemperatur  $\geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), für die jeweils Daten der Oberflächentemperatur sowie Daten zur Vitalität der Vegetation verfügbar waren (36 der insgesamt 622 heißen Tage innerhalb des Untersuchungszeitraums Juli 2002 bis September 2020). Untersuchungsgebiet ist das gesamte Gebiet ohne größere Straßen und einem Puffer von 100 m um diese. Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6) und MODIS (MOD13A2 Version 6).**



## Oberflächentemperaturen in Bezug zur Größe von Waldflächen

Die Ausprägung der landschaftlichen Kühlung durch Waldflächen ist abhängig von ihrer Größe. Die Untersuchung der Oberflächentemperaturen der heißesten Tage von 2002-2020 aller Waldflächen im Gebiet im Verhältnis zur Größe der jeweiligen Waldgebiete zeigt, dass größere Waldflächen eine signifikant ( $p < 0,001$ ) höhere Kühlungsfunktion aufweisen, als kleinere (Abbildung 16).



**Abbildung 16: Wald-Oberflächentemperaturen der heißesten Tage ( $\geq 25$  °C) im Zeitraum von 2002-2020** (Berücksichtigung aller Waldflächen im Gebiet im Verhältnis zur Größe der jeweiligen Waldgebiete mit einem inneren Puffer von 500 m in den Wald, um Randeffekte auszublenden). Die blaue Linie stellt die Regressionslinie durch die Mittelwerte dar, der graue Bereich gibt das 95 % Konfidenzintervall an. Die fetten waagerechten Linien und die Zahlen innerhalb eines Boxplots stellen den Median, die senkrechten Linien die Streuung der Werte dar (Werte außerhalb der Temperaturskala sind hier nicht abgebildet). Datengrundlage: MODIS (MYD11A1 Version 6) und CORINE Land Cover.

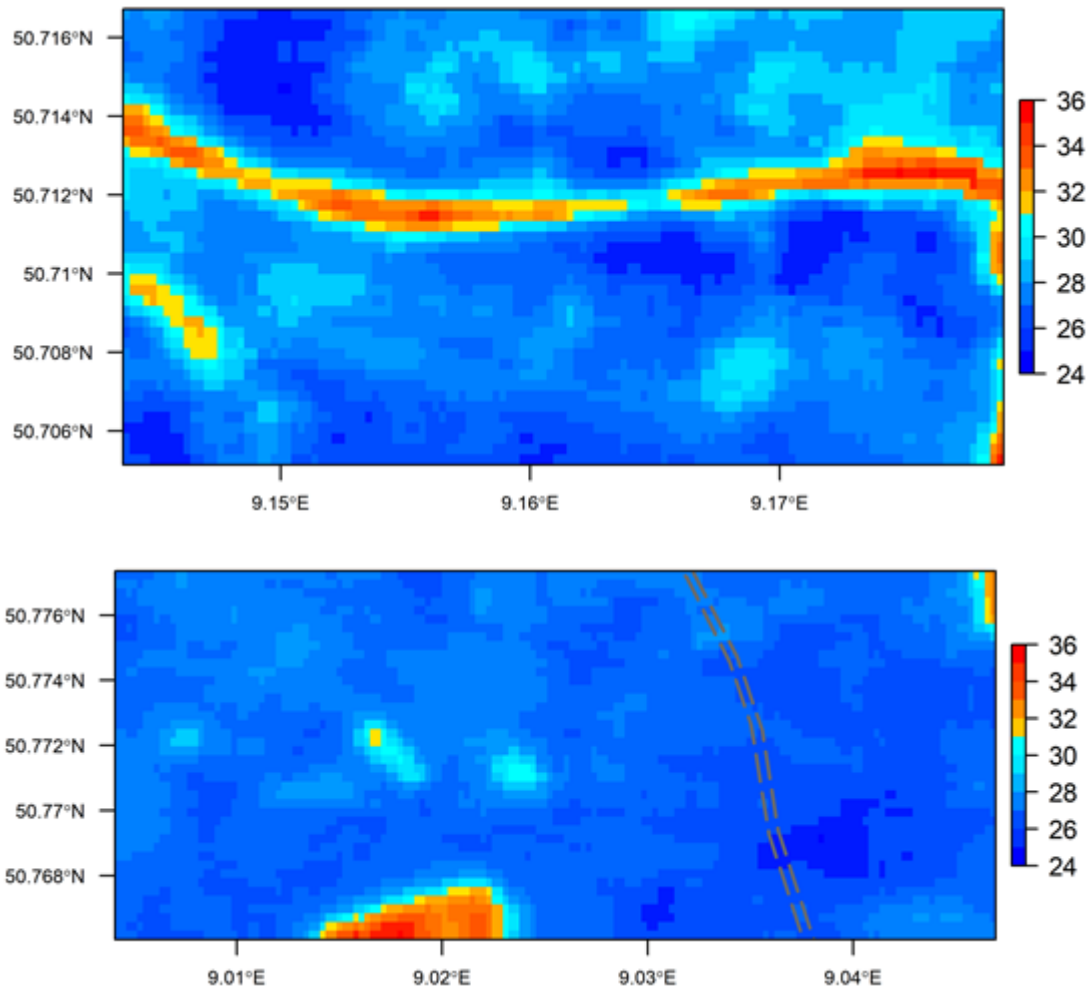
## Oberflächentemperaturen und Autobahnen

