

Grundsatzgutachten Anpassung an den Klimawandel durch verbesserten Landschaftswasserhaushalt



Anwendungsorientierte Forschung
für nachhaltige Lösungen

Abschlussbericht für das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

Kontakt:

Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB)
Brauhausweg 2
03238 Finsterwalde
Tel. 03531/ 7907-0
www.fib-ev.de, fib@fib-ev.de
Amtsgericht Cottbus - Vereinsregister VR 3792
Geschäftsführung: Dr. Michael Haubold-Rosar

Bearbeitung:

Dr. Christian Hildmann, c.hildmann@fib-ev.de, 03531 7907-25
Dr. Henry Munack, h.munack@fib-ev.de, 03531 7907-27
Lydia Rösel, M.Sc, l.roesel@fib-ev.de, 03531 7907-29

Stand: 16. Dezember 2019

Projektleiter:


.....
Dr. Christian Hildmann

Wissenschaftlicher Direktor:


.....
Dr. Michael Haubold-Rosar

Finsterwalde, den 16.12.2019

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1 Einleitung und Veranlassung	11
2 Wechselwirkungen zwischen Landschaftswasserhaushalt und Klima	13
2.1 Einführung	13
2.2 Verdunstungsleistung und Rolle der Vegetation	13
2.3 Nachhaltigkeit – Einfluss auf den Stoffhaushalt	16
2.4 Rückkopplung in die Landschaftsebene	18
2.4.1 Lokalklimatische Rückwirkungen durch große, zusammenhängende Waldgebiete	18
2.4.2 Lokalklimatische Effekte von Gehölzflächen in der Landschaft	18
2.4.3 Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte und Klima	19
2.5 Steuerung des Landschaftswasserhaushalts als Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel	19
2.6 Indikatoren zur Bestimmung der Überwärmung und der Nachhaltigkeit	20
3 Hessen im Thermalbild	23
3.1 Thermaldaten der Landoberfläche	23
3.1.1 Amalgamierte Thermaldaten mehrerer Vegetationsperioden	23
3.1.2 Höhenintervalle	24
3.2 Was steuert die Oberflächentemperatur des Landes?	26
3.2.1 Die thermische Signatur der Landnutzungen	26
3.2.2 Hauptkomponenten	29
3.2.3 Korrelationen	31
3.3 Die Verteilung von T_{Land}	34
3.3.1 Siedlungen – Leuchttürme der Überwärmung	34
3.3.2 Wälder und Gewässerränder – Oasen der Kühle	38
3.3.3 Landwirtschaftliche und naturnahe Flächen der Klasse »Vegetation«	38
3.4 Einfluss der Vegetation auf T_{Land}	40
3.4.1 Kronendichte (TCD ₂₀₁₅)	42
3.4.2 Versiegelungsgrad (IMD ₂₀₁₅)	42
3.4.3 Pflanzenvitalität (NDVImed)	44
3.4.4 Nutzbare Feldkapazität (BGR_NFK)	44

4	Rolle der Planung bei der Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes zum Schutz des Klimas	47
4.1	Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen einschließlich des Klimas im Naturschutz-, Umwelt- und Planungsrecht	47
4.1.1	Internationales Recht, nationale Gesetze	47
4.1.2	Klimaschutzpläne	47
4.1.3	Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel in der Raumordnung	48
4.1.4	Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel im Umweltrecht	48
4.2	Steuerungsinstrumente, Maßnahmentypen in der Planung	49
4.2.1	Vorgelagerte Planungsebenen in der Landes- und Regionalplanung	49
4.2.2	Zulassungsverfahren mit Eingriffsregelung	50
4.3	Planerische Ansätze zum Schutz des Klimas in der Planung einschließlich Wirksamkeitskontrolle	50
5	Maßnahmentypen	55
5.1	Maßnahmentypen zur Verbesserung von Landschaftswasserhaushalt und Klima	55
5.1.1	Maßnahmentypen und konkrete Umsetzung	55
5.1.2	Übersicht über mögliche Maßnahmentypen	55
5.2	Wirksamkeit der Maßnahmentypen	57
5.2.1	Bewertungsansätze	57
5.2.2	Bewertung der Wirksamkeit anhand von Beispielen	59
5.3	Funktionale Schnittstellen zum Boden-, Grundwasser-, Gewässer- und Naturschutz, gesundheitliches Wohlbefinden des Menschen	61
5.4	Beispiele für Maßnahmentypen	64
5.4.1	Maßnahmentypen im ländlichen Raum	64
5.4.2	Maßnahmentypen im urbanen Raum	81
5.5	Synergien zu bestehenden Maßnahmenplanungen	88
5.5.1	Maßnahmen zur Bewirtschaftung der Gewässer nach WRRL	88
5.5.2	Maßnahmen für den Verbund Natura 2000	90
6	Suchräume für Maßnahmentypen in Hessen	93
6.1	Identifikation und Ableitung von Suchräumen	93
6.2	Identifizierte Suchräume	94
6.3	Biosphärenregion Rheingau-Taunus	99
7	Vorschläge für Pilotprojekte	103
7.1	Städtischer Raum	104
7.1.1	Dachbegrünung	104
7.1.2	Entsiegelung und Zwischennutzung / Umwidmung von Brachflächen	104
7.2	Ländlicher Raum	105
7.2.1	Wiedervernässung von Feuchtgebieten	105
7.2.2	Klimaresiliente Agrarsysteme	105
7.2.3	Gewässerrenaturierung	106

8	Kommunikationsstrategie	107
8.1	Externe Teilöffentlichkeit	107
8.1.1	Stakeholder	107
8.1.2	Informationen für die breite Öffentlichkeit	108
8.2	Interne Teilöffentlichkeit	109
9	Wissensdefizite und zukünftige Forschungsaufgaben	111
10	Anhang: Methoden	115
10.1	Aggregation der Themalszenen	115
10.2	Datenaggregation und -analyse	119
10.2.1	Statistische Analysen	123
10.3	Verzeichnisse	133

Zuordnung der Maßnahme L-19 „Landschaftswasserhaushalt stabilisieren“ als Klimaschutz- oder Klimaanpassungsmaßnahme im Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025

Der Integrierte Klimaschutzplan Hessen 2025 (IKSP) beschreibt für Hessen zahlreiche negative Effekte infolge der globalen Erwärmung. So ist die mittlere Jahrestemperatur hier bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts um 0,8°C angestiegen. Für die Zukunft sagen alle Klimamodelle einen weiteren Temperaturanstieg voraus. Zudem ist insbesondere mit einer Zunahme von extremen Klimaereignissen wie Hitzeperioden und Starkniederschlägen zu rechnen.

Das vorliegende Grundsatzgutachten zur Maßnahme L-19 „Landschaftswasserhaushalt stabilisieren“ hat den Aspekt der Verdunstungskühlung bodennaher Luftschichten durch vermehrte Vegetation im Fokus. Weitere Aspekte des Landschaftswasserhaushaltes sind nicht Bestandteil dieses Gutachtens.

Die Maßnahme L-19 hat das Ziel, die Kühlfunktion der urbanen und ländlichen Räume durch die Vegetationsverdunstung zu verbessern. Zusätzliche positive Effekte bestehen in einer möglichen Verbesserung der Niederschlagsretention auf vegetationsbestandenen Flächen. Im Idealfall können dadurch Abflüsse gedämpft sowie Stoffauswaschungen und Erosion vermindert werden. Die Wirkung der im Gutachten beschriebenen Maßnahmen ist als lokal anzusehen. Inwiefern die Kühlungswirkung von den Maßnahmenflächen in umliegende Flächen ausstrahlen kann, hängt von der Größe der Maßnahmenfläche und weiteren Faktoren ab. Die Erhöhung der Verdunstung und Beschattung durch Vegetation führt zu einem angenehmeren und gesünderen Lokalklima. Die Dämpfung von Hitzeextremen dient dem Schutz der menschlichen Gesundheit und ist daher als Klimaanpassungsmaßnahme einzustufen.

Die in diesem Gutachten vorgeschlagenen Maßnahmen zielen auf eine Mehrung der Vegetation ab. Sofern hier Biomasse dauerhaft aufgebaut wird, kann dadurch CO₂ gebunden werden. Die Maßnahmen haben daher auch Klimaschutz-Potential.

Zu zahlreichen anderen Maßnahmensteckbriefen des IKSP gibt es enge Verknüpfungen. Laut Maßnahmensteckbrief zur L-19 gibt es Bezüge zur L-28 (Ökologischer Hochwasserschutz und Auenrenaturierung), L-02 (Förderung des Wasserrückhalts in Land- und Forstwirtschaft), L-14 (Erhaltung und Weiterentwicklung von Biotopverbundsystemen und Vermeidung weiterer Landschaftszerschneidungen) sowie zur SQ-09 (Hochwasserschutz in Stadt und Quartier). Zusätzlich gibt es weitere Bezüge. Beispielhaft genannt seien L-01 (Winterbegrünung der Felder), L-10 (Flächen zur Kalt- und Frischluftzufuhr sowie deren Entstehungsgebiete sichern und erweitern – überörtliche Ebene), L-11 (Klimasensitive Forstwirtschaft mit Breitenwirkung), L-17 (Klimawandelbedingte Verletzlichkeit der Böden erfassen, bei Abwägungsentscheidungen berücksichtigen und kommunizieren), LF-15 (Schutz von Moorböden) oder SQ-08 (Förderinitiative „Wasser in der Stadt“). Hier ist zur Nutzung der Synergien der frühzeitige Fachaustausch anzustreben.

Zusammenfassung

Die sich abzeichnenden Auswirkungen des Klimawandels unterstreichen die Bedeutung eines angepassten, vorausschauenden Handelns auf den verschiedenen räumlichen und fachlichen Ebenen. Hessen hat im Rahmen des integrierten Klimaschutzplans 2025 die Maßnahme L-19 „Landschaftswasserhaushalt unter Klimawandel stabilisieren“ als prioritär festgelegt, um für die räumliche Planung und die Landnutzung mit einem integrativen Ansatz Maßnahmen zu entwickeln, die zur Klimaanpassung beitragen und zugleich die Nachhaltigkeit der Landnutzung steigern. Das vorliegende Grundsatzgutachten stellt wesentliche Zusammenhänge zwischen Landschaftswasserhaushalt und seiner positiven Effekte im Sinne der Klimaanpassung dar, betrachtet den aktuellen Zustand von Hessen anhand von Thermalbildern und leitet schließlich Maßnahmentypen ab, die ein vorausschauendes und zielgerichtetes Handeln zur Stabilisierung des Klimas ermöglichen. Adressat des vorliegenden Gutachtens ist die Landes- und Regionalplanung.

Integrativer Betrachtungsansatz

Das Klima, also die über einen längeren Zeitraum beobachteten Temperaturen und Niederschlagsverhältnisse, weist eine Reihe von Rückkopplungen zum Landschaftswasserhaushalt auf. Wasser kommt auf der Erde und in der Atmosphäre in relevanten Größenordnungen in allen drei Aggregatzuständen vor. Die physikalischen Prozesse der Verdunstung und Kondensation des Wassers werden (im landschaftlichen wie im globalen Maßstab) durch die Sonne angetrieben: Ein Teil der täglich auf die Erde auftreffenden Sonnenenergie sorgt für die Verdunstung von Wasser. Durch die dabei aufgenommene Energie kommt es zur Abkühlung (die Sonnenenergie wird in latente statt in sensitive Wärme überführt). Der dabei entstehende Wasserdampf kann später bei geeigneten Umgebungsbedingungen kondensieren, wobei die zuvor aufgenommene Wärme wieder freigesetzt wird. Dadurch, dass der Zeitpunkt (und oft auch Ort) von Verdunstung und Kondensation verschoben sind, kommt es zum Ausgleich des täglichen (und jährlichen) Energiepulses der Sonne. Erst durch das Wasser als wichtigstem Treibhausgas wird das Klima auf der Erde erträglich.

Das überregionale Klima wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, wie z. B. die Sonneneinstrahlung oder die räumliche Lage. Die Zyklen von Verdunstung und Kondensation zeigen globale Muster, die durch die Lage der Kontinente, die Meeresströmungen etc. mit bestimmt werden. Jede Region ist nun ihrerseits über ihren Landschaftswasserhaushalt rückgekoppelt in diese übergeordneten Muster eingebunden: sie ist von diesen abhängig, trägt über ihre Verdunstung und Erwärmung aber auch zu diesen bei. Die direkten Effekte der Verdunstungskühle sind dann auf der Ebene des Lokalklimas zu beobachten. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers können kleinräumig auch die Erwärmung und Abkühlung von Wassermassen, etwa bei größeren Oberflächengewässern, eine ausgleichende Funktion übernehmen. Deshalb ist der Landschaftswasserhaushalt eine wichtige Komponente, die bei den Bemühungen zum Schutz des Klimas zu berücksichtigen ist.

Der Landschaftswasserhaushalt beschreibt die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers in der Landschaft. Das Niederschlagswasser fließt im Wassereinzugsgebiet dem Gefälle folgend ab, kann dabei sowohl zwischenzeitlich gespeichert oder verdunstet werden. Ein Teil des Abflusses erfolgt oberflächlich bzw. oberflächennah, während ein anderer Teil dem Grundwasserpfad folgt, bevor das Wasser die Oberflächengewässer speist. Hierbei sind besonders die Faktoren Landnutzung, Relief (einschließlich Mikrorelief), geologischer Untergrund und Boden (mit seinem Wasserspeicherungspotential) von Bedeutung.

Der Rückhalt des Wassers in der Landschaft besitzt eine wesentliche Schlüsselfunktion für das Lokalklima. Diese Retentionsfunktion ist eine Flächenfunktion, d. h. der Rückhalt des Wassers findet in der Fläche statt, etwa im Boden, und kann nicht auf wenige, kleine Flächen beschränkt werden, ohne an Leistungsfähigkeit zu verlieren.

Das Relief des Einzugsgebietes gibt die Fließrichtung und die Geschwindigkeit des Abflusses vor. Je nach den o.g. standörtlichen Bedingungen und dem Zufluss aus dem Wassereinzugsgebiet eines betrachteten Standorts ergeben sich Gradienten im Wasserhaushalt zwischen längere Zeit trockenen und meist feuchten Bereichen. Diese Verteilung bestimmt das Lokalklima im Einzugsgebiet mit.

Die Landnutzung beeinflusst über die Ausstattung mit verdunstungsaktiver Vegetation den Wasserrückhalt auf der Fläche entscheidend. Da sie auch Einfluss auf den verfügbaren Bodenwasserspeicher hat, ist sie ein Schlüsselfaktor für die Verdunstungshöhe und damit die Klimawirksamkeit der Landschaft.

Der kühlende Effekt der Vegetation ist sowohl messbar als auch direkt erlebbar. An einem warmen Sommertag lässt sich der Unterschied zwischen Freiland und Wald ebenso erleben, wie der Buchenwald kühler als der Kiefernwald wahrgenommen wird. Anhand von Thermalszenen von Satelliten (z. B. Landsat 8) kann die Oberflächentemperatur zu den Aufnahmezeitpunkten auch in der räumlichen Verteilung dargestellt werden. Dabei zeigt sich eindrücklich, dass der Wald im Vergleich zum Freiland über eine kühlere Oberfläche verfügt. Dies ist kein Effekt der Schattierung, sondern der Verdunstung, da vom Satelliten aus die Temperatur an der Kronenoberfläche registriert wird. Mit Thermalkameras lassen sich auch vom Boden aus Temperaturunterschiede sichtbar machen, die auf die unterschiedlichen Verdunstungsintensitäten zurückzuführen sind.

Die Vegetation ist zugleich Träger eines weiteren Prozesses zur Umsetzung der verfügbaren Sonnenenergie, in dem über die Photosynthese Biomasse aufgebaut wird. Die so gespeicherte Sonnenenergie wird später wieder freigesetzt, wenn die aufgebaute Biomasse mineralisiert wird – teilweise erst, nachdem sie eine ganze Nahrungskette (einschließlich der menschlichen Ernährung) angetrieben hat. Quantitativ bleibt der Energieumsatz des biologischen Prozesses jedoch deutlich hinter dem physikalischen Prozess von Verdunstung und Kondensation zurück.

Die beschriebenen Prozesse sind eng mit der Funktionalität der sich entwickelnden Ökosysteme verbunden. Über den biologischen Prozess wird langfristig über die tote organische Substanz (Detritus) auch Humus aufgebaut, der im Idealfall am Standort der Pflanze verbleibt und dort die

Wasserspeicherfähigkeit des Bodens verbessert. Damit steht z. B. dem Wald das Wasser auch in Trockenphasen im Sommer länger zur Verfügung.

Aus diesen grundlegenden Zusammenhängen wird abgeleitet, dass über die Beeinflussung des Landschaftswasserhaushaltes sowohl vorausschauend das Lokalklima verändert als auch die Nachhaltigkeit der Landnutzung gesteigert werden kann.

Analyse der Thermalbilder in Hessen

Um geeignete Maßnahmentypen für eine zukunftsorientierte Anpassung an den Klimawandel identifizieren zu können, bedarf es vorab der Klärung folgender grundlegender Fragen:

- Wie ist das Verteilungsmuster der Temperatur der Landoberfläche, d. h. die thermische Signatur der Landschaft, im Untersuchungsgebiet?
- Welche Variablen, oder Umweltparameter, beeinflussen die Temperatur der Landoberfläche im Wesentlichen?
- Welche Rolle spielt die Landnutzung, d. h. die Art der menschlichen Inanspruchnahme von Böden und Landflächen, für die Temperatur der Landoberfläche?

Die Suche nach den Stellschrauben hinter dem Verteilungsmuster der Temperatur der Landoberfläche führt also über das In-Verbindung-Bringen der thermischen Signatur der Landschaft mit dem Auftreten bestimmter Landnutzungen, wie z. B. Wald, Acker oder Siedlung.

Für einen Überblick über die thermische Signatur der Landoberfläche Hessens – und um diese dann mit der Landnutzung in Beziehung zu setzen – wählt diese Studie einen fernerkundlich-geoinformatischen Ansatz. In einem ersten Schritt erfolgt die Zusammenführung dutzender Thermal-Satellitenszenen aus den Vegetationsperioden der Sommermonate der Jahre 2013 bis 2017. Das Ziel der Verschmelzung dieser Daten ist die Schaffung repräsentativer, zeitpunktunabhängiger Mittelwerte, oder anders gesagt, die rechnerische Beseitigung von unerwarteten Extremwerten, so genannten Ausreißern.

In einem zweiten Schritt werden die Thermal-Daten aus Schritt 1 jenen Landnutzungen zugeordnet, mit denen sie sich räumlich überlagern. Die hierfür benötigten Informationen zur Landnutzung in Hessen stellt das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem ATKIS, ein digitales Landschaftsmodell (DLM), bereit.

Um die Suche nach Umweltparametern, die die Temperatur der Landoberfläche beeinflussen oder sogar steuern könnten, möglich zu machen, werden im Weiteren verschiedenste derartige Variablen (wie z. B. der Versiegelungsgrad der Landoberfläche, die Sonnenscheindauer oder die Grundwasserneubildungsrate) ebenfalls räumlich mit den ATKIS-Landnutzungsdaten verknüpft. Somit steht für weitere räumliche und statistische Analysen ein Datensatz mit ~1.55 Mio. Beobachtungen, jeweils mit mehr als zwei Dutzend Merkmalen versehen, zur Verfügung.

Bei Betrachtung der thermischen Signatur des Untersuchungsgebietes zeigt sich, dass Siedlungsgebiete immer zu den wärmsten Landnutzungen gehören und dass große Industrie- und Gewerbeflächen, selbst innerhalb der Siedlungen, Hot-Spots der Überwärmung darstellen. Auf der kühlen Seite

der Temperaturverteilung stehen die Wälder, Gewässersäume und Gehölze. Landwirtschaftlich genutztes Offenland vermittelt zwischen diesen Extremen, wobei Grünländer systematisch kühler erscheinen als Ackerflächen.

Die Suche nach temperatursteuernden Umweltparametern, mit Methoden der multivariaten Statistik, liefert schließlich Hinweise auf eine diesbezügliche Dominanz von Variablen, die durch *pflanzliche Transpiration*, unterstützt durch passive *Verdunstung* (Evaporation) von Wasser aus der Landschaft, charakterisiert sind.

Als mit der Temperatur der Landoberfläche am besten korrelierte Variable zeigt sich die *Kronendichte*, d. h. der flächenbezogene Baumkronenschluss. Im Weiteren stellen sich – mit in dieser Reihenfolge abnehmender Qualität – der Versiegelungsgrad der Landoberfläche, NDVI (ein Index für Pflanzenvitalität) und das pflanzenverfügbare Wasser im oberflächennahen Untergrund als geeignete Variablen für die Vorhersage der Oberflächentemperatur des Landes dar.

Von Maßnahmentypen zu Pilotprojekten

Die dargestellten Zusammenhänge münden in die Ableitung von Maßnahmentypen, die sowohl zum Rückhalt des Wassers in der Landschaft als auch zur nachfolgenden Verdunstung durch die Vegetation beitragen. Da diese Prozesse erst durch eine flächenhafte Ausprägung eine relevante Größenordnung erreichen, werden die Maßnahmentypen für ländliche und urbane Räume abgeleitet.

Anhand der Auswertung von Thermaldaten werden anschließend Suchräume abgeleitet, in denen Maßnahmen zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und Kleinklimas besonders angebracht sind. Hierzu werden die identifizierten Zusammenhänge zwischen den in Hessen beobachteten Oberflächentemperaturen und weiteren Parametern, wie der Dichte und Vitalität der Vegetation, genutzt. Das Ergebnis mehrerer Verschneidungen im GIS wird als Karte für Hessen dargestellt. Eine zusätzliche Betrachtung stellt die Region Rheingau-Taunus in den Mittelpunkt, für die die Ausweisung als Biosphärenregion diskutiert wird. Dem Ziel der Biosphärenregionen, beispielhaft das nachhaltige Miteinander von Mensch und Natur zu demonstrieren, könnte hier auch durch den besonderen Umgang mit dem Landschaftswasserhaushalt und Klima umgesetzt werden.

Im vorliegenden Bericht werden erste Vorschläge für Pilotprojekte dargestellt. Diese sollen schnell umsetzbar sein und über das Monitoring der Oberflächentemperaturen nachweislich Effekte hinsichtlich Verdunstung zeigen.

Der Bericht macht zudem Vorschläge für eine Kommunikationsstrategie, wie die dargestellten Zusammenhänge zwischen Landschaftswasserhaushalt und Klima den Akteuren und der Öffentlichkeit vermittelt werden könnten.

Schließlich werden identifizierte Wissensdefizite dargestellt, da die eingehende Bearbeitung des Themas eine Reihe von weitergehenden Fragen aufgeworfen hat, die für das Verständnis und die Umsetzung der Maßnahmen von großer Relevanz sind.

1 Einleitung und Veranlassung

Der Klimawandel zeichnet sich immer deutlicher ab. Rekordsommer, ausgeprägte Hitzeperioden und zeitweise ausbleibender Niederschlag wie im Sommer 2018 unterstreichen dies.

Mit dem Klimawandel sind erhebliche Risiken und Gefahren verbunden, etwa was die Wasserversorgung, mögliche Ernteauffälle und gesundheitliche Aspekte betrifft. Deshalb gibt es international breite Bündnisse, um sowohl dem Klimawandel etwas entgegen zu setzen (Begrenzung der Emissionen von klimawirksamen Gasen wie CO₂, 2°-Ziel) als auch zur Anpassung an den bereits erfolgten bzw. nicht mehr änderbaren Klimawandel.

Hessen hat sich deshalb ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt: bis 2050 will Hessen klimaneutral sein! Der dahin führende integrierte Klimaschutzplan Hessen 2025 (IKSP) wurde im Frühjahr 2017 vom Kabinett verabschiedet. Der IKSP bündelt 140 Maßnahmen für den Klimaschutz und die Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Von diesen Maßnahmen sind 42 Maßnahmen prioritär und sollen bis Ende 2019 begonnen werden.

Im Rahmen des IKSP wird ein „Handlungsbedarf Land- und Forstwirtschaft, Biodiversität“ formuliert. Diesem Handlungsbedarf sind Klimaanpassungsmaßnahmen zugeordnet, von denen einige als *prioritäre Maßnahme* gekennzeichnet sind.

Unter diesen prioritären Maßnahmen findet sich auch die Maßnahme L-19 „Landschaftswasserhaushalt unter Klimawandel stabilisieren“. Die Maßnahme L-19 hat zum Ziel, die Kühlfunktion der Landschaft zu verbessern. Zusätzliche positive Effekte bestehen in einer möglichen Verbesserung der Niederschlagsretention auf vegetationsbestandenen Flächen. Im Idealfall können dadurch Abflüsse gedämpft sowie Stoffauswaschungen und Erosion vermindert werden. Die Verbesserung der Kühlfunktion der Landschaft über ihren Wasserhaushalt stellt somit zugleich eine Steigerung der Nachhaltigkeit der Naturhaushaltsfunktionen dar.

Die Maßnahme L-19 besitzt somit einen integrativen, schutzgutübergreifenden Betrachtungsansatz. Die vertiefende fachliche Aufbereitung dieser integrativen Zusammenhänge und ihre beispielhafte Betrachtung in Hessen ist Gegenstand des vorliegenden Gutachtens.

Im März 2018 wurde das Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. in Finsterwalde (FIB) beauftragt, mit einem Grundsatzgutachten die Zusammenhänge zwischen Landschaftswasserhaushalt und Klima zu untersuchen und darzustellen.

Das Gutachten soll in einem ersten Schritt wissenschaftlich fundierte Belege für Zusammenhänge zwischen Landschaftswasserhaushalt und Klima zusammenstellen. Weiterhin sollen möglichst unaufwändige Wege des Nachweises der Funktionsfähigkeit des Landschaftswasserhaushaltes gefunden und diesbezügliche Datengrundlagen identifiziert werden. Grundlegende Anforderungen an ein integratives Naturschutzverständnis als Beitrag zum Klimaschutz und zur Anpassung an

den Klimawandel, das eine integrative Planung zur Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes einschließt, sollen herausgearbeitet werden.

Als weitere Angelpunkte des Grundsatzgutachtens wurden die Beschreibung von Handlungsfeldern in der Planung auf den verschiedenen Ebenen und die Beschreibung multifunktionaler Eigenschaften von Maßnahmentypen zur Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes für den Natur- und Umweltschutz vereinbart.

Geeignete Suchräume für identifizierte Maßnahmen sind für das Gebiet von Hessen zu finden und zu beschreiben. Hierzu sollen Vorschläge für Pilotprojekte zur beispielhaften Anwendung und fachlichen Vertiefung entsprechender Maßnahmentypen gemacht werden. Wissensdefizite zum Thema Landschaftswasserhaushalt und seiner Bedeutung für die Klimaanpassung sollen benannt, Vorschläge für Kommunikationsstrategien für die frühzeitige Einbindung betroffener Landnutzer unterbreitet und Synergien zu bereits laufenden Maßnahmen in Hessen gefunden werden.

Das vorliegende Dokument stellt eine abgestimmte Fassung des Berichtes dar.

2 Wechselwirkungen zwischen Landschaftswasserhaushalt und Klima

2.1 Einführung

Der Blick in die Erdgeschichte zeigt, dass sich das Klima immer wieder gewandelt hat (z. B. LISIECKI & RAYMO, 2005). Die aktuelle Dynamik des Klimawandels zeigt allerdings, dass der Einfluss des Menschen auf das Klima auf der globalen Skala gravierend geworden ist (ORESQUES, 2004; EEA, 2008; MASSON-DELMOTTE ET AL., 2018). Veränderungen im Wasserhaushalt, die z. B. mit Landnutzungsänderungen oder Drainagen einhergehen, spielen dabei eine wichtige Rolle (z. B. STERLING ET AL. (2013); BERNACCHI & VANLOCKE (2015)).

Ein Faktor, der wesentlichen Einfluss auf das Klima hat, ist das Wasser, genauer der Wasserkreislauf. Bevor diese Aspekte näher beleuchtet werden, ist klarzustellen, dass dies keineswegs der einzige Faktor ist, der das Klima beeinflusst. Die Freisetzung klimawirksamer Gase wie Kohlendioxid und Methan innerhalb der letzten 50-200 Jahre in erheblichen Größenordnungen ist so in der Erdgeschichte nicht bekannt. Dennoch fokussieren wir uns in diesem Bericht auf die Rolle des Wasserhaushaltes.

Im Folgenden werden die Wechselwirkungen zwischen Landschaftswasserhaushalt und Klima näher beleuchtet. Im Zentrum steht dabei die lokale Beeinflussung des Klimas durch die Verdunstung der Vegetation. Da die Höhe der Verdunstung von dem zur Verfügung stehenden Wasserangebot abhängt, rückt der verbesserte Rückhalt des Niederschlagswassers in der Fläche ebenfalls in den Fokus. Mit einer Verbesserung des Wasserrückhaltes sind wiederum weitere positive Effekte verbunden, wie die Verringerung der Stoffauswaschung und Erosion.“

2.2 Verdunstungsleistung und Rolle der Vegetation

Die Möglichkeiten der Pflanzen, Wasser zu verdunsten, sind unterschiedlich, aber wesentlich für ihren Beitrag zum kleinklimatischen Ausgleich.

Um ein Quantum Wasser zu verdunsten, muss von der Vegetation vergleichsweise viel Energie aufgenommen werden. Transpirierende Pflanzen können diese Verdunstungsenergie nur ihrer Umgebung entziehen – es entsteht ein lokales Energiedefizit. Pflanzliche Transpiration kann somit »Oasen der Kühle« schaffen, die 2 bis 8 Kelvin kühler sein können als ihre Umgebung (OKE, 2002). In Extremfällen kann es bei diesem Prozess sogar dazu kommen, dass der latente Wärmefluss groß genug wird, um den fühlbaren Wärmestrom negativ werden zu lassen und somit fühlbare Wärme aus der Umgebung in den transpirierenden Pflanzenbestand zu leiten (FLOHN, 1971). In eher moderaten Kühle-Oasen-Settings sind für den fühlbaren Wärmestrom, im Sommer und zur

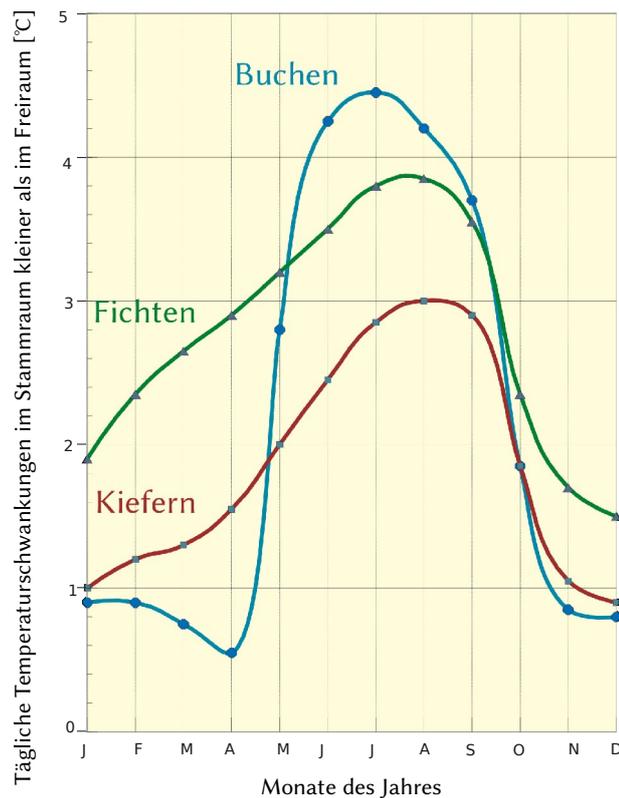


Abbildung 2.1: Charakterkurven der Holzarten nach MÜTTRICH (1890). Die Darstellung geht auf die Auswertung der forstlichen Doppelstationen zurück, in denen das Klima sowohl im Wald als auch in einer benachbarten Freilandstation gemessen wurde. Der Abbildung liegen die Unterschiede in den täglichen Temperaturschwankungen zugrunde; ein hoher Wert drückt aus, dass die Temperatur im Wald deutlich gedämpfter als im Freiland verläuft.

Mittagsstunde, Werte von mehreren 10^2 W m^{-2} festgestellt worden¹.

Selbstverständlich gibt es auch Pflanzen, die an trockenere Standorte oder das Auftreten von Trockenphasen angepasst sind und die Strategien entwickelt haben, um verfügbares Wasser zu akkumulieren oder ihre Transpiration einzuschränken. Viele Pflanzen von Trockenstandorten besitzen z. B. Wachsüberzüge, um die Verdunstung nur eingeschränkt zuzulassen – was aber oft mit einer verringerten Produktivität einher geht. Andere Pflanzen, die sonst durchaus viel Wasser verdunsten, schließen die Stomata bei Wassermangel und sorgen so dafür, dass sie selbst keinen Schaden nehmen, solange es nur eine vorübergehende Trockenheit ist. Nadelbäume wie die Kiefer etwa können unter Trockenstress die Stomata nicht / nur eingeschränkt schließen, so dass sie sich bei längerer Trockenheit nicht nur erwärmen, sondern auch selbst Schaden nehmen. Unter fortschreitendem Klimawandel wird diese Art deshalb an Bedeutung in der Forstwirtschaft verlieren.

Die Transpiration der verschiedenen Pflanzen und Pflanzengesellschaften unterscheidet sich voneinander. Einerseits durch die physiologischen Unterschiede der Arten, andererseits durch die Anpassung an trockenere oder feuchtere bis hin zu nassen Standorten. Wälder weisen meist

¹Beispielsweise 400 W m^{-2} in GAY & STEWART (1974), ca. 200 W m^{-2} in McNAUGHTON & BLACK (1973)

eine höhere Transpirationsleistung als Offenland wie Weiden und Äcker auf. Gerade auf Ackerflächen gibt es zudem Phasen ohne Vegetationsbedeckung oder mit nur sehr jungen Pflanzen, wo die Transpiration noch gar nicht so hoch sein kann. Aber auch die Baumarten lassen sich differenzieren. Bereits MÜTTRICH (1890) zeigte mit den Charakterkurven der Holzarten, dass der Temperaturunterschied zwischen Wald und Freiland bei Kiefer, Fichte und Buche im Jahresverlauf unterschiedlich ist (Abb. 2.1). Während die Buche im unbelaubten Zustand deutlich weniger Einfluss auf die Temperatur als die Nadelbäume aufweist, kehrt sich dies im Sommer, wenn es auf die Kühlfunktion der Vegetation ankommt, um: dann sind die Buchen deutlich kühler als Fichten und erst recht als Kiefern.

Wie entscheidend die Verdunstung für das lokale Klima ist, soll anhand der Strahlungsbilanz verdeutlicht werden. Die Strahlung von der Sonne auf die Erde hängt zunächst vom Breitengrad ab, für Hessen sind dies oberhalb der Atmosphäre etwa 2515 kWh/m^2 . Ein Teil dieser Energie wird bereits in der Atmosphäre reflektiert oder absorbiert. So gelangt nur ein kleinerer Teil als Globalstrahlung bis an die Landoberfläche. Am Beispiel der Klimastation Geisenheim des DWD lässt sich anhand der dort gemessenen Sonnenscheindauer die Globalstrahlung auf etwa $1022 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ abschätzen². Die Verdunstung verschiedener Landoberflächen (Abb. 2.2) kann nun anhand üblicher Verfahren (ALLEN ET AL., 1998, Penman-Monteith equ.) mittels der täglich gemessenen Werte der Klimastation berechnet werden, so wie dies auch in hydrologischen Modellen und Parametrisierungen erfolgt (NEITSCH ET AL., 2002; SCHULLA & JASPER, 2000; BRONSTERT ET AL., 2001).

Da für die Verdunstung von einem Liter Wasser jeweils 691 Wh Energie benötigt werden, lässt sich diese so genannte latente Wärme durch die benötigte Verdunstungsenergie darstellen. Mit zu berücksichtigen ist auch die in die gesamte Primärproduktion der Pflanzen eingehende Energie. Die Bruttoprimaryenergie beträgt nach Literaturwerten (ODUM, 1983; LARCHER, 1994; HOFMANN ET AL., 1985; ELLENBERG & LEUSCHNER, 2010) in Abhängigkeit von den verschiedenen Landnutzungen und Standorten jedoch nur bis zu etwa 2 % der Globalstrahlung. Die dann noch verbleibende Energie führt zunächst zur Erwärmung der Oberflächen und schließlich sowohl der darüber befindlichen Luftsäule als auch des darunter liegenden Bodens.

Die Ergebnisse einer solchen exemplarischen Berechnung sind in Abb. 2.2 auf der Grundlage der oben dargestellten Klimadaten dargestellt³. Die Daten zeigen eine deutliche Differenzierung zwischen den Landnutzungen, auch wenn diese je nach Ausprägung in einer gewissen Spannbreite variieren werden. Die Änderung der Landnutzung oder auch die Reduzierung der Wasserverfügbarkeit für die Vegetation (z. B. Umwandlung von Feucht- zu Trockenwald) hat demnach erhebliche Folgen für die lokale Lufttemperatur.

Demnach verdunstet der Wald etwa 86 mm mehr Wasser als die landwirtschaftliche Fläche (entsprechend den Anteilen an Laub- und Nadelholz bzw. Acker und Grünland in Hessen), d. h. rund 21 % mehr als auf der landwirtschaftlichen Fläche. Wären die landwirtschaftlichen Flächen

²Grundlage der folgenden Abschätzungen sind die Klimadaten des DWD für die Station 1580 Geisenheim; für die Berechnungen wurden die Daten von 1951 bis 2018 zugrunde gelegt.

³Für die Berechnung wurde eine ebene Fläche angenommen mit einem sandigen Lehm als Boden, der eine Feldkapazität von etwa 33 % und eine nutzbare Feldkapazität von etwa 16 % besitzt. Die Station Geisenheim liegt in etwa 110 m NHN Höhe.

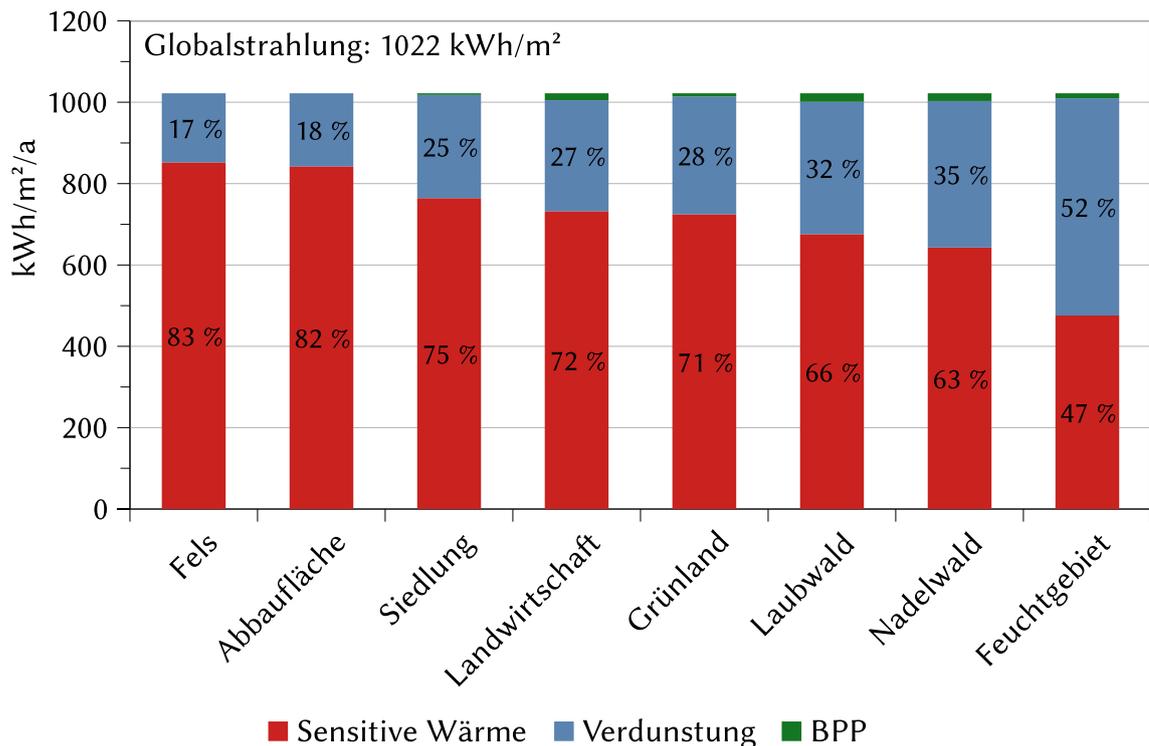


Abbildung 2.2: Exemplarische Abschätzung der Aufteilung der Globalstrahlung in Bruttoprimärproduktion (BPP), sensitive (F) und latente (L) Wärme. Zugrunde gelegt sind die Klimadaten der DWD-Station Geisenheim von 1951 bis 2018 sowie Paramterisierungen der Landnutzung nach BRONSTERT ET AL. (2001).

ebenfalls mit Wald bedeckt, so würden (auf der Grundlage der Berechnungen für Geisenheim, die nicht repräsentativ für ganz Hessen sind) knapp 10 % mehr Wasser verdunstet, entsprechend etwa 15,7 % des Jahresniederschlages. Wie stark sich diese Unterschiede auf die Oberflächentemperatur auswirken, wird bei der Auswertung der Thermaldaten belegt (Kap. 3).

Die Pflanzen wachsen dort, wo die Standortbedingungen für sie akzeptabel sind. Zugleich verändern sie die Standorte aber auch. Mit dem abgeworfenen Laub und anderen Pflanzenresten, wie verrottenden Wurzeln, verändert sich der Boden. In diesem Fall verbessert die Pflanze ihren Standort auf lange Sicht hin selbst, weil ihr so bei Trockenheit länger Wasser zur Verfügung steht (z. B. SHEIL, 2014). Mit der Veränderung der Standorte durch die Bildung von Humus wird nicht nur der Wasserhaushalt, sondern auch der Stoffhaushalt verändert, da so auch Nährstoffe im Boden gehalten werden.

2.3 Nachhaltigkeit – Einfluss auf den Stoffhaushalt

Neben den Kreisprozessen des Wassers (Verdunstung - Kondensation, Biomasseauf- und abbau) finden auch gerichtete Stoffausträge mit dem Wasserfluss statt, die die Nachhaltigkeit der Standorte verringern.

Das dynamische Medium Wasser ist Grundlage für weitere Prozesse, in denen Sonnenenergie

umgesetzt wird, sowohl im Zusammenhang mit dem Aufbau von Biomasse durch die Vegetation als auch mit der Lösung von Stoffen in den Böden der Einzugsgebiete. Dies macht deutlich, dass eine übergreifende Betrachtung der Prozesse erforderlich ist - die allesamt etwas mit dem Wasser zu tun haben. Deshalb kann auch von den Prozesseigenschaften des Wassers gesprochen werden.

Der quantitativ bedeutsamste Prozess ist der bereits vorgestellte Wasserkreislauf, bei dem das Wasser in einem Kreisprozess unterschiedliche Zustände (flüssig, gasförmig) annimmt und dabei die Sonnenenergie speichert bzw. räumlich und zeitlich verschoben wieder freisetzt.