Der Vergleich der beiden Beispielausschnitte innerhalb des Untersuchungsgebiets (Abbildung 17) unter Verwendung der hochaufgelösten Landsat Daten verdeutlicht den Einfluss einer Autobahn innerhalb eines Waldgebietes auf die Oberflächentemperatur (Abbildung 18) bzw. das Ausmaß der ‚thermischen Zerschneidung‘.



**Abbildung 17: Landsat 8-Satellitenbild des Untersuchungsgebiets (Median RGB) Juli-Oktober 2020.** Im Nordwesten der Karte ist der orange markierte Bereich als ein Teilausschnitt des Dannenröder Forsts zu sehen. Im Südosten der Karte ist der Ausschnitt der von Wald umgebenen Autobahn A5 orange markiert. Datengrundlage: Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1. Projektion: WGS 84. Auflösung: 30 m.

Die Oberflächentemperaturen der beiden Beispielausschnitte unterscheiden sich statistisch signifikant voneinander (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0.1616006, p-value = 0.0000). Der Verlauf der Autobahn A5 ist deutlich anhand der erhöhten Oberflächentemperaturen zu erkennen (Abbildung 18 oben). Die Oberflächentemperaturen entlang der Autobahn erreichen (im langjährigen Durchschnitt der heißesten Tage [ $\geq 25$  °C]) stellenweise ca. 35 °C und betragen im Durchschnitt über die gesamte Autobahn fast 29 °C. Die Waldränder erwärmen sich bis knapp über 30 °C; waldeinwärts sinken die Temperaturen deutlich. Die Oberflächentemperaturen liegen im Dannenröder Forst (wo die Autobahn A49 gebaut werden soll) im Durchschnitt der heißesten Tage der letzten 18 Jahre ( $\geq 25$  °C), deutlich unter 30 °C (Abbildung 18 unten).



**Abbildung 18: Oberflächentemperaturen der heißesten Tage ( $\geq 25$  °C) von 2002-2020 in zwei Ausschnitten.** OBEN: Waldbereich im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebiets zwischen Zell und Ehringshausen, durch den die Autobahn A5 verläuft. Mittelwert: 26,4 °C; Mittelwert der reinen Autobahnpixel: 28,7 °C. UNTEN: Teilbereich des Dannenröder Forsts, durch den die geplante Autobahn A49 verlaufen soll. Roter Bereich unten im Bild zeigt einen Waldrand zum Offenland. Mittelwert: 25,8 °C. Datengrundlage: Landsat 5,7, 8; LST - Ermida et al. 2020. Projektion: WGS 84. Auflösung: 30 m.