Auf den *biologischen* Prozess wurde bereits hingewiesen. Bei der Photosynthese wird Wasser aufgespalten, um so zusammen mit Kohlendioxid neue, komplexere Moleküle zu bilden. Dabei wird ebenfalls Sonnenenergie gespeichert, die zu einem späteren Zeitpunkt bei der Mineralisation wieder freigesetzt wird. In vielen Fällen ist dies ein sehr kleinräumiger Prozess, weil die gebildete Blattmasse wie bei einem Baum überwiegend am Standort verbleibt. Nur dort, wo Wind, Wasser, Tiere oder der Mensch die Biomasse transportiert, findet der Abbau an einem anderen Ort statt.

Die Auswaschung von Nähr- und Mineralstoffen aus dem Boden ist wiederum mit dem Wasserkreislauf und den biologischen Prozessen eng verknüpft. Bei der Auswaschung können Nährstoffe und basisch wirkende Kationen (z. B. Ca^{2+} , Mg^{2+}) in von der Vegetation nicht nutzbare tiefere Bodenschichten oder in die Fließgewässer gelangen (z. B. BORMANN & LIKENS, 1967; LIKENS ET AL., 1978; RIPL & HILDMANN, 2000; PROCHÁZKA ET AL., 2019). Den Zusammenhang zwischen Stoffausträgen und Landnutzungsänderungen in den Einzugsgebieten belegen Untersuchungen von LIKENS ET AL. (1978). Sie zeigen die Zunahme der Stoffauswaschungen nach der Abholzung des Waldes in einem Einzugsgebiet, was auf die Erhöhung der Bodentemperatur und den damit verbundenen rascheren Abbau organischer Substanz durch die Mikroorganismen sowie dem Fehlen von Vegetation, die diese Nährstoffe aufnimmt, bedingt ist. Ebenso weisen diese Untersuchungen die erneute Abnahme der Stoffausträge mit der Wiederentwicklung des Waldes nach.

Die Natur kann hier als **funktionales Vorbild** verstanden werden. Die Vegetation, wie die natürlichen und naturnahen Wälder, nehmen dabei eine Schlüsselstellung für die Steuerung des Wasser- und Stoffhaushaltes ein. Durch ihre im Vergleich hohe Verdunstungsleistung sind die Temperaturen in den Wäldern auch besonders gut ausgeglichen. Zugleich können Waldböden für die Niederschlagsretention von Bedeutung sein, da sie häufig eine hohe Infiltrations- und Speicherkapazität (organische Auflage, natürlich gelagerter Bodenaufbau, weniger Verdichtung) besitzen und dadurch abflusssdämpfend wirken können. Je nach Untergrund, auf dem sich ein Boden entwickelt, übt der Waldboden – gleich einem Schwamm – eine mehr oder weniger starke Wirkung auf die Wasserspeicherkapazität und auf die Abflusssdämpfung aus. Auf das zudem mit zunehmender Waldreife steigende Stoffrückhaltevermögen wurde oben bereits eingegangen.

Werden an einem Standort kontinuierlich die für die Vegetation notwendigen Nährstoffe und basisch wirkenden Kationen ausgewaschen und es findet kein entsprechender Ersatz statt, so verarmt der Standort. Die leicht löslichen Stoffe, wie Calcium, Kalium, Magnesium und Stickstoff werden zuerst ausgewaschen; zurück bleiben die weniger löslichen, für die Pflanze unbrauchbaren Stoffe, deren Gehalte anteilig durch den Verlust der löslichen Stoffe zunehmen (RIPL & HILDMANN, 2000). Neben natürlichen nährstoffarmen Standorten finden sich derart verarmte Standorte als

Ergebnis einer langen Übernutzung, etwa unter Heide. Teilweise sind diese nur noch wenig ertragreichen Standorte auch mit einem schwach wüchsigen Wald bestockt (RIEK, 2009). Solche Standorte können immer weniger die gewünschten Leistungen des Ökosystems erfüllen, wie die Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe oder lokale Abkühlung.

2.4 Rückkopplung in die Landschaftsebene

Rückhalt und Verdunstung von Wasser in der Landschaft beeinflussen ihrerseits das regionale Klima.

2.4.1 Lokalklimatische Rückwirkungen durch große, zusammenhängende Waldgebiete

Das Phänomen der Niederschlagsverringerung in Regionen, die in Windrichtung zu großflächigen Waldrodungen liegen, wurde in der Wissenschaft beschrieben (z. B. SWANN ET AL., 2018). In ihren Berechnungen führt die großflächige Rodung von Wäldern im Westen Nordamerikas durch die veränderte Verdunstung zu Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation, die wiederum das Klima des weiter östlich liegenden Teils des Kontinents verändern. Für den Effekt spielt nicht nur die Fläche des gerodeten Waldes, sondern auch dessen Lage eine wichtige Rolle. Verschiedene Ursachen werden hierbei für die zu beobachtende Rückwirkung des Waldes auf regionale Niederschlagsereignisse diskutiert, die vorliegend aber nicht vertieft werden; z. B. die Erhöhung der Windgeschwindigkeit nach der Abholzung, kondensationsbedingte Tiefdruckgebiete über ausgedehnten Wäldern (z. B. SHEIL, 2018) oder z. B. Aerosolbildung durch Pollen, Pilzsporen, Bakterien oder Flechten (z. B. MORRIS ET AL., 2013).

2.4.2 Lokalklimatische Effekte von Gehölzflächen in der Landschaft

Agrargehölze wie Hecken bremsen den bodennahen Wind und modifizieren so das bodennahe Lokalklima (STEUBING, 1952; CABORN, 1957; CLEUGH, 1998; FOEREID ET AL., 2002; BÖHM ET AL., 2014; KANZLER ET AL., 2015, 2017). Im Lee ist der Boden feuchter und die Evaporation vermindert (STEUBING, 1952, 1962; STEUBING & BÄTJER, 1963; KANZLER ET AL., 2017). Hecken reduzieren auch die Bodenerosion durch Wasser und Wind. In ihrem Schatten wird zudem die Schneeschmelze verzögert. Der Ertrag der Kulturpflanzen ist in der direkten Nachbarschaft zum Gehölz zwar verringert, jedoch stehen dem insgesamt in der Regel überdurchschnittliche Erträge gegenüber (NUBERG, 1998).

Wie stark die jeweiligen Effekte sind, hängt wesentlich von den standörtlichen Gegebenheiten ab. Die größten windreduzierenden Effekte sind quer zur Hauptwindrichtung zu erwarten (STEUBING, 1952; QUINKENSTEIN ET AL., 2008). Die Fernwirkung der Hecken auf die in Lee liegenden Flächen ist abhängig von der Höhe der Hecken (NUBERG, 1998). Eine wichtige Rolle spielt auch die Durchlässigkeit der Heckenstrukturen, wobei sich Hecken, die einen Teil des Windes durchlassen, besonders bewährt haben (STEUBING, 1952; FOEREID ET AL., 2002).

2.4.3 Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte und Klima

SENEVIRATNE ET AL. (2010) geben einen umfassenden Überblick zu Bodenfeuchte-Klima-Interaktionen unter Berücksichtigung von Klimaänderungen. Die Bodenfeuchte kann Niederschlags- und Strahlungsanomalien abfedern, was wichtig für ein möglichst ausgeglichenes Klima ist. Der sehr energieintensive Prozess der Evapotranspiration wird als Wasser- und Energiestrom beschrieben, bei dem die Bodenfeuchte als Speichermedium des Wassers eine zentrale Funktion besitzt. Auf das Erfordernis systematischer wissenschaftlicher Untersuchungen auf diesem Gebiet wird ausdrücklich hingewiesen.

Von Interesse sind in diesem Zusammenhang die Modellierungen von FISCHER ET AL. (2007). Sie hatten zum Ziel, physikalische Land-Atmosphäre-Interaktionen für den Rekordsommer 2003 zu modellieren. Die Modellierungsergebnisse deuten darauf hin, dass bereits auf der mitteleuropäischen Skala ein Mangel an Bodenfeuchte die Kühlung erheblich verringern und eine Hitzewelle somit verstärken kann.

2.5 Steuerung des Landschaftswasserhaushalts als Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel

Um ausgleichend auf das lokale Klima über den Landschaftswasserhaushalt einwirken zu können, muss möglichst großflächig sowohl Niederschlagswasser zurückgehalten als auch wieder verdunstet werden.

Möglichst großflächige Begrünung ist nicht als Ersatz für die Minderung klimawirksamer Gase zu sehen, sondern sollen diese im Sinne einer Anpassungsmaßnahme flankieren. Zugleich zeichnen sich eine Reihe von Synergien ab, etwa zur Steigerung der Nachhaltigkeit, beim Hochwasserschutz oder beim Naturschutz (vgl. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 2012; ELLISON ET AL., 2012; BERNACCHI & VANLOOCKE, 2015).

Für einen kleinklimatischen Ausgleich ist zweierlei erforderlich,

1. der dezentrale Rückhalt des Niederschlagswassers auf möglichst großer Fläche im Wassereinzugsgebiet und
2. eine Struktur, die dieses Wasser wieder verdunstet, also eine geeignete Vegetation, ebenfalls auf möglichst großer Fläche.

Auf den Rückhalt des Wassers kann über eine Reihe von Maßnahmen Einfluss genommen werden (Kap. 5). Notwendig ist der Rückhalt des Wassers

- möglichst weit oben im Einzugsgebiet und
- möglichst auf der gesamten Fläche des unbesiedelten und besiedelten Einzugsgebietes.

Der Wasserrückhalt auf der Fläche ist erforderlich, da die Verdunstung ein flächenbasierter Prozess ist, d. h. erst eine große verdunstungsaktive Oberfläche führt auch zu einer hohen Verdunstungsleistung. Im Laufe der Sukzession nimmt diese zu, in dem eine große Blattoberfläche gebildet wird, die mit den Gehölzen und Bäumen die dritte Dimension, die Höhe, immer weiter ausreizt

und, wie das Beispiel eines geschlossenen Buchenschirmes zeigt, das verfügbare Licht weitgehend nutzt (MEYER & SCHMIDT, 2008, darin auch HEINKEN (1995); WECKESSER (2003)). Auf der Skala der Landschaft kann die Verdunstung dann über den Anteil geeigneter Vegetation gesteigert werden.

Auch dort, wo Wasser dem Relief folgend entlang fließt, kann angesetzt werden, etwa in dem quer zum Hang verlaufende Gehölzreihen oder die landwirtschaftliche Bearbeitung quer zum Hang in Streifen (contour farming) genutzt werden, den Wasserfluss dort abzubremsen und es in den Oberboden zu infiltrieren. In kleinen Talfalten, wo Wasser zusammenläuft, kann dies z. B. über Muldenspeicher zurückgehalten werden. Gewässerrenaturierungen, die durch Mäander zu längeren Fließwegen führen oder das Wasser durch eine stärkere Varianz der Gewässerprofile abbremsen, haben ebenfalls einen positiven Effekt.

Die Renaturierung von Feuchtgebieten setzt sowohl am Wasserrückhalt als auch an der Vegetation an, da sich letztere mit der Veränderung des Wasserhaushaltes meist auch ändert.

Gezieltes Einbringen von mehr Gehölzen trägt ebenfalls dazu bei, über mehr Transpiration die Luft lokal abzukühlen. Dies kann z. B. mit der Neuanlage von Hecken, Baumreihen oder gliedernden Feldgehölzen erfolgen. Anstelle von Hecken können auch Streifen von Kurzumtriebsholz angelegt werden, die zugleich eine wirtschaftliche Nutzung ermöglichen. Weitere Ansätze, wie die Produktion von Obst, Nüssen oder Wertholz sind unter dem Begriff *Agroforstwirtschaft* beschrieben worden.

Bevor das Wasser die Fließgewässer erreicht, können anstelle herkömmlicher Gewässerrandstreifen diese auch als „Fangsysteme“ ausgestaltet werden: Mit Hilfe von feuchtigkeitsliebender, stark verdunstender Vegetation wie Schilf oder Weiden werden die im Wasser noch befindlichen Nährstoffe und basisch wirkenden Kationen abgereichert, so dass die Qualität des Fließgewässers verbessert wird. Zugleich kann die dort produzierte Biomasse genutzt werden.

Die Überführung dieses Ansatz in konkrete Maßnahmentypen, so wie sie in Hessen verwendet werden können, ist in Kap. 5.1 dargestellt.

2.6 Indikatoren zur Bestimmung der Überwärmung und der Nachhaltigkeit

Die Oberflächentemperaturen können als Indikator für die Fähigkeit der Landschaft dienen, Niederschläge zu speichern und zu verdunsten sowie gelöste Stoffe zurück zu halten.

Um Aussagen zur Fähigkeit der Landschaft zur Dämpfung der Temperaturen und zum Rückhalt der begrenzt vorhandenen Stoffe treffen zu können, ist die Messung der Temperaturen in einzelnen Landschaftsausschnitten möglich. Dies lässt relative Aussagen im Vergleich zu anderen Landschaftsausschnitten zu.

Die Messung von Temperaturen kann mit verschiedenen Methoden erfolgen, auch abhängig von den später abzuleitenden Aussagen. So geben kleinräumige Temperaturmessungen zwar ein sehr genaues Bild über die Temperaturverläufe an diesen Standorten und lassen damit auch Aussagen im relativen Vergleich zu anderen Standorten zu. Ein Beispiel ist die zeitlich hoch auflösende Erfassung

im Einzugsgebiet der Stör (Schleswig-Holstein), die deutliche Unterschiede z. B. zwischen einem Buchenwald und einem Ackerrand aufweist (HILDMANN, 1999).

Eine flächendeckende Aussage lässt sich damit jedoch nicht ableiten. Hierfür eignen sich bildgebende Verfahren, mit denen auch größere Landschaftsausschnitte erfasst werden können. Satelliten wie die der Landsat-Serie besitzen einen (bzw. aktuell zwei) Thermalkanäle, mit denen die Oberflächentemperatur erfasst werden kann. Hiermit sind auch großräumige Aussagen möglich, wie im Kap. 3 für Hessen ausführlich demonstriert wird. Einschränkend ist festzustellen, dass der Zeitpunkt des Überflugs des Landsat-Satelliten mit etwa 10:00 Uhr nicht optimal ist; hier differenzierte eine Erfassung nach der Mittagsstunde (13 Uhr Ortszeit) wohl deutlicher. Ein Nachteil der großräumigen Erfassung besteht in der beschränkten räumlichen Auflösung von 100 m⁴, wenngleich sich die Landschaftsstruktur deutlich erkennen lässt (Abb. 3.1).

Da alle 16 Tage ein Überflug des Landsat stattfindet, können damit auch Veränderungen verfolgt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der Wolkenbedeckung nicht alle Szenen für eine Auswertung geeignet sind und dass für eine fundierte Aussage jeweils mehrere Aufnahmen erforderlich sind (multitemporaler Ansatz, Kap. 3.1.1). Mit diesen Einschränkungen ist es durchaus möglich, zeitliche Veränderungen in den Verteilungen zu erfassen und damit den Effekt von Maßnahmen, wie z.B. die Wiedervernässung von Flächen (Kap. 5) zu dokumentieren. In dem genannten Beispiel wäre zu erwarten, dass die wiedervernässte Fläche eine kühlere Signatur aufweist als eine unveränderte, trockene Fläche. Bei sehr kleinteiligen Maßnahmen, die auf Flächen mit einem Durchmesser unter 100 m erfolgen, ist die Auflösung des Landsat nicht ohne weiteres ausreichend. Hier könnten feiner auflösende Systeme, wie etwa Flugzeug- oder Drohnenüberflüge besser geeignet sein. In beiden Fällen kann die thermische Information Hinweise auf die Wirksamkeit der Maßnahmen geben.

⁴Die Sensoren der Thermalkanäle erfassen Pixel mit einer Kantenlänge von 100 m. Bei den verfügbaren Daten sind diese auf Pixelgröße der monochromatischen Kanäle von 30 m Auflösung umgerechnet.

3 Hessen im Thermalbild

3.1 Thermaldaten der Landoberfläche

Aus der räumlichen Verteilung der Oberflächentemperatur in der Landschaft (T_{Land}) ergibt sich ein Muster, hier im Weiteren *thermische Signatur* der Landschaft genannt. Die thermische Signatur hängt von der Niederschlagsmenge ab, von der orographischen Lage (Bergkuppe oder Tal), von der Bodenbeschaffenheit und von der Bodenoberfläche, insbesondere vom Versiegelungsgrad und der Vegetationsbedeckung. Sind alle anderen Faktoren gleich, dann steuern die Versiegelung und die Vegetationsbedeckung die thermische Signatur einer Fläche.

In Bezug auf das Ziel der Identifizierung von Suchräumen sowie die Benennung von Maßnahmentypen zur Beeinflussung von T_{Land} im Rahmen einer gesellschaftlichen Anpassung an den Klimawandel, stellt sich zuerst die grundlegende Frage »Wo ist Landschaft gut gekühlt, wo ist sie überwärmt?« Die leitende Hypothese hierzu unterstellt, dass die Temperatur der Landoberfläche, insbesondere in intensiv genutzten Landschaften, eine Funktion der Landnutzung ist. Zum Beispiel wird ein dunkel asphaltierter Parkplatz im verdichteten Siedlungsgebiet von Wiesbaden, am Tage bei Strahlungswetter, mit höchster Wahrscheinlichkeit wärmer sein als ein vegetationsumsäumter Altarm der Rheinebene im Hessischen Ried.

Sind derartige Temperaturunterschiede im Untersuchungsgebiet systematisch? Wenn ja – sind sie quantifizierbar und welcher Informationsgewinn im Sinne der Zielsetzung kann aus den zugrundeliegenden Daten abgeleitet werden? Informationen über die Ausprägung und die Unterschiede von T_{Land} zwischen verschiedenen Landschaftsbereichen sollten Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden Prozesse erlauben, die die Ausprägung von T_{Land} steuern. Ein Ziel dieser Studie ist es also, Unterschiede in der Ausprägungen von T_{Land} systematisch Unterschieden in der (den Landschaftswasserhaushalt beeinflussenden) Ausstattung der Landoberfläche zuzuordnen, um konkrete Handlungsempfehlungen zur Beeinflussung von T_{Land} geben zu können.

3.1.1 Amalgamierte Thermaldaten mehrerer Vegetationsperioden

Die Erfassung der räumlichen Verteilung der Temperatur der Landoberfläche (T_{Land})¹ erfolgte im Rahmen dieser Studie über Methoden der Satellitenfernerkundung. Als Landoberfläche ist in diesem Zusammenhang der jeweils höchste Punkt in der Landschaft zu verstehen, der vom satellitengestützten Sensor gesehen werden kann. Das können z. B. Kronenflächen von Wäldern, Gewässeroberflächen, Ackerflächen, Grünländer, Gebäudedächer oder Parkplätze sein. Objekte resp. Landnutzungen, die flächenmäßig unter der Auflösung der verwendeten Satellitenbilder liegen – das wären z. B. Schornsteine, Leitungsmasten, Klimaanlage oder einzelne Baumkronen –

¹ T_{Land} ist die tatsächliche Temperatur der für den Satelliten sichtbaren Oberfläche, d.h. nicht zu verwechseln mit der bodennahen Lufttemperatur. Letztere wird standardmäßig in 2 m Höhe und immer im Schatten gemessen.

können als solche nicht aus den reinen Thermaldaten identifiziert werden. Linienhafte Elemente wie Autobahnen und Flüsse hingegen werden in den Thermaldaten gut abgebildet.

Zur Ableitung der Temperatur der Landoberfläche verlässt sich diese Studie auf passiv erhobene Spektraldaten des Landsat-8-Systems der NASA. Seit Februar 2013 im Orbit, überfliegt das System jeden Punkt der Erde mit 16-tägiger Wiederholrate. Im Sinne der hier präsentierten Forschung ist das Landsat-8-Setup aus heutiger Sicht besonders geeignet, da (i) eine junge Zeitreihe mehrerer Vegetationsperioden vorliegt, (ii) die räumliche Auflösung der Rasterdaten bei 30 m liegt und damit Erscheinungen der Landoberfläche besonders im ländlichen Raum gut abgebildet werden und (iii) die Daten kostenlos und frei zugänglich verfügbar sind (Details in Abschnitt 10.1). Schon in wenigen Jahren wird es möglich sein, sich auch auf Sentinel-Daten des EU-Copernicus-Programmes zu stützen. Mehrjährige Zeitreihen dieser Systeme sollten dann vorliegen.

Um thermalen Ausreißern, d. h. episodischen Phänomenen in der Ausprägung von T_{Land} Gewicht zu nehmen, wurden die Thermalbänder aus mehreren Dutzend Landsat-8-Szenen – durch Übereinanderlegen (Abb. 10.1 im Anhang) – zu einem mehrjährigen Median-Komposit amalgamiert, d. h. verschmolzen (Abb. 3.1)². Die verwendeten Satellitenaufnahmen stammen jeweils nur aus dem Zeitraum Ende Mai bis Ende September, d. h. aus dem produktiven Monaten des Vegetationshalbjahres der gemäßigten Breiten Mitteleuropas.

Da nicht für jeden Überflugtermin des Satelliten hessenweit brauchbare Bilddaten vorliegen, ist *auf Landesebene keine Betrachtung absoluter Temperaturen machbar und sinnvoll*. Die *relative* Verteilung von Oberflächentemperaturen im hessischen Landesgebiet sollte aber im Laufe der Zeit nicht grundlegend variieren. Es wurde daher ein Thermal-Komposit-Raster für ganz Hessen erstellt, in dem T_{Land} nach seiner Verteilung klassifiziert wurde. Dieses Komposit-Raster wurde in 20 non-äquidistante Thermal-Klassen unterteilt, d. h. das obere und untere Ende der Verteilung wurden gestreckt, wobei die Klasse 20 für «extrem warm» (>99,99 % der Verteilung) und die Klasse 1 für «extrem kühl» stehen (Details siehe Anhang 10.1, dort Tabelle 10.1; siehe auch Abb. 3.1).

3.1.2 Höhenintervalle

Ein weiteres Hemmnis bei der Betrachtung hessenweit amalgamierter Thermaldaten ergibt sich durch die Physik der Atmosphäre, die eine grundsätzliche Temperaturabnahme mit der Höhe (BARRY, 2008) bedingt. Bei der Gesamtbetrachtung Hessens werden also höhere Lagen durchschnittlich immer kühler sein als tiefe Lagen. So würden zum Beispiel die in Abb. 3.1 B in violett dargestellten Bereiche bei Extraktion aus dem Gesamtraster vorwiegend mittlere Temperaturklassen repräsentieren, da sie sich, hessenweit gesehen, am Übergang von warm zu kalt befinden.

Der Gesamtdatensatz wurde deshalb in 50-m-Höhenintervalle unterteilt, innerhalb derer der genannte Höheneffekt vernachlässigbar klein wird (Abb. 10.5, Anhang). Höhenbereiche über 500 m ü. NN fanden keine weitere Beachtung, da 95% der Landesfläche Hessens unter 500 m liegen (Abb. 10.4, Anhang) und da die Anzahl der verfügbaren Beobachtungen mit der Höhe extrem sinkt.

²Qualitätsstandards, technische Beschreibung der Daten und des Aggregationsverfahrens siehe Anhang 10.1.

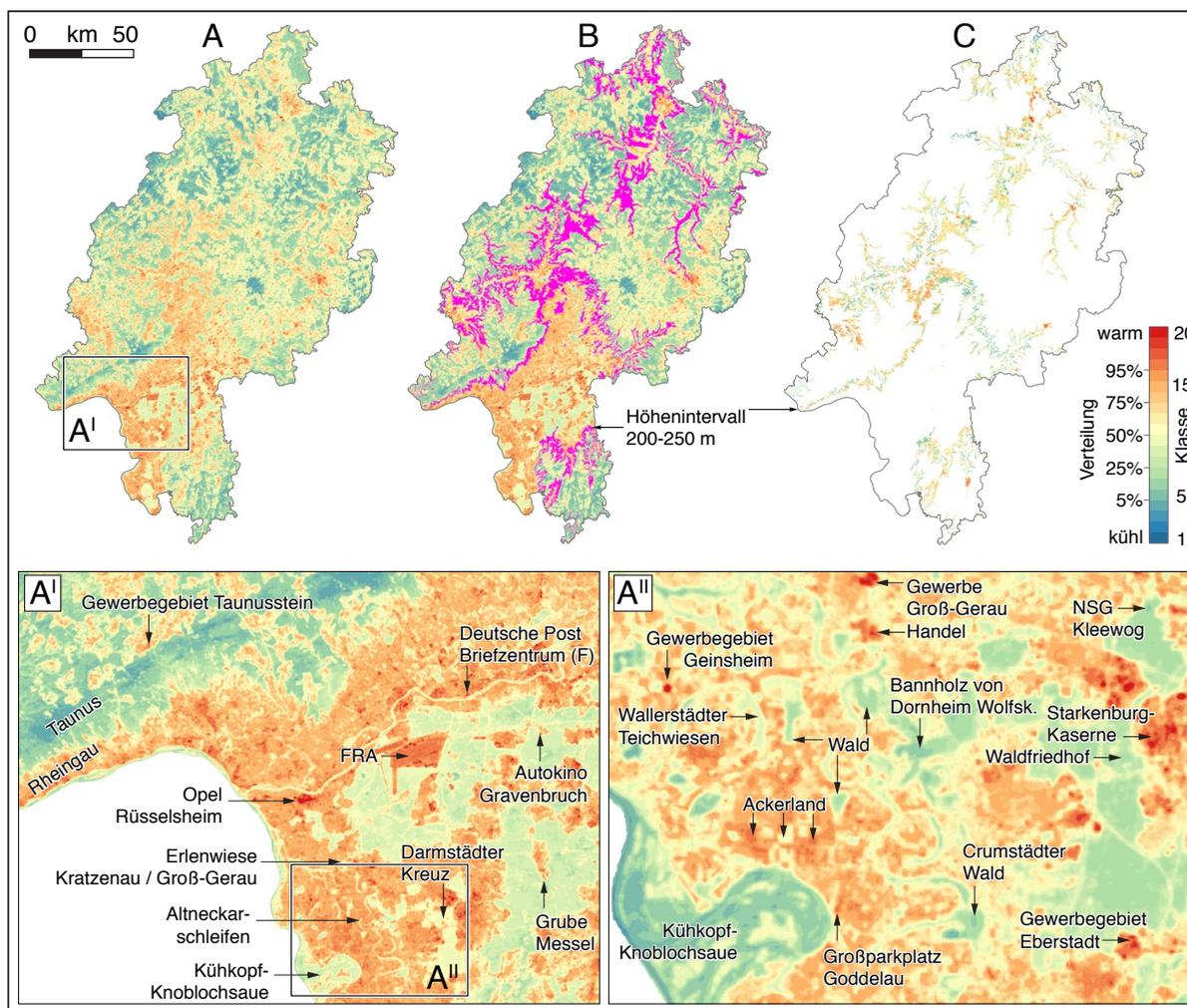


Abbildung 3.1: Hessen im Thermalbild. Karte (A) ist ein Raster-Komposit von T_{Land} für Hessen (technische Beschreibung siehe Anhang 10.1). Gezeigt wird nicht die abs. Temperatur, sondern ihre Verteilung nach Perzentilen (z. B. stehen blaue Bereiche für die kühlest 5 Prozent aller Pixel). Detailkarte (A') zeigt einen Ausschnitt aus (A) mit Beispielen zur räumlichen Auflösung und Differenzierbarkeit der Daten, die von Gebirgsstrukturen (z. B. Taunus) bis hin zu Autokinos (Gravenbruch) oder gar reliktschen Flussmäandern reicht. Detailkarte (A'') zeigt ein Close-Up aus dem Bereich (A'), diesmal allerdings nicht aus dem Gesamt-Komposit, sondern aus den separat gerechneten Höhen-Intervallen <100 m und $100-150$ m. Wichtig: Das räumliche Muster von T_{Land} hat sich durch die separate Berechnung nicht geändert (kühle Landschaftsbereiche sind noch immer kühl etc.) wohl aber die Spreizung der Daten. (B) zeigt exemplarisch das Höhenintervall 200-250 m (violett), Karte (C) zeigt das Höhenintervall aus (B) als separat gerechnetes, d. h. nicht nur aus (A) extrahiertes, Thermalraster.

Um für die einzelnen Höhenintervalle korrekte Klassengrößen und -verteilungen zu erhalten, wurden deren Thermal-Komposite jeweils einzeln aus den bereits geklippten Satellitendaten abgeleitet – d. h. sämtliche Satellitenbilder wurden bereits vor ihrer Klassifizierung auf die Ausdehnung der jeweiligen Höhenstufe ausgestanzt – und für die anschließende Statistik mit den vorhandenen Landnutzungsdaten verschnitten. Hierbei zeigte sich, dass sich das räumliche Verteilungsmuster von T_{Land} durch diese Verfahrensweise nicht geändert hat, sich jedoch eine bessere Differenzierung der Klassenzugehörigkeiten der einzelnen Beobachtungen ergab.

3.2 Was steuert die Oberflächentemperatur des Landes?

Die Kenntnis des Verteilungsmusters von T_{Land} ist zwar geeignet für einen diesbezüglichen räumlichen Überblick, befähigt aber nicht zu quantitativen Analysen oder zu einer regelbasierten Ableitung von Suchräumen zur Umsetzung von Maßnahmen. Eine semantische Aufwertung der Thermaldaten ist also erforderlich und wird durch die Kombination mit weiteren räumlichen Informationen möglich.

Für diese Studie wurden ATKIS-DLM Landnutzungsdaten als räumlicher Bezug gewählt. Um jene Prozesse zu identifizieren, die die Temperatur der Landoberfläche steuern, wurde zusätzlich ein Datensatz von $n = 22$ mutmaßlich die Oberflächentemperatur beeinflussenden Variablen, im Weiteren *Prädiktoren*³ genannt, aggregiert⁴.

3.2.1 Die thermische Signatur der Landnutzungen

In einem ersten Schritt wurden die ATKIS-Landnutzungsdaten mit Vektordaten zur Standorttypisierung für die Biotopentwicklung verschnitten (Verfahrensschritte siehe Abb. 3.2). Die hierdurch geschaffenen Polygone sind Merkmalsträger beider Ausgangsdatsätze, d. h. enthalten Informationen zur Landnutzung und Bodeninformation.

In einem zweiten Schritt wurden Rasterstatistiken verfügbarer Prädiktoren (vollständige Liste siehe Tabelle 10.2) in die einzelnen Polygone des verschnittenen Vektorproduktes ausgelesen. Hierdurch trägt jedes einzelne Polygon nun, zusätzlich zu räumlichen Informationen zu Lage und Größe und den Ursprungsinformationen zur Landnutzung und Standorttypisierung, den Mittelwert, Median und die Standardabweichung aller Rasterzellen, die es räumlich abdeckt. Komplexe räumliche Abfragen und auch multivariate statistische Analysen außerhalb der Umgebung eines Geo-Informationssystems werden hierdurch möglich.

Die Zahl der somit geschaffenen Beobachtungen (d. h. Polygone) liegt bei $\sim 1,55$ Millionen (Tabelle 3.2). Jede Beobachtung ist Träger von 22 Merkmalen (d. h. Prädiktorvariablen wie z. B. *TCD2015* (Kronendichte)), die ihrerseits unterschiedlich ausgeprägt sein können (im Fall von *TCD2015* sind Werte zwischen 0 und 100 möglich).

Deshalb wird eine Reduktion des Gesamtdatensatzes auf die im Wesentlichen einflussnehmenden Prädiktoren zwingend notwendig. Für ein Grundverständnis des jeweiligen Erklärungspotenziales der einzelnen Prädiktoren für die *Gesamtvarianz*⁵ aller aggregierten Daten wurde eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) für den gesamten Datensatz durchgeführt. Ergebnisse der PCA finden sich in Tabelle 3.1, auf die PCA-Resultate wird im nachfolgenden Abschnitt 3.2.2 eingegangen. Tab. 10.5 zeigt, dass die ersten 2 PCs mit den Parametern $T(\text{Luft})$ und Niederschlag belegt sind. Sie erklären zusammen ca. 30 % der Varianz des Feldes. Danach kommt in einzelnen Höhenstufen Evaporation hinzu (in anderen z. B. T_{Land}). Die Beiträge aller Parameter außer Temperatur und Niederschlag liegen bei jeweils unter 10 %.

³Als **Prädiktor** bezeichnet man eine Variable, die zur Vorhersage der Ausprägung einer zweiten, abhängigen Variable dient. Im Rahmen dieser Studie ist *THERMAL*, d. h. T_{Land} , diese abhängige Variable. Umweltparameter wie z. B. die Kronendichte, der Niederschlag oder auch die Höhe werden auf ihre Eignung als Prädiktoren untersucht.

⁴Alle betrachteten Prädiktoren sind in den Tabellen 10.2 (Rasterdaten) und 10.3 (Vektordaten) beschrieben.

⁵**Gesamtvarianz:** Streuung der Wahrscheinlichkeitsdichte aller involvierten Zufallsvariablen um einen Schwerpunkt.

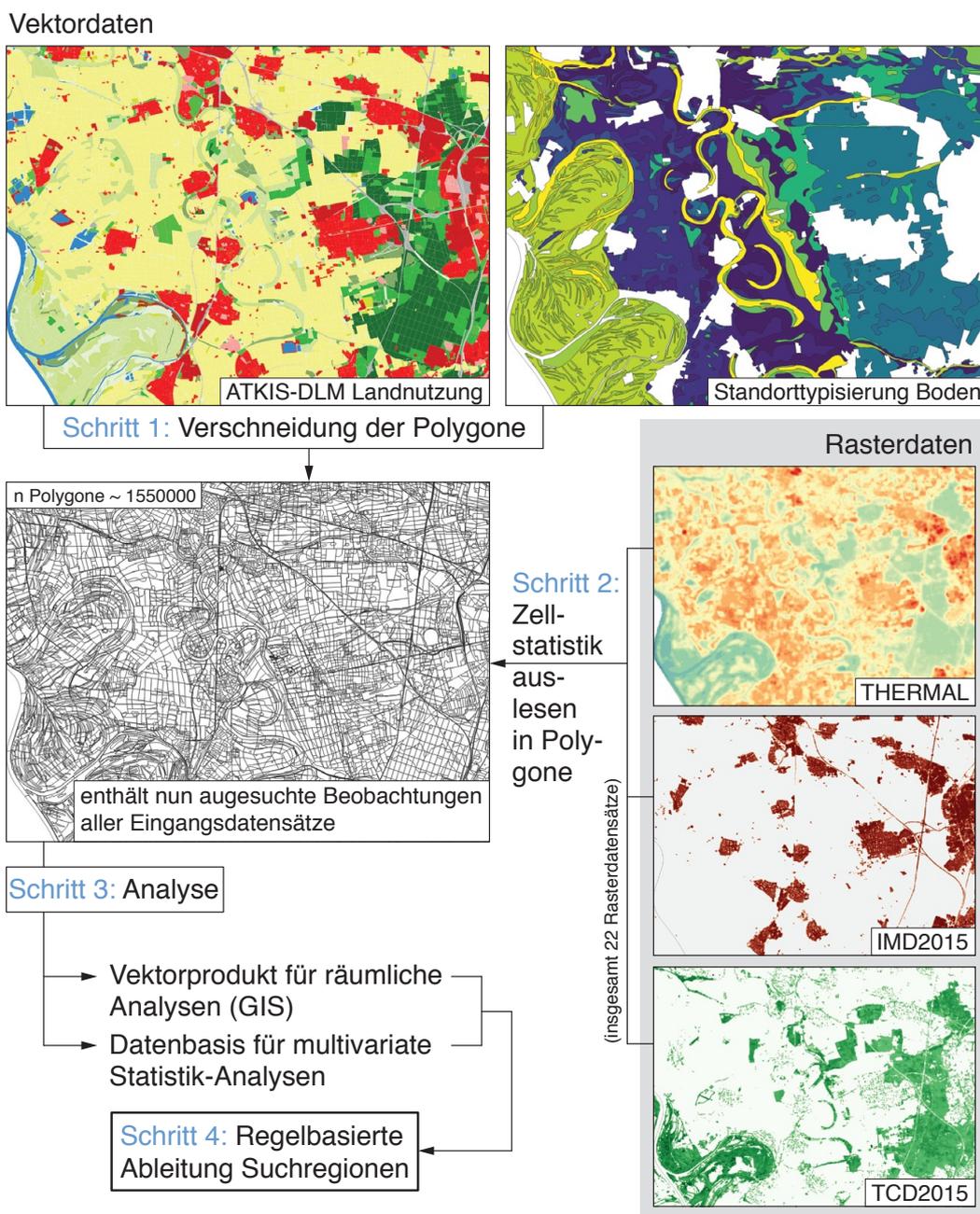


Abbildung 3.2: Schematischer Ablauf der Datenaggregation mit ATKIS-DLM-Daten als räumliche Bezugsbasis. Generalisierter Arbeitsablauf: 1) Verschneidung von Vektordaten zu Landnutzung und Bodeneigenschaften, 2) Auslesen räumlich gemittelter Rasterdaten für die einzelnen Polygone des Vektordatensatzes, 3) Geo-Statistische Analyse der Attributdaten hinter dem Vektordatensatz und 4) Ableitung von Suchregionen für Maßnahmentypen mittels GIS.

In einem weiteren Schritt, und dann nun mit Hinblick auf das Verhältnis der einzelnen Prädiktoren zur Temperatur der Landoberfläche (T_{Land}), wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen T_{Land} und den einzelnen Prädiktoren analysiert. Abschnitt 3.2.3 befasst sich mit den Ergebnissen dieser Analysen.

Tabelle 3.1: Resultate der Hauptkomponentenanalysen für den gesamten Datensatz (erste Zeile) und für einzelne Höhenstufen (Zeilen zwei bis zehn). PC_{ges.} = n PCs gesamt (entspricht n Prädiktoren); PC>Scr = n PCs über dem »scree« in scree plot (vgl. Abb. 3.3); PC>Ew1 = n PCs mit Eigenwert > 1; PC1 bis PC5 = erste fünf Hauptkomponenten, nach Varimax-Rotation und sortiert nach ihrer Bedeutung für die Erklärung der Gesamtvarianz des jeweiligen Datensatzes; Var_{cum} = kumulierte erklärte Varianz, Var_{prop} = anteilige erklärte Varianz. Interpretation (reiffication) der PCs: T_{Luft} = Lufttemperatur, T_{Land} = Temperatur der Landoberfläche, Nieder. = Niederschlag, Evapo = Verdunstung und H₂O Pflanzen = pflanzenverfügbares Wasser (Tabelle 10.2).

Höhenintervall	ges.	PC >Scr	PC >Ew1	Var _{cum}	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
					(Var _{prop})	(Var _{prop})	(Var _{prop})	(Var _{prop})	(Var _{prop})
71–953 m	23	5	11	0.56	T _{Luft} (0.26)	Nieder. (0.09)	Evapo. (0.08)	T _{Land} (0.07)	H ₂ O Pflanzen (0.05)
71–100 m	23	5	12	0.49	T _{Luft} (0.16)	Nieder. (0.11)	T _{Land} (0.10)	H ₂ O Pflanzen (0.06)	Evapo. (0.06)
100–150 m	23	3	13	0.36	T _{Luft} (0.21)	T _{Land} (0.09)	Nieder. (0.06)	–	–
150–200 m	23	4	13	0.45	T _{Luft} (0.20)	Nieder. (0.11)	T _{Land} (0.08)	H ₂ O Pflanzen (0.07)	–
200–250 m	23	4	13	0.45	T _{Luft} (0.19)	Nieder. (0.11)	T _{Land} (0.07)	H ₂ O Pflanzen (0.07)	–
250–300 m	23	5	13	0.51	T _{Luft} (0.17)	Nieder. (0.12)	T _{Land} (0.08)	Evapo. (0.08)	H ₂ O Pflanzen (0.07)
300–350 m	23	5	13	0.53	T _{Luft} (0.15)	Nieder. (0.13)	Evapo. (0.10)	T _{Land} (0.08)	H ₂ O Pflanzen (0.07)
350–400 m	23	5	14	0.54	Nieder. (0.16)	T _{Luft} (0.15)	Evapo. (0.09)	T _{Land} (0.08)	H ₂ O Pflanzen (0.06)
400–450 m	23	5	13	0.54	T _{Luft} (0.16)	Nieder. (0.16)	T _{Land} (0.08)	Evapo. (0.08)	H ₂ O Pflanzen (0.06)
450–500 m	23	5	13	0.54	T _{Luft} (0.18)	Nieder. (0.16)	T _{Land} (0.08)	H ₂ O Pflanzen (0.06)	Evapo. (0.06)

3.2.2 Hauptkomponenten

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA) ist ein *datenreduzierendes* Verfahren der multivariaten Statistik. Sie dient der Zerlegung eines potentiell korrelierten Variablensatzes in dann linear unkorrelierte und senkrecht aufeinander stehende Hauptkomponenten (JOLLIFFE, 2002), denen – in Abhängigkeit von den auf sie hoch ladenden Variablen – *Interpretationen* (auch Bedeutungen, engl. reifications) zugeordnet werden können (Interpretationen Abb. 3.3 unten). Als ein visuell deutbares Ergebnis einer PCA gibt die Ladungsmatrix, in Form einer Korrelations- oder Kovarianz-Matrix, Auskunft über die Erklärungskraft der einzelnen Hauptkomponenten bezogen auf die Gesamtvarianz des Variablensatzes.

In dieser Studie wurden die Eingangsvariablen der PCA (das sind alle Prädiktoren sowie auch *THERMAL*, die abhängige Variable selbst) standardisiert⁶. Die verwendeten Korrelations-Ladungsmatrizen wurden, für eine bessere Interpretierbarkeit, per Varimax-Transformation (KAISER, 1958) rotiert, wobei die Hauptkomponenten nach ihrer Erklärungskraft geordnet wurden. Als Entscheidungskriterium für die Anzahl der im Weiteren zu betrachtenden Hauptkomponenten wurde das scree-plot-Verfahren herangezogen, bei dem die Eigenwerte der Hauptkomponenten (PC) in fallender Reihenfolge geplottet werden und alle PCs rechts des entstehenden Knicks in einer die PCs verbindenden Kurve fallengelassen werden (siehe Abb. 3.3, inset »scree-Plot«)⁷.

PCA-Ergebnisse und -Interpretation

Die Hauptkomponente »Lufttemperatur« (T_{Luft} , höchste Ladungsbeiträge durch die Prädiktoren *TMAX8110*, *TMIN8110*, *TMEAN8110* und *SOIL8110*) kann, sowohl für den gesamten Datensatz als auch für die einzelnen Höhenstufen, den höchsten erklärenden Anteil an der Gesamtvarianz der betrachteten Daten leisten (Details siehe Tabelle 3.1). An zweiter Stelle rangiert die PC »Niederschlag« (höchster Ladungsbeitrag durch *BGR_GWNeu*), gefolgt von PC »Verdunstung« (höchster Ladungsbeitrag durch *EVAPOR9110*), PC »Temperatur der Landoberfläche« (T_{Land} , höchste Ladungsbeiträge durch *TCD2015* und *THERMAL*) und der PC »pflanzenverfügbares Wasser« (höchster Ladungsbeitrag durch *BGR_NFK*). Während die Erklärungskraft der PC »Lufttemperatur« mit steigender Höhe sinkt, steigt die diesbezügliche Potenz der PC »Niederschlag« in diese Richtung an.