## 4. Diskussion

Die mit Vegetation bedeckten Bereiche innerhalb des Untersuchungsgebiets weisen deutlich kühlere Oberflächentemperaturen auf als rein urbane Flächen. Den Waldökosystemen kommt in der Landschaft eine besonders kühlende Rolle zu. Gerade in Gebieten, in denen fast keine flächigen Gewässerstrukturen vorzufinden sind, wie im oberhessischen Untersuchungsgebiet, stellen Wälder die einzigen kühlenden Landschaftselemente dar. Wälder senken die Spitzen- sowie Durchschnittstemperaturen und dämpfen die Temperaturschwankungen. Die mikro- und mesoklimatische Kühlung stellt dabei eine wichtige Funktion für den Wald selbst als auch eine regulierende Ökosystemleistung für den Menschen und die angrenzenden Landnutzungsformen dar (Ellison et al., 2017). Durch seine unmittelbare Nähe zu Marburg ist der Dannenröder Forst für die Kühlung des peri-urbanen Raums und für die Entstehung von Frischluft bedeutsam.

Sowohl die Vitalität als auch die räumliche Ausdehnung der Waldflächen haben einen Einfluss auf die Kühlungsleistung. Der Bau einer Autobahn durch den Dannenröder Forst würde die zusammenhängende Waldfläche reduzieren, eine ‚thermische Zerschneidung‘ bedeuten und zudem gleich zwei kilometerlange Waldränder schaffen. Das aktuelle Potential der Temperaturkühlung würde durch die flächenmäßige Verkleinerung, die Entwaldung und das Schaffen neuer Waldränder reduziert werden. Vor allem aber würde sich die Klimawandel-Vulnerabilität des Waldes stark erhöhen. Die durch den Autobahnbau entstehenden Freiflächen und Waldränder würden nicht nur Hitzestress hervorrufen, sondern v.a. auch austrocknend auf die Bäume wirken. Die höheren Landschafts-Temperaturen würden in niederschlagsarmen Zeiten das Wasserdefizit weiter verschärfen. Wald verdunstet zwar auch Wasser (worauf ein Teil der Kühlungswirkung beruht), bewirkt aber zudem einen hydraulischen Auftrieb im Boden und fördert die Wasserspeicherung. Zusätzlich können die thermischen Luftbewegungen auf bzw. entlang der Autobahn durch Advektion die Austrocknung der angrenzenden Waldbereiche noch weiter verschärfen.

Hinzu kommt, dass Bäume, die in einem geschlossenen Bestand aufgewachsen sind, plötzlich freigestellt und starker direkter Sonneneinstrahlung sowie Wind ausgesetzt werden. Es ist davon auszugehen, dass sich etwa durch Sonnenbrand, Trocknisschäden oder Windwurf deutliche Schäden an den der Autobahn zugewandten Rändern entwickeln werden.

Die klimatische Entwicklung der letzten Jahre, die bereits zu deutlichen Vitalitätsverlusten von Wäldern geführt hat, zeigt, wie wichtig die Bewahrung intakter Waldflächen und das Aufrechterhalten regulierender Ökosystemleistungen sind. Eine Verschlechterung des Waldzustands führt zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur (Hesslerová et al., 2018) und verstärkt rückkoppelnd den bestehenden Hitze- und Trockenstress auf die verbleibenden Bäume.