Den *gesamten Datensatz* betreffend zeigt sich, dass die topographischen resp. reliefbezogenen Prädiktoren *AREA* (Polygonfläche), *SLP* (Hangneigung), *CURV* (Krümmung) und *ASPECT* (Perspektive, Tabelle 10.2) keinen nennenswerten Beitrag zur Erklärung der Gesamtvarianz leisten können. Weiterhin können auch *NDVImed* (Pflanzenvitalität), *WWPI* (Feuchte-Wahrscheinlichkeits-Index), *GRAVPI8110* (Grasland-Wahrscheinlichkeits-Index), *BGR_SickW* (Sickerwasserrate) und *BGR_WaVerf* (Wasserverfügbarkeit, Tabelle 10.2) nicht zur Erklärung der Varianz herangezogen werden, während der Versiegelungsgrad (*IMD2015*) diesbezüglich noch bedingt informativ ist. Die klimabezogenen Prädiktoren *PRECIP8110* (Niederschlag) und *DROUGHT8110* (Dürre-Index)

⁶**Standardisierung** (auch z-Transformation): Transformation einer Zufallsvariablen auf Erwartungswert = Null, Varianz = 1 und Standardabweichung = 1. Das Verfahren dient der Erhöhung der Vergleichbarkeit von Zufallsvariablen mit stark unterschiedlicher Verteilung.

⁷Das populäre **Kaiser-Guttman-Kriterium**, d. h. der Ausschluss aller PCs mit einem Eigenwert ≤ 1 , wurde aufgrund der hohen Anzahl von PCs mit einem Eigenwert knapp über 1 verworfen, da das Ziel der Datenreduktion so verfehlt worden wäre.

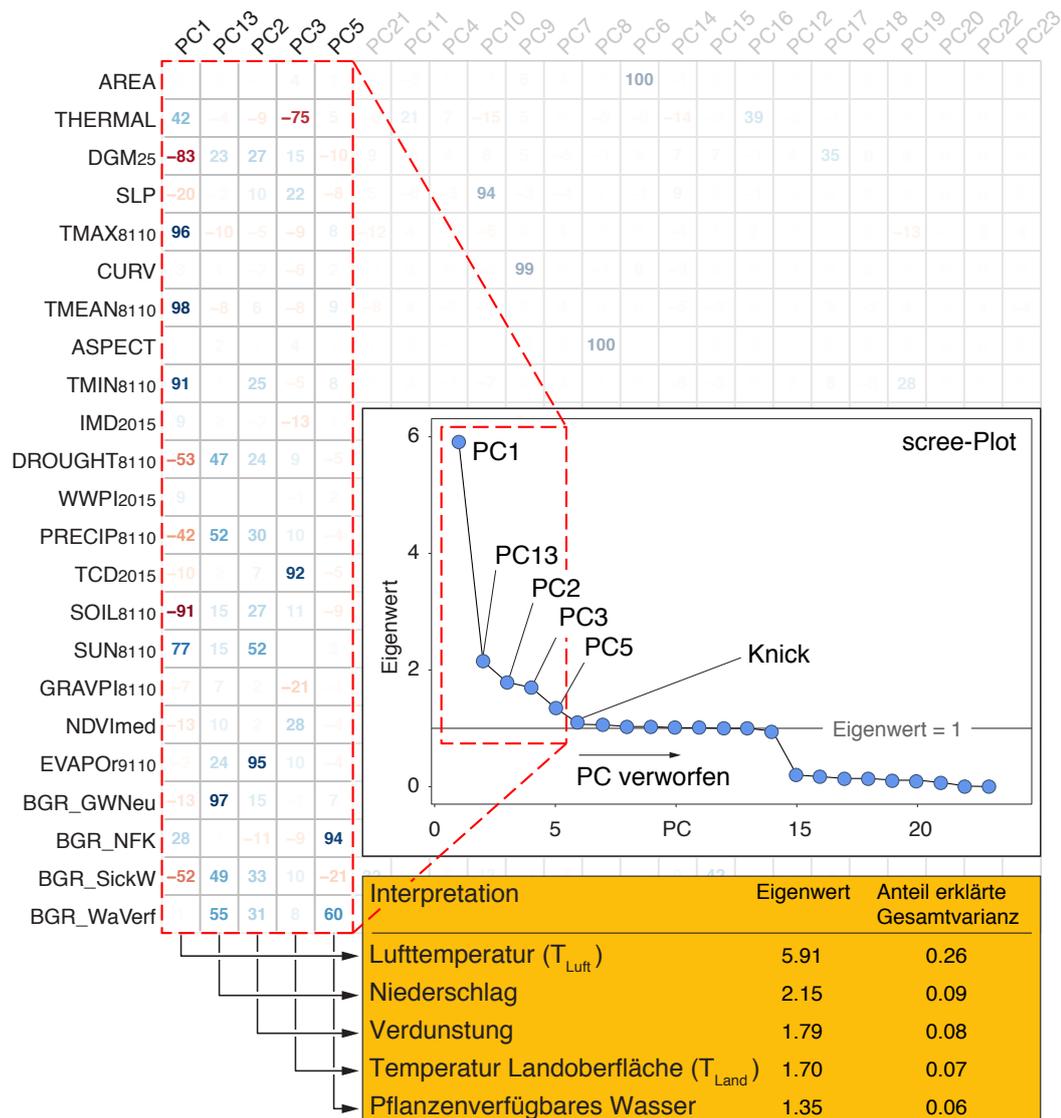


Abbildung 3.3: Korrelationsmatrix, gesamter Datensatz, mit Ladungen für die einzelnen Prädiktoren (y-Achse) für jede Hauptkomponente (PC, x-Achse). Die PCs wurden nach Wertigkeit sortiert; die PC mit dem höchsten Erklärungsanteil für die Gesamtvarianz der Daten steht links. Positive Ladungen (blau) stehen für positive Zusammenhänge, negative Ladungen (rot) repräsentieren negative Zusammenhänge (Opazität = Ladungsstärke, 0 = transparent). Der scree-Plot zeigt das Entscheidungskriterium für die Anzahl der relevanten PCs (in diesem Fall fünf) – den Knick in der Kurve, ab dem ihre Steigung vernachlässigbar wird. Das untere Feld zeigt die Interpretationen der ausgewählten PCs, deren Eigenwert (total = n PCs, in diesem Fall = 23), sowie deren Anteil an der erklärten Gesamtvarianz (kumuliert = 1).

laden, bei Betrachtung des gesamten Datensatzes, auf keine PC wirklich hoch, sondern haben vernachlässigbare Anteile an den PCs »Lufttemperatur«, »Niederschlag« und einer PC, die als »Trockenheit« interpretiert werden kann.

Bei Betrachtung der PCA-Resultate für die einzelnen Höhenintervalle fällt auf, dass sich die Anzahl, Interpretation und Reihenfolge der nicht verworfenen PCs in Gegenüberstellung zum

Gesamtdatensatz prinzipiell nicht ändern – T_{Luft} zum Beispiel ist für den Gesamtdatensatz wie auch alle betrachteten Höhenintervalle von höchster Erklärungskraft (Tabelle 3.1). Es ändern sich jedoch die Beiträge, d. h. Ladungen, der einzelnen Prädiktoren zu den jeweiligen PCs.

Die Höhe (DGM_{25}) – bei der PCA für den gesamten Datensatz auf PC₁ (»Lufttemperatur«) hoch-negativ ladend⁸ – spielt für die Lufttemperatur-PC der einzelnen Höhenintervalle keine Rolle mehr. Dies ist, als Ergebnis der Unterteilung des Datensatzes in Höhenintervalle, ein gewünschter Effekt (siehe auch Abb. 10.5). Durch die Unterteilung des Gesamtdatensatzes in Höhenintervalle wurde weiterhin erreicht, dass die Ladungen von $PRECIP_{8110}$ und $DROUGHT_{8110}$ auf die PC »Niederschlag« erheblich steigen, da sie nicht mehr auf mehrere PCs laden. IMD_{2015} und $NDVI_{med}$ gewinnen an Bedeutung, wobei der Bedeutungsgewinn von $NDVI_{med}$ erst mit der Höhe zum Tragen kommt. Die überragende Bedeutung der PC »Lufttemperatur« wurde gerade herausgestellt. Im Folgenden wird diese Hauptkomponente jedoch nicht weiter betrachtet, da der Fokus auf jene PCs – und v. a. die sie aufbauenden Prädiktoren – gelegt wird, die über Landnutzungsänderungen und die Gestaltung der Landschaft auf kürzerem Weg beeinflusst werden können. Analog wurde mit der PC Niederschlag verfahren.

Da IMD_{2015} , d. h. der Versiegelungsgrad der Landoberfläche, grundsätzlich nur in den, zahlenmäßig unterlegenen, urbanen Gebieten von Bedeutung ist, ist das Erklärungspotenzial dieser Variable für die Gesamtvarianz der aggregierten Daten überschaubar. Wie sich im Weiteren zeigen wird, hat IMD_{2015} aber insbesondere in Siedlungsgebieten eine hohe erklärende Kraft in Bezug auf T_{Land} und die Erklärungskraft von IMD_{2015} wäre höher, wenn im Wesentlichen Siedlungsgebiete betrachtet würden.

Große Bedeutung, nach der Lufttemperatur und dem Niederschlag, kommt, mit in die Höhe leicht abnehmender Tendenz, dem Prädiktor »Kronendichte« (TCD_{2015}) zu. Zusammen mit dem Prädiktor $THERMAL$, d. h. T_{Land} , baut TCD_{2015} die PC mit der Interpretation »Temperatur Landoberfläche« auf.

3.2.3 Korrelationen

Der Korrelationskoeffizient r beschreibt die Stärke des linearen Zusammenhanges zwischen zwei Variablen⁹. Nach der, vergleichsweise globalen, Analyse der Erklärungskraft der aggregierten Prädiktoren für die Gesamtvarianz des Gesamtdatensatzes mittels PCA, wurde die abhängige Variable $THERMAL$, also T_{Land} , auf potentielle Korrelation mit ihren Prädiktoren untersucht. Dies geschah in zweierlei Hinsicht - (i) mit Blick auf die Stärke des Zusammenhanges und (ii) unter Beachtung der Änderung von r mit der Höhe¹⁰.

In Abbildung 3.4 ist die höhenbedingte Änderung der Korrelationskoeffizienten von ausgewählten Prädiktoren und T_{Land} dargestellt. Ein höhenunabhängiger, stark negativer Zusammenhang

⁸Inverser Zusammenhang, d. h. sinkendes T_{Luft} mit steigender Höhe (DGM_{25}).

⁹Als dimensionsloses statistisches Maß kann r Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei negative Werte für negative Zusammenhänge stehen und $r = |1|$ den stärksten Zusammenhang repräsentiert.

¹⁰Korrelationsmatrizen für den Gesamtdatensatz sowie für die einzelnen Höhenstufen finden sich im Anhang, Methoden, Abschnitt 10.2.1.

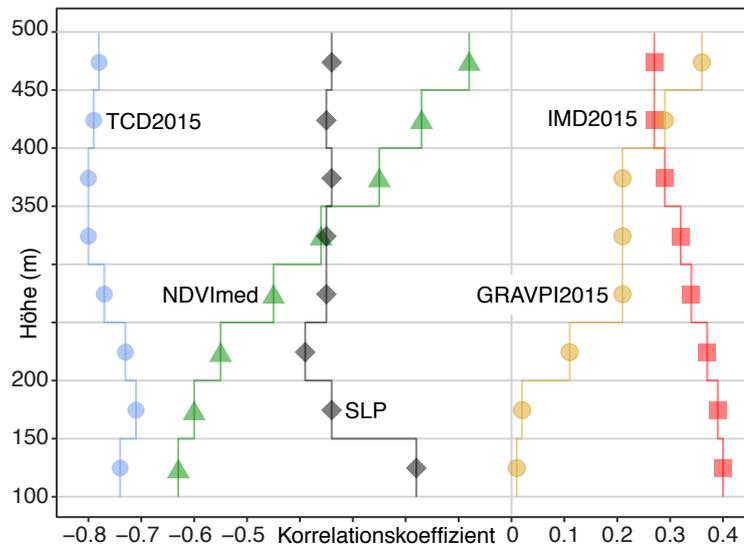


Abbildung 3.4: Korrelationskoeffizienten zwischen T_{Land} und ausgewählten Prädiktoren nach Höhenintervallen. TCD_{2015} = Kronendichte, $NDVImed$ = Norm. Diff. Vegetationsindex, SLP = Hangneigung, $GRAVPI_{2015}$ = Grasland-Wahrscheinlichkeits-Index, IMD_{2015} = Versiegelungsgrad.

besteht zwischen T_{Land} und der Kronendichte (TCD_{2015}) – ein sinkendes TCD_{2015} geht also mit steigendem T_{Land} einher (und umgekehrt). Ebenfalls höhenkonstante, jedoch weniger starke Zusammenhänge bestehen zwischen dem Versiegelungsgrad (IMD_{2015} ; positiv) resp. der Hangneigung (SLP , negativ) und T_{Land} . Ein Beispiel für den höhenwärtigen Zerfall eines Zusammenhanges liefert die Pflanzenvitalität ($NDVImed$), während für $GRAVPI_{2015}$ ein Zusammenhang mit T_{Land} in diese Richtung entsteht.

$GRAVPI_{2015}$, als Index ein Maß für die optische Klassifikationsgüte von Grasländern der von Copernicus/EEA bereitgestellten Datenprodukte, konnte weder bei der PCA noch durch Korrelation mit T_{Land} überzeugen. Auch die Pflanzenvitalität ($NDVImed$) besticht als Prädiktor nicht durch höhenunabhängige Robustheit ihrer Korrelation mit T_{Land} . Trotzdem kommt $NDVImed$ eine Bedeutung für die Ausprägung von T_{Land} zu, zum einen durch vergleichsweise hohe Korrelationskoeffizienten bis 300 m Höhe und zum anderen durch ein vorhandenes Erklärungspotential in Bezug auf die Gesamtvarianz bei der PCA für die Höhen > 400 m.

Über die Suche nach kompetenten Prädiktoren für die Ausprägung von T_{Land} lässt sich, bei ausschließlicher Fokussierung auf die durch die Landnutzung und Landschaftsgestaltung direkt beeinflussbaren Prädiktoren, bisher Folgendes feststellen:

- **TCD_{2015} , die Kronendichte** oder auch der, in Richtung Nadir¹¹ gesehene, Bedeckungsgrad der Landoberfläche durch Baumkronenschluss ist mit Abstand der **beste Prädiktor für T_{Land}** . TCD_{2015} erklärt, über Höhenintervalle hinweg, einen bedeutenden Teil der Gesamtvarianz der aggregierten Daten indem es hoch auf jene PC lädt, die als T_{Land} interpretiert werden kann. Darüber hinaus ist TCD_{2015} mit T_{Land} negativ hochkorreliert. Auch dieser Zusammenhang bleibt über Höhenintervalle hinweg stabil.

¹¹Nadir: dem Zenit in Lotrichtung gegenüberliegender Fußpunkt.

- **IMD₂₀₁₅, der Versiegelungsgrad der Landoberfläche**, kann vergleichsweise weniger zur Erklärung der Gesamtvarianz beitragen als *TCD₂₀₁₅*. Dies mag vor allem daran liegen, dass nur urbane Bereiche – die flächenmäßig in der Minderheit sind – versiegelt sind. Die Erklärungskraft von *IMD₂₀₁₅* lässt außerdem mit der Höhe nach, was durch die ebenfalls abnehmende Siedlungsdichte bedingt wird. Nichtsdestotrotz bedingt *IMD₂₀₁₅*, bei der PCA für egal welche Höhenstufe, eine eigene Hauptkomponente, die – höhenwärts schwächer werdend – mehr als nur sich selbst erklärt (d. h. Eigenwert > 1). Darüber hinaus ist ein dauerhaft positiver Zusammenhang zwischen *IMD₂₀₁₅* und T_{Land} feststellbar. Im Zusammenspiel mit der rein physikalischen Bedeutung der Versiegelung der Landoberfläche für Austauschprozesse von Energie und Materie (vgl. Abschnitt 3.4.2) wird *IMD₂₀₁₅* somit zu einem **wertvollen Prädiktor für T_{Land}** .
- **NDVImed**, ein gängiger Index für Pflanzenvitalität, zeigt weder bei der PCA noch in seinem Korrelationsverhalten zu T_{Land} die Höhenunabhängigkeit, die *TCD₂₀₁₅* als Prädiktor so wertvoll macht. Trotzdem ist *NDVImed* im Sinne der Ziele dieser Studie **von gewisser Bedeutung**, da sich über das Maß der Pflanzenvitalität wichtige Differenzierungen innerhalb der ATKIS-Landnutzungsklasse »Vegetation« vornehmen lassen.
- **BGR_NFK, die nutzbare Feldkapazität**, d. h. ein Maß für das Vermögen von Böden, pflanzenverfügbares Wasser zu speichern, wurde im Rahmen der PCA als sehr erklärungsstark in Hinsicht auf die Gesamtvarianz aller aggregierten Daten identifiziert. Bei der Betrachtung von Korrelationskoeffizienten mit T_{Land} versagt *BGR_NFK* allerdings. Wenngleich Pflanzenwuchs und -vitalität direkt an die Wasserversorgung gebunden sind, so ist *BGR_NFK* in gewisser Weise durch die Pflanzen selbst von T_{Land} entkoppelt und der angenommene Zusammenhang somit eher indirekter Natur (Kap. 3.4.4). Dies dürfte der Grund für die **mäßige Performanz** von *BGR_NFK* sein.

Zwischenfazit

Gruppen von Prädiktoren mit zusammengefasster Redundanz, so genannte Hauptkomponenten, sowie auch die Korrelation jedes einzelnen Prädiktors mit der abhängigen Variable *THERMAL* (d. h. T_{Land}) wurden untersucht. Dies geschah mit dem Ziel, die Menge an Eingangsdaten zu strukturieren, zu reduzieren und zu vereinfachen (PCA). Weiterhin sollte festgestellt werden, welche der 22 zur Verfügung stehenden Prädiktoren, über Höhenstufen hinweg, robust im Sinne einer Vorhersage von T_{Land} sind.

Es zeigt sich, dass die Variabilität des Gesamtdatensatzes durch nur wenige Hauptkomponenten für die Zwecke dieser Studie hinreichend gut beschrieben wird. Den fünf ausgewählten PCs wurden die Interpretationen »Lufttemperatur«, »Niederschlag«, »Verdunstung«, »Temperatur der Landoberfläche« und »pflanzenverfügbares Wasser« angehängt. Prädiktoren¹², die ein hohes Erklärungspotenzial für diese PCs haben, gelten als im Weiteren relevant. Prädiktoren mit schwachem

¹²Zur Erinnerung: Die Gesamtzahl der betrachteten Prädiktoren ist 22. Prädiktoren lassen sich wie folgt gruppieren: **Topografie & Relief** (Höhe, Hangneigung, Krümmung, Perspektive), **Klima & Hydrologie** (Lufttemperatur, Dürre-Index, Sonnenscheindauer, Niederschlag, Reale Verdunstung, Bodenfeuchte, Feuchte-Wahrscheinlichkeits-Index, Grundwasserneubildung, nutzbare Feldkapazität, Sickerwasserrate, Wasserverfügbarkeit) und **Landbedeckung & Vegetation** (Vegetationsindex, Versiegelungsgrad, Kronendichte, Grasland-Wahrscheinlichkeits-Index); weitere Details in Tabelle 10.2.

Erklärungspotenzial haben nun diesen »Makel« und werden nicht mehr favorisiert (wenn auch nicht sofort verworfen).

Die anschließende Analyse der Korrelation aller Prädiktoren, über Höhenstufen hinweg, unter Berücksichtigung ihrer Performanz im Rahmen der PCA und der generellen Sinnhaftigkeit ihrer Verwendung, führte zur Identifizierung der folgenden, im Weiteren *präferierten Prädiktoren*: »Kronendichte«, »Versiegelungsgrad«, »Pflanzenvitalität« und »nutzbare Feldkapazität«.

3.3 Die Verteilung von T_{Land}

Die thermische Signatur der hessischen Landesoberfläche ist über alle neun betrachteten Höhenstufen (also zwischen 71 m und 500 m) ähnlich, d. h. die generelle Verteilung von Temperaturwerten, über Landnutzungen hinweg, ändert sich mit der Höhe nicht – Vertreter der Klassen »Siedlung« und »Verkehrsanlage« sind durchschnittlich wärmer als Gewässer und Flächen mit Vegetationsbestand. Wälder sind am besten gekühlt, am stärksten überwärmt sind Vertreter der Klassen »Siedlung-Wohnbau« und »Siedlung-Industrie und Handel«. Landwirtschaftlich geprägte Vertreter der Landnutzungsgruppe »Vegetation« (so z. B. »Grünland« (V_{AP})), wenig urbane resp. verdichtete Vertreter der Landnutzungsgruppe »Siedlung« (z. B. »Freizeitanlagen« (S_{RL})), aber auch »Gehölze« (V_{B}) und »Naturnahe Flächen« (V_{BN}) vermitteln zwischen den Extremen.

Abbildung 3.5 stellt die Verteilung von T_{Land} , unterteilt in Landnutzungen und nach Höhenstufen, dar. Jedes horizontale Band repräsentiert hierbei ein Höhenintervall. Die Verteilung von T_{Land} innerhalb eines Höhenintervalls ist in Form von Datenpunkten, die jeweils eine Beobachtung (d. h. ein Polygon) repräsentieren, abgebildet. Je höher ein Datenpunkt innerhalb eines Bandes liegt, desto wärmer ist er also.

Einzelne Datenpunkte (»n obs« ist die Anzahl der Beobachtung pro Höhenintervall¹³) sind, entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu Landnutzungen, in Box-und-Whisker-Diagrammen zusammengefasst, bei denen IQR, der Interquartilbereich¹⁴, durch die Box repräsentiert wird. Die Landnutzungen sind, nach ihren *THERMAL*-Median-Werten, von links nach rechts aufsteigend sortiert. Die horizontale Streuung der Datenpunkte innerhalb einer Landnutzung dient nur ihrer besseren grafischen Darstellung, hat also keinen quantitativen Hintergrund. Die Datenpunkte wurden nach dem Merkmal *TCD2015* koloriert, wobei blaue Farbtöne für hohe Kronendichtewerte stehen.

3.3.1 Siedlungen – Leuchttürme der Überwärmung

Fußgängerzonen (T_{SP} in Abb. 3.5) stehen beispielhaft für die Überwärmung in allen Höhenintervallen, in denen sie als Klasse vertreten sind (d. h. zwischen 100 und 400 m) – mit generell allen

¹³Die Anzahl der Beobachtungen variiert zwischen den einzelnen Landnutzungen, d.h. zwischen den einzelnen Boxplots, stark, was sich in der Farbintensität der einzelnen Boxplots widerspiegelt.

¹⁴Der **Interquartilbereich** (auch Interquartilsabstand) ist ein Streuungsmaß statistischer Verteilungen. IQR liegt zwischen $Q_{0.75}$ und $Q_{0.25}$ einer nach Größe sortierten Stichprobe. Hieraus folgt, dass die zentralen 50 Prozent aller Messwerte innerhalb von IQR liegen. In den Box-und-Whisker-Plots der Abbildungen 3.5 und 3.8 wird IQR jeweils durch die Box ober- und unterhalb des Medians repräsentiert. IQR ist, wie auch der Median, unempfindlich gegen Ausreißer. Für ein Beispiel siehe Abbildung 10.4

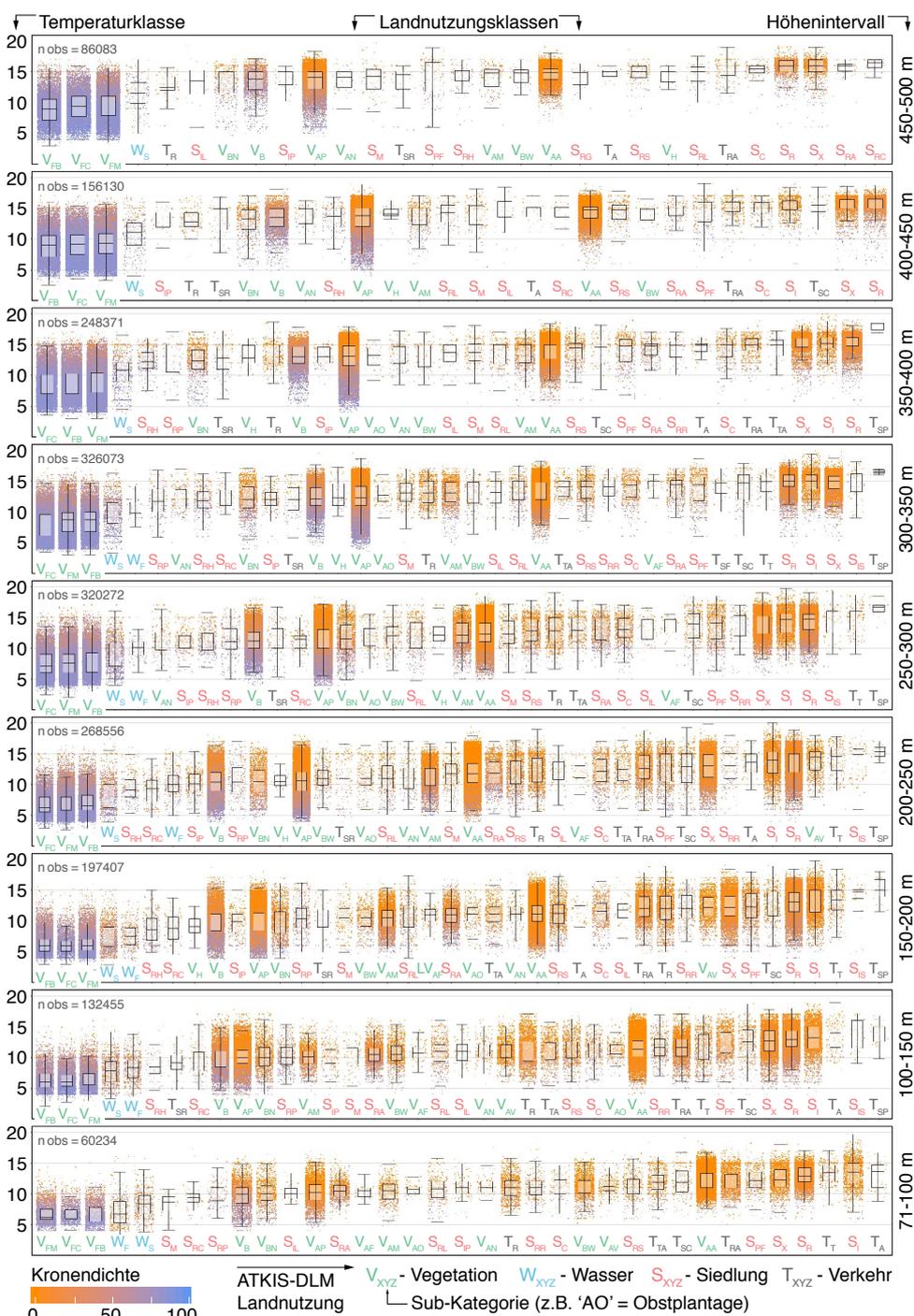


Abbildung 3.5: Temperaturen der Landoberfläche für Hessen in Temperaturklassen (Temperatur der jeweils einzelnen Beobachtung relativ zu allen Beobachtungen einer Höhenstufe; y li., vgl. Tabelle 10.1), nach Landnutzung (x) und in Höhenintervallen (y re.). Die einzelnen Landnutzungen sind innerhalb eines Höhenintervalls mithilfe von Boxplot-Diagrammen visualisiert (Whisker, d.h. Balken ober- und unterhalb der IQR-Boxen, erstrecken sich bis 1,5 x IQR). Die Datenpunkte sind nach der Variable »Kronendichte« koloriert, wobei gelb = 0% und blau = 100%; Landnutzungsklassen siehe Kennung unter Boxplot (Struktur Landnutzungsdaten: Abb. 10.2, Erklärung der verwendeten Kennungen: Tab. 3.2). Beispielsweise ist erkennbar, dass Laubwald (V_{FB}) in dem jeweiligen Höhenintervall eine vergleichsweise hohe Kronendichte besitzt (erkennbar an der hohen Dichte an blau markierten Datenpunkten), wohingegen Wohnbebauung (S_R) eine geringe bis fehlende Kronendichte aufweist (erkennbar an der hohen Dichte orangefarbener Datenpunkte). Zugleich liegt die Wohnbebauung in der jeweiligen Höhenklasse überwiegend in einer höheren Temperaturklasse als der Laubwald.

Tabelle 3.2: Verwendete ATKIS-DLM Landnutzungsclassen. Die vier übergeordneten Klassen, z. B. **Siedlung (S)**, sind in Sub-Klassen (ATKIS-Funktionen) unterteilt, die um jeweils eine weitere Buchstaben-Kennung erweitert sind (z. B. S_I für Siedlung, **Industrie**). Ein zweites Sub-Level enthält weitere Funktionen, die den Funktionen von Level 2 untergeordnet sind (z. B. S_{IL} für Siedlung, **Industrie, Deponie**). Levels mit dem Attribut »unspez.« enthalten keine Sub-Levels, ihre Kennung folglich keinen dritten Buchstaben. Eine graphische Darstellung der hier gelisteten Landnutzungsclassen findet sich in Abb. 10.2.

Siedlung	S	Vegetation	V	Verkehr	T	Wasser	W
Friedhof	SC	Ackerland	V _{AA}	Flugverkehr unspez.	T _A	Fließgewässer	W _F
Halde	SD	Streuobstacker	V _{AF}	Strassenverkehr unspez.	T _R	Stehendes Gewässer	W _S
Industrie & Gewerbe unspez.	S _I	Gartenland	V _{AG}	Verkehrsbegleitfl. Straße	T _{RA}		
Deponie (ü.T.)	S _{IL}	Streuobstwiese	V _{AM}	Platz unspez.	T _S		
Gärtnerei	S _{IM}	Baumschule	V _{AN}	Parkplatz	T _{SC}		
Kläranlage	S _{IP}	Obstplantage	V _{AO}	Festplatz	T _{SF}		
Handel, Dienstleistg.	S _{IS}	Grünland	V _{AP}	Fussgängerzone	T _{SP}		
Tagebau, Grube, Steinbruch	S _M	Weingarten	V _{AV}	Rastplatz	T _{SR}		
Bes. Funktion	S _{PF}	Gehölz	V _B	Raststätte	T _{SS}		
Wohnbau unspez.	S _R	Naturnaher Fläche	V _{BN}	Bahnverkehr unspez.	T _T		
Kleingarten	S _{RA}	Gewässerbegleitfl.	V _{BW}	Verkehrsbegleitfl. Bahn	T _{TA}		
Schwimm-, Freibad	S _{RB}	Laubholz	V _{FB}				
Campingplatz	S _{RC}	Nadelholz	V _{FC}				
Golfplatz	S _{RG}	Laub- & Nadelholz	V _{FM}				
Freizeitanlage	S _{RL}	Moor	V _M				
Park	S _{RP}	Heide	V _H				
Grünanlage	S _{RR}						
Sportanlage	S _{RS}						
Mischnutzung	S _X						
Wochenend- & Ferienhausfläche	S _{RH}						

Beobachtungen (d. h. inkl. Negativ-Ausreißern) oberhalb des Medians aller Thermalwerte, jeweiligen Medianwerten oberhalb von 80 Prozent aller Thermalwerte und mit beiden Beobachtungen höhenwärts stark ansteigend. Additive lokalklimatische Effekte können hierfür als Erklärung herangezogen werden: typischerweise sind Fußgängerzonen Stadtbereiche mit (i) hoher Versiegelung und (ii) geringer Vegetations- oder gar Kronendichte, zzgl. einer Vielfalt an stadtklimatischen Eigenheiten, z. B. den Wind und die Wärmespeicherung von Oberflächenmaterialien betreffend (LANDSBERG, 1981). Darüber hinaus dürfte ihre räumliche Lage – nämlich i. d. R. im Kern städtischer Wärmeinseln, die durch eine zusätzliche anthropogene Wärmeflusskomponente gekennzeichnet sind (OKE, 1988) – positives Feedback zur Überwärmung geben. Diese Ungunst kann durch Abluft-Wärme-Effekte von Klimaanlagen weiterhin verstärkt werden. Fußgängerzonen stehen damit stellvertretend für die am stärksten urbanisierten und verdichteten Siedlungsbereiche, die mit der vorhandenen Datenbasis und ihren Klassen »Wohnbau unspez.«, »Handel und Dienstleistung« und »Gemischte Nutzung« leider nicht näher aufgelöst werden können¹⁵. Rein quantitativ gesehen, besteht die Klasse der Fußgängerzonen jedoch nur aus wenigen Beobachtungen. Weit mehr Datenpunkte sind für die Siedlungsklassen »Wohnbau unspez.« (S_R), »Industrie Gewerbe unspez.« (S_I) und »Mischnutzung« (S_X) verfügbar.

Beobachtungen der Klasse »Wohnbau unspez.« – d. h. Vertreter jener Bereiche in denen wir leben – stellen, über alle Höhenintervalle hinweg, die wärmsten Landnutzungen dar. Ab dem Höhenintervall 250–300 m aufwärts, liegt der Median bei $\geq 80\%$ aller Thermal-Beobachtungen, d. h. innerhalb der wärmsten 20 % der Landschaft. Industrie- und Gewerbeflächen, wie auch Flächen mit dem ATKIS-Label »Mischnutzung« weisen ähnlich hohe Thermalwerte, bei jeweils noch höherer Variabilität innerhalb der Klassen, auf.

Herausragend in dieser Hinsicht sind Produktions- und Handelsstätten mit *großen Dachflächen* wie z. B. das Volkswagen AG Werk Kassel, die Hallen der Continental AG in Korbach, Gebäudedächer von Dunlop in Hanau oder die Hallen des Opel-Werks in Rüsselsheim. Die Dachflächen dieser Hitzeinseln zeichnen sich, trotz einer Rasterauflösung von 30 Metern, scharf von ihrer, ja immer noch asphaltierten oder betonierten Umgebung ab, die sie mit ihrer Oberflächentemperatur weit übertreffen.

Interessanterweise finden sich in den genannten drei Siedlungsklassen, aber jeweils nur unterhalb des Interquartilbereichs (IQR), Beobachtungen mit nennenswerter Kronendichte, geringer Versiegelung und /oder messbar vorhandener Pflanzenvitalität (siehe Abb. 3.5) – ein Hinweis auf die übergeordnete Bedeutung der in dieser Studie identifizierten Prädiktoren mit hoher Wirksamkeit auf die Temperatur der Landesoberfläche (T_{Land}).

Weitere thermische Hot-Spots in der Landschaft liegen in Bereichen der Verkehrsklassen »Bahn-

¹⁵Die Nutzung des vom COPERNICUS-Land Monitoring Service bereitgestellten **Urban Atlas** schafft hier keine Verbesserung, da die Urban-Atlas-Daten räumlich und inhaltlich schlechter aufgelöst sind als die der Studie zur Verfügung stehenden ATKIS-Daten. Die Vorteile der Urban-Atlas-Daten – das sind zuerst die freie Verfügbarkeit und die pan-europäische Vergleichbarkeit – sind im Rahmen dieser Studie irrelevant. Urban Atlas Daten stehen für die Jahre 2006 und 2012 zur Verfügung. Aus diesen Daten hat der Anbieter ein »Change 2006–2012«-Produkt errechnet, das den Landnutzungswandel im Zeitraum zwischen diesen Zeitpunkten dokumentiert. Weiterhin ist ein vektorisierter »Street Tree Layer« (STL) herunterladbar, der zusammenhängende Flächen mit urbaner Baumbedeckung (min. 500 m², min. Breite 10 m) abbildet. Während »Change 2006–2012«-durchaus überzeugende Änderungen beinhaltet, ist das »STL«-Produkt zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Studie noch unreif und, durch bedeutende Fehlklassifikationen, mangelhaft (für jeweils ein Beispiel siehe Anhang: Methoden, Abb. 10.3).

verkehr«, »Flugverkehr«, »Parkplatz« und »Festplatz«. Diese Landnutzungen haben Gemeinsamkeiten in sofern dass sie *vegetationslose* größere Areale repräsentieren, die i.d.R. *versiegelt* sind, sich unter Sonneneinstrahlung intensiv erwärmen (FERGUSON, 2005; FRAZER, 2005).

3.3.2 Wälder und Gewässerränder – Oasen der Kühle

Wälder sind die mit Abstand bestgekühlten Landnutzungen in Hessen. Der IQR der Waldverteilungen überlappt, mit Ausnahme der Gewässer, mit keinem IQR aller anderen verfügbaren Landnutzungen – ein gutes Indiz für die thermische Verschiedenheit der Wälder von den anderen Landnutzungen.

Signifikante thermischen Unterschiede zwischen den Laub- (V_{FB}), Nadel- (V_{FC}) und Mischwald- (V_{FM}) Verteilungen bestehen nicht. Mit wechselnden Höhenintervallen tauschen die drei Waldklassen zwar die Ränge, eine Systematik dahinter ist allerdings nicht erkennbar. Auffällig ist hingegen, dass die Variabilität der Beobachtungen in den Waldklassen mit der Höhe steigt (während dies in den vergleichsweise wärmeren Klassen der einzelnen Höhenintervalle umgekehrt scheint). Der Grund hierfür dürfte die höhenwärtig sinkende Anzahl von Beobachtungen aus anderen Landnutzungsklassen sein, die eine zahlenmäßige Dominanz von Wald-Beobachtungen bedingt, wodurch zwangsläufig auch warme Bereiche der Thermal-Verteilung von Waldgebieten belegt werden müssen.

Ebenfalls vergleichsweise gut gekühlt sind stehende und fließende Gewässer. Aus thermischer Sicht rangieren sie damit direkt über den Wäldern, die sie in Minimal-, Median- und auch Maximalwerten übertreffen. Interessanterweise finden sich in den Gewässerklassen, und das ist besonders auffällig bei den stehenden Gewässern der Höhenintervalle 200–250 m bis 400–450 m, viele Beobachtungen mit einer »Kronendichte« > 0 . Was auf den ersten Blick keinen Sinn macht – Gewässer haben keine Kronen – lässt sich damit erklären, dass die Gewässer-Polygone aus dem ATKIS-DLM (Tabelle 10.3) und die *TCD2015*-Daten von CORINE (Tabelle 10.2) sich nicht exakt decken, es also Übergangsbereiche mit Ufervegetation gibt, die der Landnutzungsklasse »Gewässer« zugeschlagen wurden. Bemerkenswert ist hierbei, dass ebendiese Beobachtungen der Ufervegetation systematisch kühler sind als die Gewässeroberflächen selbst. Hier zeigt sich das Mehr an Verdunstungskühle durch das Transpirations-Plus¹⁶ in der Evapotranspiration vegetationsbestandener Uferbereiche gegenüber der puren Evaporation über den Oberflächen der Gewässer.

3.3.3 Landwirtschaftliche und naturnahe Flächen der Klasse

»Vegetation«

Landwirtschaftliche Flächen besetzen, neben den Wäldern, die größten Teile der Landesfläche Hessens. Die Vertreter mit den meisten Beobachtungen sind hierbei Ackerflächen (V_{AA}), Grünländer (V_{AP}), Gehölze (V_B), naturnahe Flächen (V_{BN}) und, in den unteren bis mittleren Hanglagen, Weingärten (V_{AV}) und Streuobstwiesen (V_{AM}). Generell gilt Folgendes – da die Zahl der Beobachtungen »Wald« mit der Höhe im Verhältnis zu allen anderen Landnutzungen extrem steigt, werden Nicht-Wald-Beobachtungen der oberen Höhenintervall in die wärmeren *THERMAL*-Klassen

¹⁶Der **Transpiration** werden auf globaler Ebene bis zu 90 Prozent Leistungsanteil an Evapotranspirationsprozessen – also der Summe aus Transpiration und Evaporation – zugeschrieben (JASECHKO ET AL., 2013).

verdrängt, da Wälder ja die kühlest Landnutzungen darstellen.

Von den genannten Nicht-Wald-Vegetationsklassen stellen sich »naturnahe Flächen« und »Gehölze« als, über alle Höhenstufen hinweg, kühlest Landnutzungen dar (Abb. 3.5). Thermische Unterschiede zwischen Gehölzbereichen und naturnahen Flächen¹⁷ sind nicht erkennbar, vielmehr decken sich Median und IQR weitestgehend.

Es überrascht nicht, dass »Weingärten« hingegen zu den wärmsten Landnutzungen gehören (Abb. 3.6). Wie die nachfolgende Abb. 3.6 zeigt, ist dies im besonderem Maße in den Höhenintervallen ihrer häufigsten Vorkommen zwischen 150 und 250 m zu erkennen. Die in diesen Höhen ebenfalls häufig beobachteten »Streuobstwiesen«¹⁸ sind im Vergleich kühler. Die größten *THERMAL*-Unterschiede zwischen Weingärten und Streuobstwiesen bestehen zwischen 200 und 250 m Höhe.

THERMAL-Unterschiede bestehen zwischen den die Vegetation dominierenden Klassen »Ackerland« und »Grünland«. Grünländer¹⁹ sind grundsätzlich kühler als Äcker, wobei folgende Zusammenhänge von Bedeutung sind –

- Die größten Unterschiede zwischen Grünländern und Äckern zeigen sich in den unteren Höhenintervallen, zwischen 71 und 200 Metern. Hier sind die beiden Verteilungen so verschieden, dass der Median der einen Verteilung jeweils außerhalb der IQR der anderen Verteilung liegt.
- »Grünland«-Beobachtungen unterhalb der IQR werden spätestens ab dem Höhenintervall 250 m (und weiter aufwärts) von Beobachtungen mit hoher Kronendichte dominiert – kühle Grünländer der mittleren und höheren Lagen sind also keine baumlosen Offenländer!
- Die Variabilität der »Ackerland«-Beobachtungen sinkt mit der Höhe dramatisch. Ab 400 m Höhe liegen Box und Whisker oberhalb des *THERMAL*-Medians der gesamten Höhenstufe.
- Die vergleichsweise höhere Variabilität der Grünländer in den oberen Höhenintervallen wird v. a. durch Beobachtungen mit hoher Kronendichte getragen. Ohne diese Beobachtungen wären, so scheint es, Grünländer und Ackerflächen der oberen Höhenintervalle (wohlgemerkt für den Beobachtungszeitraum!) nicht verschieden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Grünländer durchschnittlich kühler sind als Ackerflächen und dass diese thermischen Unterschiede in den unteren Höhenintervallen der hessischen Topographie besonders deutlich und relevant sind.

Diese Unterschiede verlieren mit der Höhe an Klarheit und werden sogar hinfällig, wenn Beobachtungen der Klasse »Grünland« mit hoher Kronendichte als Merkmal von der Betrachtung ausgeschlossen werden – ein dann eher definitorisches Problem. Das höhenwärtige Zusammenrücken der *THERMAL*-Verteilungen von Grünländern und Ackerflächen geht mit einer steigenden Dominanz von Beobachtungen der »Wald«-Klassen einher, ist also eine Folge der schiefen Verteilung aller Beobachtungen der oberen Höhenintervalle, insbesondere ab 400 m.

¹⁷... nicht zum Anbau von Kulturpflanzen genutzte Fläche, die mit Gras, Wildkräutern und anderen Pflanzen bewachsen ist (ATKIS Objektartenkatalog V. 6.o.1).

¹⁸... beschreibt den Bewuchs einer Grünlandfläche mit Obstbäumen (ATKIS Objektartenkatalog V. 6.o.1).

¹⁹... eine Grasfläche, die gemäht oder beweidet wird (ATKIS Objektartenkatalog V. 6.o.1).