Obwohl Wälder auch unter den hohen Temperaturen und Niederschlagsdefizit leiden, bleiben sie dennoch vergleichsweise kühl. Gerade in extremen Jahren wird diese Funktion am deutlichsten und relevantesten. Die jüngsten Jahre geben einen gewissen Ausblick in die mögliche Zukunft im Klimawandel - es ist zu befürchten, dass die heutigen Extreme ‚das neue Normal‘ darstellen könnten (Scharnweber et al., 2020). Die Wirkung einer sich stark erwärmenden Autobahn wird den Hitze- und Trockenstress deutlich verschärfen und auch

die Durchschnittstemperaturen der gesamten Landschaft weiter nach oben treiben. Temperaturen beeinflussen wiederum das Wachstum und Überleben von Organismen sowie die Produktivität in der Land- und Forstwirtschaft (Hatfield and Prueger, 2015).

In einer Zeit, in der vom Staat erhebliche finanzielle Mittel zur Bewältigung von bereits entstandenen Waldschäden und zur Wiederherstellung von Waldflächen bereitgestellt werden müssen und gleichzeitig versucht wird, durch Klimawandelanpassungsstrategien die Landnutzung zukunftsfähig zu machen, erscheint es unverantwortlich, ökologisch wertvolle Waldrelikte zu zerschneiden und diese neuen Risiken auszusetzen.

Das Zusammenspiel von extremen Sommern und der aktuell erhöhten Mortalität von Bäumen bzw. Schädigung von Wäldern zeigt, dass bei der Infrastrukturentwicklung allgemein und der Planung von Straßen und Autobahn im Speziellen, v. a. auch im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung, mikroklimatische und hydrologische Wirkungen von Straßen fortan viel stärker berücksichtigt werden müssen.

Die Erhaltung und die Förderung gesunder Wälder, die zahlreiche ökologische Funktionen erfüllen, ist auch unabdingbar für die Bewahrung mikroklimatischer Refugien für zahlreiche vom Klimawandel akut bedrohter Organismen (Suggitt et al., 2011). Aktuell geht es darum, Mensch und Natur mehr Zeit für Anpassungsreaktionen zu verschaffen. Dies geht einzig durch Kühlung und Wasserrückhaltung in der Landschaft.

Die sogenannten Ausgleichs- und Ersatzpflanzungen, die im Rahmen der Waldrodung als Ausgleichsmaßnahmen umzusetzen sind, werden für lange Zeit bezüglich ihrer ökologischen Wirkungen und Funktionen nicht annähernd so wirkungsvoll sein wie der alte Baumbestand – wenn sie sich unter den zukünftigen Klimabedingungen überhaupt entsprechend entwickeln können. Das Etablieren neu angelegter Baumbestände ist bereits witterungsbedingt erheblich erschwert. Alte Wälder hingegen, die eine lange Kontinuität aufweisen, sind vergleichsweise besser in der Lage, mit Störungen umzugehen und zeigen eine verringerte Klimawandelsensitivität (Mausolf et al., 2018a, 2018b).

## **5. Schlussfolgerung und Empfehlung**

Im Waldkrisen-Jahr 2020 erscheint es unzeitgemäß und nicht vertretbar, dass noch intakte Waldökosysteme gerodet bzw. fragmentiert und zusätzlich geschwächt werden sollen. Bei der Prüfung von Vorhaben des Autobahnbaus sind regulierende Ökosystemleistungen (des Wasserschutzes bzw. der Stabilisierung des Landschaftswasserhaushalts in Kombination mit Kühlung und Pufferung) und die negativ auf diese wirkenden Faktoren, angemessen zu berücksichtigen. Gerade im Zusammenhang mit den nunmehr eingetretenen Extremwitterungen, Hitze- und Dürreperioden und der kumulativen Austrocknung der Böden erscheinen diese Ökosystemleistungen in völlig neuem Licht.