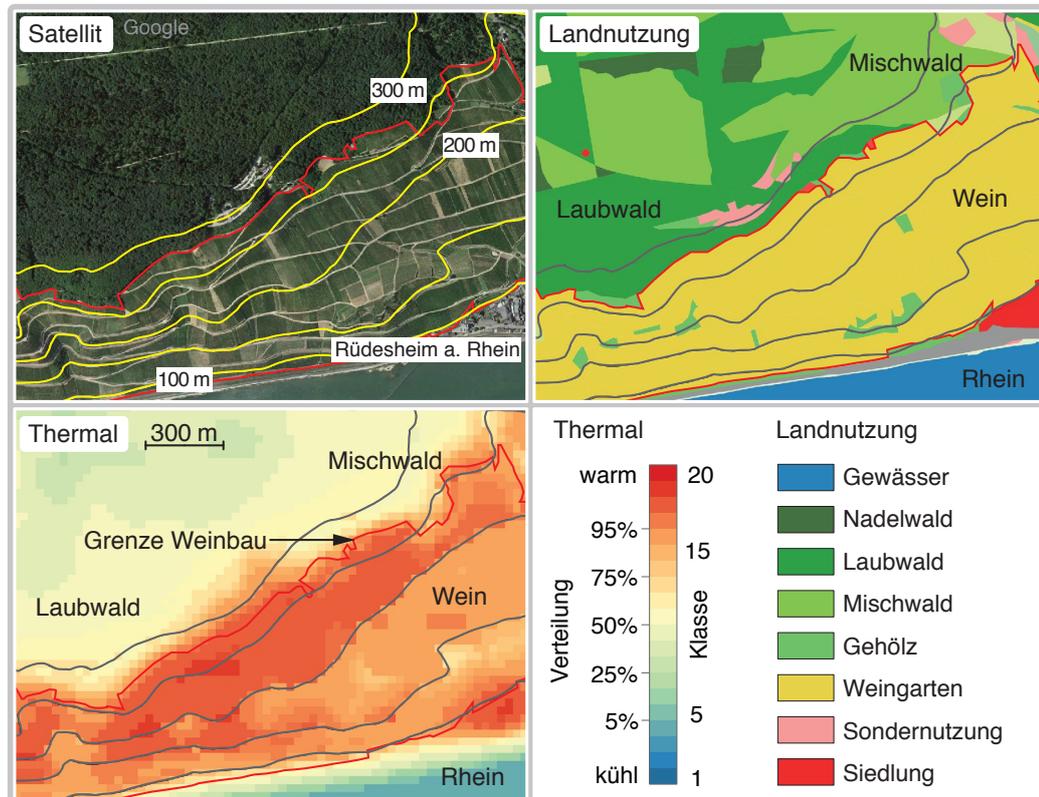


Abbildung 3.6: Landschaftsausschnitt bei Rüdesheim am Rhein. In klimatischen Gunstlagen, in den unteren Bereichen der südexponierten Hänge, wird hier wärmeliebender Wein angebaut. Die oberen Hanglagen werden von Wald dominiert. Oben links: Satellitenbild mit Höhenlinien (50 m Distanz) und rot gekennzeichnetem Grenzbereich zwischen Weinbau und anderen Landnutzungen. Oben rechts: Generalisierte Landnutzung (ATKIS-DLM, Höhenlinien grau). Unten links: Entsprechender Ausschnitt aus dem Thermalkomposit (30-m-Raster, Höhenlinien grau), zusammengesetzt aus separat gerechneten 50-m-Höhenintervallen der in Abb. 6.6 gezeigten potentiellen Biosphärenregion Rheingau-Taunus. Gut zu erkennen: Gunstlagen Weinanbau (rot, Zellen gehören i. d. R. zu den wärmsten 5 % der in Abb. 6.6 gezeigten Landschaft); Waldgebiete (gelb bis blaugrün), Rhein (blau).

3.4 Einfluss der Vegetation auf T_{Land}

Global betrachtet verdunstet pflanzliche Transpiration mehr als die Hälfte des Gesamtniederschlags (also Regen und Schnee!), der auf das Festland fällt. Auf diese Weise betreiben Pflanzen den volumetrisch größten kontinentalen Wasserfluss, der mehr Wasser transportiert als sämtliche Flüsse der Erde zusammengenommen (OKI & KANAE, 2006; JASECHKO ET AL., 2013; GOOD ET AL., 2015).

Auf das Untersuchungsgebiet bezogen lassen die Daten dieser Studie den Schluss zu, dass – unterhalb der Meta-Ebene von jahreszeitlichen Oszillationen, großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmustern und orographischen Gegebenheiten – das Vorhandensein von Vegetation, modifiziert durch deren Ausprägung und Vitalität, die Temperatur der Landoberfläche maßgeblich steuert.

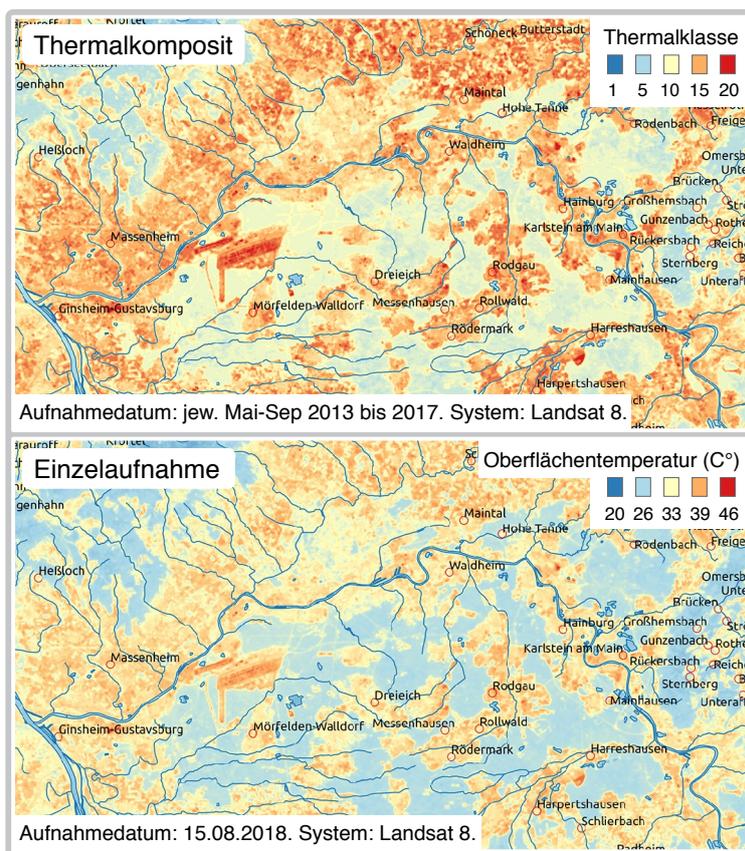


Abbildung 3.7: Der Vergleich von mehrjährigen Mediantdaten (oben; Zeitraum 2013–17, jeweils Vegetationsperiode Mai – September) mit einer Momentaufnahme von T_{Land} aus dem Dürre-Sommer 2018 (unten) legt nahe, dass sich, über absolute Temperaturschwankungen hinweg, das Muster der räumlichen Verteilung von T_{Land} nicht wesentlich ändert.

Da die Haupteinflussgrößen auf die Temperatur der Landoberfläche, nämlich Lufttemperatur und Niederschlag, nicht direkt beeinflussbar sind, bieten die Vegetationsparameter den wichtigsten Ansatzpunkt zur Kühlung einer Fläche. Vier, in direkter Relation zur Vegetation stehende, Einflussgrößen wurden als für die Kühlung der Landschaft wichtig identifiziert, nämlich die »Kronendichte« (TCD_{2015}), die »Pflanzenvitalität« ($NDVI$), die »nutzbare Feldkapazität« (BGR_NFK) und – den Pflanzenwuchs limitierend – der »Versiegelungsgrad der Landoberfläche« (IMD_{2015}).

Abbildung 3.8 zeigt, in Analogie zu Abb. 3.5, *THERMAL*-Beobachtungen, die nach Landnutzungs-klassen geordnet wurden. Am ausschließlichen Beispiel von Höhenintervall 150–200 m fokussiert Abb. 3.8 auf den Zusammenhang zwischen *THERMAL* und TCD_{2015} (oben), *THERMAL* und IMD_{2015} resp. *THERMAL* und $NDVI_{med}$ (unten). Während das Merkmal »Kronendichte« (TCD_{2015}) die Wald- und Vegetationsklassen besonders gut differenziert, zeigen »Versiegelungsgrad« und »Pflanzenvitalität« eher in den wärmeren Klassen mit der Zugehörigkeit »Siedlung« und »Verkehr« Effekte.

3.4.1 Kronendichte (TCD₂₀₁₅)

Der Prädiktor »Kronendichte« (*TCD₂₀₁₅*, vgl. Tabelle 10.2) bezeichnet den Grad der Flächenabdeckung durch Baumkronen auf einer Skala von 0 bis 100 %. Es zeigt sich, dass die bestgekühlten Landschaftsbereiche die höchste Kronendichte, sowohl (i) über alle Landnutzungsklassen einer Höhenstufen hinweg als auch (ii) innerhalb der einzelnen Landnutzungsklassen selbst (z. B. V_{AP} (»Grünland«) und V_B (»Gehölz«) in Abb. 3.8), aufweisen. Die *TCD₂₀₁₅* und T_{Land} sind, über alle betrachteten Höhenstufen hinweg, negativ hoch-korreliert (Abb. 3.4) – Bereiche mit hohem *TCD₂₀₁₅* haben ein verhältnismäßig geringes T_{Land} und umgekehrt.

Außerhalb der Wälder befinden sich Flächen mit hoher Kronendichte grundsätzlich in den kühlen 50 % der Temperaturverteilung, und oftmals sogar noch weit unterhalb diesen Wertes. Innerhalb einzelner Landnutzungen, abgesehen von Wäldern und Gehölzen, kommen hohe Kronendichtewerte überhaupt nur unterhalb des Interquartilsabstandes (d. h. unterhalb von $p = 0.25$) vor.

Forschungsergebnisse der letzten Jahre bestätigen die oben genannten Zusammenhänge zwischen Kronendichte und T_{Land} . ROGAN ET AL. (2013) z. B. nutzen für ihre Studie den außergewöhnlichen Umstand der kurzfristigen Abholzung von ca. 30.000 Stadtbäumen, die dem Befall durch eine invasive Käferart ausgesetzt waren²⁰. Mithilfe von Thermaldaten der Fernerkundung bestimmen die Autoren Veränderungen von T_{Land} , die sie mit der massiven Abholzung in Zusammenhang bringen. Die Autoren zeigen in ihrer Studie, dass, für siedlungsgroße urbane Bereiche (Stadtgebiet von Worcester, MA, USA), der Verlust von nur ~10 % Kronenbedeckung einen mittleren 0.7-K-Anstieg von T_{Land} im Zusammenhang steht. Für zwei Unterbezirke des untersuchten Siedlungsraumes, in denen es zwischen 2008 und 2010 zu einer Abholzung von 48 % des Baumbestandes kam, beziffern die Autoren den mittleren Anstieg von T_{Land} sogar auf 2.4 K. Damit, so schlussfolgern die Autoren, ist der generelle Temperaturanstieg infolge der Abholzung durch Käferbefall vergleichbar mit publizierten Temperatureffekten der Ausdehnung von Wohngebieten in Waldgebiete.

3.4.2 Versiegelungsgrad (IMD₂₀₁₅)

Dieselbe Studie kommt zu der Erkenntnis, dass der Verlust von Bäumen über versiegelten Flächen in den besonders stark abgeholzten Bereichen einen vergleichsweise größeren Teil des beobachteten Temperaturanstieges erklärt als auf das gesamte Untersuchungsgebiet bezogen hierdurch erklärt werden kann (ROGAN ET AL., 2013)²¹.

Die Frage stellt sich, ob der Verlust von Stadtbäumen in weniger versiegelten und verdichteten Siedlungsbereichen ebenfalls eine nachweisbare Rolle spielt. ELMES ET AL. (2017) gehen dieser Frage für dasselbe Untersuchungsgebiet auf vier räumlichen Skalen (Stadt, Nachbarschaft, Straße und Grundstück) nach. Im Rahmen ihrer Studie können ELMES ET AL. (2017) dann sogar für die weniger verdichteten, suburbanen Bereiche (auf allen vier genannten räumlichen Skalen) ihres Untersuchungsgebietes ein Temperatursignal durch den Verlust von Stadtbäumen identifizieren.

²⁰Über 80 % der Stadtbäume waren befallen. Als Grund für die hohe Suszeptibilität des Baumbestandes der untersuchten Stadt (Worcester, MA, USA) wird v. a. seine quasi-monokulturelle Zusammensetzung gesehen (FREILICHER ET AL., 2008).

²¹Für die erwähnten Bezirke mit den höchsten Verlusten des Baumbestandes zeigt sich, dass 10 % mehr entblößte versiegelte Oberfläche Temperaturanstiege von mehr als 1.5 K zur Folge haben.

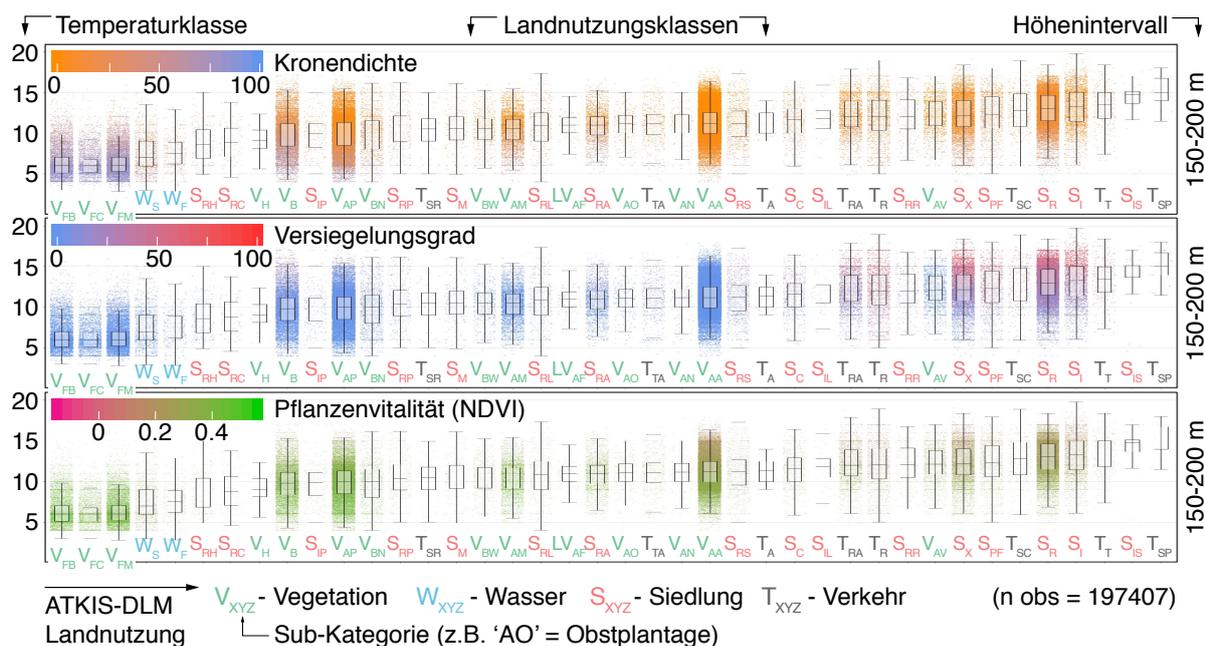


Abbildung 3.8: Temperaturen der Landoberfläche im Höhenintervall 150–200 m für Hessen in Temperaturklassen (y li., vgl. Tabelle 10.1), nach Landnutzung (x) und in Höhenintervallen (y re.). Die einzelnen Landnutzungen sind mithilfe von Boxplot-Diagrammen visualisiert (Whisker = 1,5 x IQR). Die Datenpunkte sind nach den Variablen Kronendichte, Versiegelungsgrad und Pflanzenvitalität koloriert; Landnutzungsklassen siehe Kennung unter Boxplot (Struktur Landnutzungsdaten: Abb. 10.2, Erklärung der verwendeten Kennungen: Tabelle 3.2).

Die Autoren zeigen nicht nur, dass der Verlust von Stadtbäumen einen Anstieg der Oberflächentemperatur (und damit eine Verlängerung der sommerlichen Wärmephase um bis zu zwei Wochen) bewirkt, sondern dass, in der Umkehr dessen, Neupflanzungen temperatursenkende Effekte haben. Auf allen untersuchten räumlichen Skalen ist der Verlust von Stadtbäumen besonders wirkungsvoll für die Oberflächentemperatur wenn dabei versiegelte Flächen entblößt werden.

Der Prädiktor »Versiegelungsgrad« (IMD2015, vgl. Tabelle 10.2) gibt – analog zur »Kronendichte« auf einer Skala von 0 bis 100 % – an, in welchem Maße die vom Satelliten sichtbare Erdoberfläche versiegelt, und damit medienundurchlässig ist. Es liegt auf der Hand, dass Flächen mit hohem IMD2015 grundsätzlich in Bereichen liegen, die im ATKIS-DLM als Siedlungs- resp. Verkehrsflächen klassifiziert sind. Flächen der Klassen »Gewässer« und »Vegetation« sind generell unversiegelt, was die Qualität der IMD2015-Daten unterstreicht.

In Abb. 3.8 wird, IMD2015 der Landoberfläche betreffend, folgender Zusammenhang deutlich: die wärmsten Beobachtungen weisen, klassenübergreifend wie auch klassenintern, einen hohen Grad an Oberflächenversiegelung auf. Die dahinterstehenden Mechanismen liegen auf der Hand – die Versiegelung von Landoberfläche

- behindert Pflanzenwuchs und Aktivitäten von Bodenorganismen (FERGUSON, 2005),
- modifiziert Stoff- und Energieflüsse der kritischen Zone, d.h. jenes schmalen Bereiches zwischen unverwittertem Ausgangsgestein und der Spitze der Vegetation, in dem sich das

Leben auf der Erde abspielt²² (GIARDINO & HOUSER, 2015),

- behindert den Abbau von, i. d. R. anthropogenen, Schadstoffen durch Bodenorganismen (FRAZER, 2005),
- hemmt Verdunstungs- und Versickerungsprozesse (FERGUSON, 2005),
- kann somit Grundwasserleiter komplett vom hydrologischen Kreislauf abkoppeln (FRAZER, 2005),
- fördert einen schnellen Oberflächenabfluss (FERGUSON, 2005) von, in der Sommerzeit durch die warme Oberfläche oftmals zusätzlich aufgeheiztem, Wasser (FRAZER, 2005) und
- fördert Erosionsprozesse und steigert die Gefahr von katastrophalen Überschwemmungen.

Die oben genannten Effekte der Versiegelung sind somit als generell nachteilig für die Kühlung der Landschaft auf Basis eines intakten Landschaftswasserhaushaltes zu betrachten. Deshalb kommt, bei der Auseinandersetzung mit Einflussfaktoren auf die Temperatur der Landoberfläche, *IMD2015* eine entscheidende Rolle zu.

3.4.3 Pflanzenvitalität (NDVImed)

Der »Normalized Difference Vegetation Index« (*NDVI*) basiert auf dem Reflektionsverhalten vitaler chlorophyllhaltiger Vegetation und kann somit als ein Maß ihrer Vitalität interpretiert werden. *NDVImed* und T_{Land} sind, über alle Höhenstufen hinweg, positiv korreliert, wobei die Stärke dieses Zusammenhanges mit steigender Höhe sinkt.

Trotz der, verglichen mit *TCD2015* und *IMD2015*, eher schwachen Performanz von *NDVImed*, zeigt sich die Pflanzenvitalität im Rahmen dieser Studie als wichtiger Prädiktor für die Ausprägung von T_{Land} in den landwirtschaftlich geprägten Bereichen der ATKIS-Klasse »Vegetation« .

Die Absenz von Bäumen und Versiegelung auf Ackerflächen macht hier das Hinzuziehen eines weiteren Prädiktors erforderlich (Gleiches gilt natürlich grundsätzlich für Landnutzungen, die durch Kronendichte und / oder Versiegelungsgrad nicht charakterisiert werden können). In Abb. 3.8, Klasse V_{AA} (»Vegetation Ackerland«) zeigt sich ein Zusammenhang zwischen T_{Land} und der Pflanzenvitalität, insbesondere Beobachtungen oberhalb der IQR haben hier ein geringes *NDVImed* – auf diesen Äckern fehlen vitale Pflanzen. Ein vergleichbares Bild zeigen Beobachtungen der Klassen »Verkehrsbegleitfläche« (T_{RA}), »Siedlung Mischnutzung« (S_X), »Wohnbau unspez.« (S_R) und »Industrie & Gewerbe unspez.« (S_I).

3.4.4 Nutzbare Feldkapazität (BGR_NFK)

Der Prädiktor *BGR_NFK*, d. h. die nutzbare Feldkapazität (vgl. Tabelle 10.2, BGR (2015)), ist ein Maß für das Vermögen von Böden, pflanzenverfügbares Wasser zu speichern. Dieses Speichervermögen

²²Der Begriff der **Critical Zone** stammt aus den englischsprachigen Geowissenschaften und adressiert den verletzlichen Layer zwischen oberflächennahem Erdinnerem und Atmosphäre, der durch komplexe Wechselwirkungen zwischen Gestein, Wasser, Boden, Luft und Lebewelt gekennzeichnet ist.

wird v.a. durch die Bodenart (z. B. Sand), die Lagerungsdichte eines Bodens sowie seinen Humusgehalt determiniert. Das Vorhandensein von pflanzenverfügbarem Wasser steht in direktem Kontext mit der Pflanzenvitalität (LICHTENTHALER, 1996; MENGEL & KIRKBY, 2001). Trotzdem lässt sich aus den vorliegenden Daten kein diesbezüglicher Zusammenhang erkennen.