Die abschließende Empfehlung lautet deshalb: Auf Grundlage unserer Analysen und der Kenntnisse zu den darüberhinausgehenden multiplen Schadwirkungen von Straßen auf Waldökosysteme sowie angesichts der aktuellen Situation der Wälder in Kombination mit mittelfristigen Klimawandelszenarien sollten die Pläne zum Autobahnbau entlang der derzeitig vorgesehenen Trasse umgehend neu bewertet werden. Allemal muss darauf gedrängt werden, dass die bisher in den Betrachtungen zu den Umweltfolgen des Vorhabens nicht berücksichtigten Aspekte der thermischen Straßenwirkungen sowie des Klimawandels angemessen diskutiert werden, ehe Rodung und Bau weiter vorangetrieben werden.

## 6. Literatur

- Bajocco, S., De Angelis, A., Salvati, L., 2012. A satellite-based green index as a proxy for vegetation cover quality in a Mediterranean region. *Ecological Indicators* 23, 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.013>
- Blumröder, J.S., Burova, N., Winter, S., Goroncy, A., Hobson, P.R., Shegolev, A., Dobrynin, D., Amosova, I., Ilina, O., Parinova, T., Volkov, A., Graebener, U.F., Ibisch, P.L., 2019a. Ecological effects of clearcutting practices in a boreal forest (Arkhangelsk Region, Russian Federation) both with and without FSC certification. *Ecological Indicators* 106, 105461. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105461>
- Blumröder, J.S., Hoffmann, M.T., Ilina, O., Winter, S., Hobson, P.R., Ibisch, P.L., 2020. Clearcuts and related secondary dieback undermine the ecological effectiveness of FSC certification in a boreal forest. *Ecol Process* 9, 10. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-0214-4>
- Blumröder, J.S., Ibisch, P.L., Kriewald, S., 2019b. Hambacher Forst in der Krise (II) Temperaturmessungen zur Beurteilung der mikroklimatischen Situation des Waldes und des Randbereichs. Greenpeace e.V., Hamburg.
- Breshears, D.D., Adams, H.D., Eamus, D., McDowell, N., Law, D.J., Will, R.E., Williams, A.P., Zou, C.B., 2013. The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Front. Plant Sci.* 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00266>
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B.R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., Lenoir, J., 2019. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nat Ecol Evol* 3, 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0842-1>
- Didan, K., Munoz, A.B., Huete, A., 2015. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series) 35. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A2.006>
- Dolgener, N., Freudenberger, L., Schluck, M., Schneeweiss, N., Ibisch, P.L., Tiedemann, R., 2014. Environmental niche factor analysis (ENFA) relates environmental parameters to abundance and genetic diversity in an endangered amphibian, the fire-bellied-toad (*Bombina orientalis*). *Conservation genetics*.
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarto, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D.V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., Sullivan, C.A., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Ermida, S.L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F.-M., Trigo, I.F., 2020. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing* 12, 1471. <https://doi.org/10.3390/rs12091471>
- Grossiord, C., Buckley, T.N., Cernusak, L.A., Novick, K.A., Poulter, B., Siegwolf, R.T.W., Sperry, J.S., McDowell, N.G., 2020. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist* 226, 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Hatfield, J.L., Prueger, J.H., 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes, USDA Research and Programs on Extreme Events* 10, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hesslerová, P., Huryňa, H., Pokorný, J., Procházka, J., 2018. The effect of forest disturbance on landscape temperature. *Ecological engineering* 120, 345–354.
- Ibisch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D.A., Vale, M.M., Hobson, P.R., Selva, N., 2016. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science* 354, 1423–1427. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>



- Ibisch, P.L., Kriewald, S., Blumröder, J.S., 2019. Hambacher Forst in der Krise Studie zur Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Situation sowie Randeffekten. Greenpeace e.V., Hamburg.
- Mausolf, K., Härdtle, W., Jansen, K., Delory, B.M., Hertel, D., Leuschner, C., Temperton, V.M., von Oheimb, G., Fichtner, A., 2018a. Legacy effects of land-use modulate tree growth responses to climate extremes. *Oecologia* 187, 825–837. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4156-9>
- Mausolf, K., Wilm, P., Härdtle, W., Jansen, K., Schuldt, B., Sturm, K., von Oheimb, G., Hertel, D., Leuschner, C., Fichtner, A., 2018b. Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. *Science of The Total Environment* 642, 1201–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.065>
- Norris, C., Hobson, P., Ibisch, P.L., 2012. Microclimate and vegetation function as indicators of forest thermodynamic efficiency. *Journal of Applied Ecology* 49, 562–570. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02084.x>
- OSM, Mitwirkende, 2020. OpenStreetMap. [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).
- Scharnweber, T., Smiljanic, M., Cruz-García, R., Manthey, M., Wilmking, M., 2020. Tree growth at the end of the 21st century - the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. *Environ. Res. Lett.* 15, 074022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab865d>
- Selva, N., Kreft, S., Kati, V., Schluck, M., Jonsson, B.-G., Mihok, B., Okarma, H., Ibisch, P.L., 2011. Roadless and low-traffic areas as conservation targets in Europe. *Environmental management* 48, 865.
- Selva, N., Switalski, A., Kreft, S., Ibisch, P.L., 2015. Why keep areas road-free? The importance of roadless areas, in: *Handbook of Road Ecology*. Wiley Online Library, pp. 16–26.
- Suggitt, A.J., Gillingham, P.K., Hill, J.K., Huntley, B., Kunin, W.E., Roy, D.B., Thomas, C.D., 2011. Habitat microclimates drive fine-scale variation in extreme temperatures. *Oikos* 120, 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18270.x>
- UFZ, 2020. Dürremonitor Deutschland. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung. <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>
- van der Ree, R., Smith, D.J., Grilo, C., 2015. *Handbook of Road Ecology*. John Wiley & Sons.
- Williams, A.P., Allen, C.D., Macalady, A.K., Griffin, D., Woodhouse, C.A., Meko, D.M., Swetnam, T.W., Rauscher, S.A., Seager, R., Grissino-Mayer, H.D., Dean, J.S., Cook, E.R., Gangodagamage, C., Cai, M., McDowell, N.G., 2013. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Clim Change* 3, 292–297. <https://doi.org/10.1038/nclimate1693>
- Zellweger, F., Coomes, D., Lenoir, J., Depauw, L., Maes, S.L., Wulf, M., Kirby, K.J., Brunet, J., Kopecký, M., Máliš, F., Schmidt, W., Heinrichs, S., Ouden, J. den, Jaroszewicz, B., Buyse, G., Spicher, F., Verheyen, K., Frenne, P.D., 2019. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography* 28, 1774–1786. <https://doi.org/10.1111/geb.12991>

## 7. Anhang

Tabelle A1: Übersicht der in der Analyse verwendeten Datensätze.

Datensatz	Auflösung	Parameter	Verfügbarer Zeitraum	Gewählter Zeitraum	Sequenz und Uhrzeit der Aufnahmen	Anzahl der Bilder
MODIS Aqua, NASA, MYD11A1.006	1 km	LST (land surface temperature)	04.07.2002 bis 04.10.2020	04.07.2002 bis 13.09.2020	Zeitreihe, 1 Tag, gegen 13 Uhr	6618
MODIS Terra, NASA, MOD13A2.006	1 km	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	18.02.2002 bis 13.09.2020	04.07.2002 bis 13.09.2020	Zeitreihe, 16 Tage, ohne Zeit	418
Copernicus, EEA, Corine Land Cover	100 m	Land cover 2018	1990, 2000, 2006, 2012, 2018	2018	Momentaufnahme, ohne Zeit	1
Landsat 5, 7 und 8, Ermida et al. 2020	30 m	LST (land surface temperature)	01.01.1984 - heute	04.07.2002 bis 13.09.2020	Zeitreihe, 16 Tage, gegen 10 Uhr	1460
OSM	-	Straßen, Wald	-	-	Momentaufnahme, ohne Zeit	-