Ein möglicher Grund für das schlechte Abschneiden von *BGR_NFK* könnte die geringe Kopplung dieses Prädiktors an die abhängige Variable, also an *THERMAL* sein. Die Verdunstung durch die Vegetation ist von der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit, also vor allem der Bodenfeuchte abhängig. Über die tatsächliche Bodenfeuchte gibt die *nFK* jedoch keine Auskunft, wenngleich die Wasserverfügbarkeit für die Vegetation an Standorten mit hoher *nFK* bei Trockenzeiten länger anhält (Dimension: Tage). Diese Bedingungen treten jedoch offenbar nicht häufig genug auf, als dass sie in den Daten deutlich sichtbar wären.

Unbedeckter Boden ist in ländlichen Bereichen während der Vegetationsperiode die Ausnahme. Die Temperatur der Landoberfläche wird auf vom Satelliten sichtbaren Flächen, z. B. dem Kronendach eines Waldes, gemessen. Bei dem Großteil der Beobachtungen steht die Vegetation demnach zwischen dem Boden und der erfassten Oberfläche, was ein direktes Feedback unterbindet und sich in einem Mangel an Korrelation niederschlägt.

Zudem beruhen die in dem Datensatz *BGR_NFK* vorhandenen Werte nicht auf direkten Messungen auf der Fläche, sondern auf Übertragungen von Kenntnissen, die anhand bodensystematischer Einheiten abgeleitet wurden. Hinzu kommen unterschiedliche Maßstäbe der Daten (Zellgröße der *BGR_NFK* von 250×250 m größer als die Temperaturdaten).

Jedoch besteht auch keine erkennbare Korrelation zwischen den *nFK*-Daten (*nFK* im durchwurzelbaren Bodenraum) der für Hessen vorliegenden Bodendaten im Maßstab 1:50.000 (HLNUG, 2019) und *LST*. Zur Überprüfung wurden diese *nFK*-Daten mit den ermittelten Oberflächentemperaturen (*THERMAL*) und der Landnutzung der *ATKIS*-Daten verschnitten und ausgewertet. Als Gründe für die fehlende Korrelation dürften die oben angeführten ausschlaggebend sein.

4 Rolle der Planung bei der Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes zum Schutz des Klimas

4.1 Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen einschließlich des Klimas im Naturschutz-, Umwelt- und Planungsrecht

4.1.1 Internationales Recht, nationale Gesetze

Der Schutz des Klimas ist eine internationale Aufgabe, die ausgehend von der Klimarahmenkonvention 1992 über das Kyoto-Protokoll bis hin zum Pariser Abkommen 2015 schrittweise konkretisierend ausgestaltet wurde. Schwerpunkt ist hierbei die Reduzierung der Treibhausgase, wozu entsprechende Minderungsziele vereinbart wurden. In diesem Zusammenhang wird auch der Beitrag der Landnutzung und von Landnutzungsänderungen diskutiert, die einen wesentlichen Einfluss auf die Klimagasemissionen haben, aber auch zur erneuten Bindung von Kohlendioxid beitragen können (HARGITA ET AL., 2016).

Diese Ziele sind auf EU-Ebene weiter untersetzt mit den Klima- und Energierahmen 2020 und 2030, jeweils mit dem Ziel der THG-Reduktion, besonders im Energiebereich. Die Bundesregierung wiederum hat sowohl ein Energiekonzept (2010), ein Aktionsprogramm Klimaschutz (2014), den Klimaschutzplan 2050 und zuletzt das Klimaschutzprogramm 2030 und das Klimaschutzgesetz beschlossen. Eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen untersetzen dies, wie z. B. das EEG.

4.1.2 Klimaschutzpläne

Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung greift die Bedeutung der Landnutzung auf und fordert etwa die schrittweise Einstellung der Torfgewinnung sowie den Schutz kohlenstoffreicher Böden (Dauergrünland, Torfmoore, Feuchtgebiete). Hier sind jedoch noch keine Anpassungsmaßnahmen, die auch den Wasserkreislauf adressierten, eingeschlossen.

Hessen hat mit dem „Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025“ das Blickfeld über die Vermeidung der Treibhausgasemissionen hinaus auch auf die Anpassung an die Folgen des Klimawandels ausgeweitet. Hier werden verschiedene Handlungsfelder aufgeführt, unter anderem auch der Landschaftswasserhaushalt und die Landnutzung. Das vermehrte Auftreten von Starkregenereignissen wird ebenso wie steigende Temperaturen und Trockenstress für die Land- und Forstwirtschaft thematisiert. Die Förderung des Wasserrückhalts wird explizit als mögliche Maßnahme zur Minderung von Schäden durch Starkniederschläge benannt.

Darüber hinaus sind mittlerweile für eine Vielzahl von Kommunen Klimaschutz- und teilweise auch Klimaanpassungspläne aufgestellt worden, die im Rahmen dieser Studie jedoch nicht betrachtet wurden.

4.1.3 Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel in der Raumordnung

Das ROG nennt den Schutz der Funktionsfähigkeit des Landschaftshaushaltes einschließlich des Klimas in §2 (2) Nr. 6 explizit. Dort sind sowohl die Funktionsfähigkeit der Böden, die des Wasserhaushaltes, der Tier- und Pflanzenwelt sowie des Klimas einschließlich der Wechselwirkungen als grundsätzliche Zielsetzung benannt. Weiterhin soll nicht nur den Erfordernissen des Klimaschutzes Rechnung getragen werden, sondern auch den Anpassungen an den Klimawandel. Maßnahmen, die der Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes mit dem Ziel der Abkühlung der Bodenoberfläche und der bodennahen Luft vorgeschlagen werden, lassen sich also direkt aus der Zielsetzung des ROG ableiten.

In §8 (1) Nr. 2 ROG wird weiter untersetzt, dass bei der Umweltprüfung zur Aufstellung der Raumordnungspläne sowohl Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft zu berücksichtigen sind. Das HLPG greift den Klimaschutz sowohl bei der Aufstellung des Landesentwicklungsplans (§7 (2) Nr. 4), der Aufstellung der Regionalpläne (§9 (4) Nr. 7) als auch in den Raumordnungsverfahren (§18 (5)) auf.

Im BauGB werden sowohl Klimaschutz als auch Klimaanpassung als Beiträge der Bauleitplanung aufgegriffen (§1 (5) und (6) Nr. 7a). In den ergänzenden Vorschriften zum Umweltschutz (§1a (5)) werden Klimaschutz, Maßnahmen gegen den Klimawandel und zur Anpassung an den Klimawandel gesondert gewürdigt. Konsistent dazu sind diese Aspekte bei der Aufstellung der Flächennutzungspläne (§5 (2) Nr. 2b, 2c), bei städtebaulichen Sanierungsmaßnahmen (§136 (2) Nr. 1, (3) Nr. 1h, (4) Nr. 1) sowie bei Stadtumbaumaßnahmen (§171a (2) und (3) Nr. 1 und 6) ausdrücklich gefordert. Im Rahmen der Umweltberichte sind die Auswirkungen von Vorhaben auf das Klima und die Anfälligkeit von Vorhaben gegen den Klimawandel (Anlage 1, Nr. 2 b) gg) mit zu berücksichtigen.

4.1.4 Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel im Umweltrecht

Im Umweltrecht gibt es weitere Hinweise auf den Schutz des Klimas und die Anpassung an die Folgen des Klimawandels, die umfassender verstanden werden können. Das BNatSchG setzt das Ziel, die Leistungs- und Funktionsfähigkeit von Natur und Landschaft zu schützen (§1 (1) Nr. 2). Damit wird ein systemorientierter Schutzansatz gefordert, der ein integratives bzw. funktionales Naturverständnis voraussetzt und den Klimaschutz sowie die Klimawandelanpassung einschließt. Untersetzt wird dieses Ziel im §1 (3) Nr. 4, das den Schutz des Klimas und die Förderung der Klimawandelanpassung auch durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege fordert. Dabei zielt diese Forderung sowohl auf die Freihaltung von Flächen mit besonderer klimatischer Wirkung (Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete, Luftaustauschbahnen) als auch der Förderung erneuerbarer Energien ab. Diese sollen dann Eingang in die Landschaftspläne erhalten (§9 (3) Nr. 4 e). Dies gilt uneingeschränkt für Hessen; das HAGBNatSchG trifft hierzu keine weitergehenden oder abweichenden Aussagen.

Die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Landschaft ist über die Eingriffsregelung des BNatSchG (§14 (1)) zu sichern. Das schließt die Aspekte des Landschaftswasserhaushaltes und des Lokalklimas mit ein.

Das WHG bezieht sich explizit auf die Folgen des Klimawandels. Bei der Bewirtschaftung der Gewässer soll auch den Folgen des Klimawandels vorgebeugt werden (§6 (1) Nr. 5). Bei der Bewertung der Hochwasserrisiken (§73) und bei der Erstellung der Risikomanagementgebiete (§75) wird dies

aufgegriffen, ohne jedoch dies weiter zu konkretisieren. Der Bezug zu den Wassereinzugsgebieten wird insbesondere bei der Aufstellung der Bewirtschaftungspläne (§83) deutlich.

4.2 Steuerungsinstrumente, Maßnahmentypen in der Planung

4.2.1 Vorgelagerte Planungsebenen in der Landes- und Regionalplanung

Der LEP¹ für Hessen weist zahlreiche Bezüge zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel auf. Bereits bei der Darstellung der landesplanerischen Ausgangsbedingungen wird auf den deutlichen Klimawandel verwiesen (LEP Kap. 2). Die Anforderungen aus dem Klimawandel sind bei der Entwicklung des Siedlungsbestandes zu berücksichtigen (LEP 3.1-1 (G), LEP 3.2.1-1 (G), LEP 3.2.1-5 (G)), wie z. B. die Freihaltung klimarelevanter Freiflächen in verdichteten Räumen sowie die Stärkung „grüner und blauer Infrastrukturen“ (Grün- und Wasserflächen) zum Klimausgleich. Bei der Entwicklung neuer Siedlungsflächen sind klimarelevante Ausgleichsflächen zur Temperaturminderung mit zu beachten (LEP 3.2-4 (Z)).

Im Abschnitt zum Umwelt- und Naturschutz werden Maßnahmen zur Stabilisierung des Landschaftswasserhaushaltes gefordert (LEP 4.2.1-2 (G)), etwa in grundwasserabhängigen Landökosystemen oder naturnahen alten Wäldern. In der Begründung wird auch auf die Bedeutung der nährstoff- und wasserspeichernden Streuaufgabe alter, naturnaher Wälder verwiesen. Wertvolle Lebensräume, die gleichzeitig eine Bedeutung für die Klimawandelanpassung aufweisen, sollen erhalten und weiterentwickelt werden (LEP 4.2.1-11 (G)). Begründet wird dies mit ihrer Funktion als Wasser- und Stoffspeicher sowie ihrer hohen Verdunstung, die zum Temperaturengleich beiträgt. Dies zielt auch auf die Steigerung der Nachhaltigkeit der Landschaften ab. Auch Kompensationsmaßnahmen und Maßnahmen zum Artenschutz sollen zum Klimaschutz beitragen (LEP 4.2.1-12 (G)).

Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel werden im Abschnitt 4.2.3 des LEP dargestellt. Hierbei wird der Schutz des Lokalklimas als Klimaanpassungsmaßnahme, insbesondere regional bedeutsamer Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebieten, hervorgehoben, die über Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete planerisch ausgewiesen werden können (LEP 4.2.3-3 (Z), 4.2.3-4 (Z), 4.2.3-5 (G)). der notwendige Schutz der Waldflächen wird auch mit den Funktionen für den Klimaschutz betont (LEP 4.5-1 (G)), die als flächige Wasserspeicher regulierend auf Temperatur und Abfluss wirken.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Anpassung an die Folgen des Klimawandels und der Klimaschutz in der Landesplanung bereits jetzt berücksichtigt werden. Dabei werden auch die Bezüge zwischen dem Lokalklima und dem Landschaftswasserhaushalt hergestellt und der Schutz von Flächen mit besonderer Klimawirksamkeit, wie grundwassernahen Flächen oder naturnahen Wäldern, gefordert.

Die Regionalpläne, die für Nord-, Mittel- und Südhessen aufgestellt worden sind, konkretisieren die Festlegungen des LEP weiter. Der Schwerpunkt der Festlegungen liegt auf folgenden Aspekten:

- Vorranggebiete für besondere Klimafunktionen und regionale Grünzüge. Damit sollen die Entstehung und der Abfluss von Kalt- und Frischluft gesichert bzw. wiederhergestellt werden, etwa in dem regional bedeutsamen Luftleitbahnen von Bebauung freigehalten werden.

¹3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000, Beschluss der hessischen Landesregierung vom 27.03.2017

- Reduzierung des Ausstoßes lufthygienisch bedenklicher Stoffe, der CO₂-Immissionen und der Feinstaubbelastung.
- Förderung der erneuerbaren Energien.

Mit der Sicherung von Vorbehaltsgebieten für besondere Klimafunktionen wird auch eine Ausgleichsfunktion für thermisch belastete Räume verstanden.

Der Wasserrückhalt wird auch im Rahmen des Hochwasserschutzes benannt. Der Schwerpunkt liegt hier auf den gewässernahen (und damit überschwemmungsgefährdeten) Gebieten wie den Auen. Darüber hinaus wird jedoch auch gefordert, außerhalb der Vorranggebiete Maßnahmen in den Gewässereinzugsgebieten durchzuführen (z. B. RP Mittelhessen Nr. 6.1.4-9 (G)). Das Niederschlagswasser aus Siedlungsbereichen soll möglichst zurückgehalten und dann verdunsten, versickern oder genutzt werden.

4.2.2 Zulassungsverfahren mit Eingriffsregelung

Vorhaben, die zu einem Eingriff in Natur und Landschaft führen, sind entsprechend der Eingriffsregelung des BNatSchG zu prüfen. Die Regelung zielt darauf ab, nur unvermeidbare Eingriffe zuzulassen, deren Wirkung auf den Naturhaushalt zu minimieren (Vermindern und Vermeiden) und die verbleibenden nachteiligen Auswirkungen auszugleichen bzw. zu ersetzen (Kompensation). In diesem Zusammenhang benennt das BNatSchG auch das Klima als Ziel (Kap. 4.1.4). Die hessische Kompensationsverordnung benennt zum Klima die Beeinträchtigung horizontaler Luftaustauschprozesse in der Umgebung des Eingriffs, die zu bewerten sei. Hinweise auf die Bedeutung des Wasserrückhalts finden sich in der Kompensationsverordnung nicht.

Die Praxis spiegelt diese Situation. Längst nicht in allen Verfahren wird der Themenkomplex Klima überhaupt benannt. Am häufigsten wird dann der Einfluss auf Frischluftschneisen und auf Gebiete für die Kalt- und Frischluftentstehung untersucht. In der Regel wird davon ausgegangen, dass die mit den Vorhaben einhergehenden Beeinträchtigungen für das Klima nicht erheblich sind. In der Folge werden dann auch keine Maßnahmen festgelegt, die speziell der Klimawandelanpassung dienen.

4.3 Planerische Ansätze zum Schutz des Klimas in der Planung einschließlich Wirksamkeitskontrolle

Die Auswertung der rechtlichen Vorgaben und der bisherigen Ansätze der Planung ergibt folgendes Bild:

- Das BNatSchG und das ROG benennen die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes zum Schutzgegenstand. Allerdings liegt ein schutzgutübergreifendes, integratives Systemverständnis der Natur bzw. zu ihrer nachhaltigen Funktionsweise bislang nicht vor. Auch Planungen zum Schutz der Natur konzentrieren sich auf den Schutz ausgewählter Strukturen (z. B. seltene Arten oder Lebensräume). Dies gilt auch im Hinblick auf den Landschaftswasserhaushalt und seine Bedeutung für die Klimawandelanpassung.

- Zur Erfüllung der Anforderungen des BNatSchG, hier unter dem Aspekt des Klimaschutzes und der Klimawandelanpassung betrachtet, sollte daher die Optimierung der Naturhaushaltsfunktionen (sowohl im urbanen wie im ruralen Raum) unter Klima- und Nachhaltigkeitsaspekten in den Fokus rücken. Vorrangiger Betrachtungsgegenstand sollte dabei nicht der Schutz bestimmter Strukturen oder deren Erhalt in Teilräumen (z. B. über die Ausweisung von Schutzgebieten) sein. Vielmehr ist die Nutzung des Raumes intelligent so zu optimieren, dass deren wirtschaftliche Nutzung nachhaltig erfolgt und die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes verbessert.

Das Ziel der nachhaltigen Klimawandelanpassung mit Hilfe des Landschaftswasserhaushaltes ist deshalb die Optimierung der Kühlfunktion durch Rückhalt und Verdunstung des Wassers unter Einbeziehung des im Raum wirtschaftenden Menschen:

- möglichst flächendeckend auf der Ebene der Wassereinzugsgebiete und
- möglichst dezentral und weit oben im Einzugsgebiet beginnend (möglichst effizienter Rückhalt des Wassers und auswaschungsfährdeter Nährstoffe, dezentraler Hochwasserschutz)
- sowie unter intelligenter Mehrfachnutzung des Wassers zur Vermeidung unnötiger Grundwasserabsenkungen und damit sinkender Kühlfunktion der Landschaft.

Für den planerischen Teil sollen im Folgenden einige Vorschläge zur Verbesserung unterbreitet werden.

Der räumliche Bezugsraum der Planung sind in der Regel administrative Grenzen, die jedoch keinen Bezug zu den naturräumlichen Gegebenheiten aufweisen. Als Ausnahme davon sieht das Wasserrecht nach der Einführung der EU-WRR die Bearbeitung in den Grenzen von Wassereinzugsgebieten vor. Da der Fluss des Wassers maßgebend für die Wasserkreisläufe und für den Stofftransport mit dem Wasser ist, wäre es konsequent, auch andere Planungen mit landschaftlichem oder größerräumigen Bezügen auf der Ebene der Teileinzugsgebiete zu organisieren. Zweifelsfrei kann dies nicht gegen den Willen der Gebietskörperschaften erfolgen, zumal die Planungshoheit auf den verschiedenen Ebenen, etwa der kommunalen Ebene für die Bauleitplanung, garantiert ist. Dennoch gibt es bereits heute die Möglichkeit, über kommunale Grenzen hinaus kooperativ zu planen und bei Planungen, die größere Räume tangieren, ist es eingetübte Praxis, über die Einbeziehung aller Betroffener Lösungen zu erzielen.

Sollen ausgehend von dem erweiterten Verständnis des Landschaftswasserhaushaltes für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels Maßnahmen ergriffen und umgesetzt werden, so bietet sich hierfür die Landschaftsplanung an. Der Vorteil liegt darin, dass hier die gesamte Fläche beplant wird, die landschaftlichen Bezüge ohnehin ermittelt und dargestellt werden müssen und Synergien, etwa im Bereich des Naturschutzes, von Anfang an mit entwickelt werden können. Hierzu müssten die entsprechenden Maßnahmen bereits im Landschaftsprogramm angelegt werden, das dann in den LEP integriert wird. Davon ausgehend sind die Planungen über die Regionalplanung bis hin zur örtlichen Ebene weiter zu konkretisieren.

Inhaltlich bedarf es einer Erweiterung in dem Sinne, dass die Wechselwirkungen zwischen Wasserhaushalt, Klima, Stoffhaushalt und Vegetation/ Fauna stärkeren Eingang in die Planung finden. Zwar wird die Prüfung der Wechselwirkungen auch im Umweltrecht gefordert, ist aber in der Praxis zugunsten sektoraler Sichtweisen noch nicht stark ausgeprägt. Auch können manche Zusammenhänge erst auf der Ebene des (Teil-)Einzugsgebietes richtig erkannt werden. Aus

dem Wasserfluss von den Kuppen bis zum Ende des Wassereinzugsgebietes ergeben sich einige exemplarisch dargestellte Prüfpunkte, die bei der Planung mit zu bedenken sind:

- Je weiter oben im Einzugsgebiet Wasser zurückgehalten wird, desto kleiner und dezentraler können solche Maßnahmen erfolgen. Obwohl damit womöglich auf der übergeordneten landesplanerischen Ebene nicht mehr darstellbar, entscheiden sie doch wesentlich über den Erfolg dieser Maßnahme.
- Eng damit verbunden ist der Stoffrückhalt. Stoffe, die vor Ort bleiben, benötigen keine aufwändigen Maßnahmen einer Nachsorge. Können die Nährstoffe und basisch wirkenden Kationen gleich im Boden gehalten werden oder über bewirtschaftete Vegetationsstrukturen zurück geführt werden, so findet weder eine Belastung der Unterlieger (Bsp. Nährstoffeinträge in ein bislang nährstoffarmes Naturschutzgebiet) noch der Gewässer (Ziel des guten ökologischen Zustands) statt.
- Der Wasserrückhalt bedarf der Vegetation, die das zurückgehaltene Wasser auch wieder verdunsten kann. Hierzu eignen sich vor allem Gehölze, aber auch Feuchtgebietspflanzen. Grundsätzlich bieten sich ausgeräumte, vegetationsarme Landschaftsausschnitte für eine Anreicherung an. Im Einzelfall kann es hierbei zu Konflikten mit Belangen des Naturschutzes kommen (z. B. Offenlandbrüter), die zu prüfen und abzuwägen sind.
- Die Topographie rückt verstärkt in den Blickwinkel der Planung, da sie über Anfang und Ende des Wasserflusses bestimmt. Standorte, die besonders auswaschungsgefährdet sind, wie Kuppen und Steilhänge, bedürfen besonderer Aufmerksamkeit. Je nach Situation wäre hier ein Dauerwald eine Möglichkeit, um die Funktionsfähigkeit des Standortes auf Dauer sicherzustellen.
- Ein weiterer Ansatz sind frühere Feuchtgebiete, die heute durch Drainagen trockengelegt worden sind. Die Wiedervernässung solcher Bereiche trägt zum Wasserrückhalt in der Fläche und auch zum Artenschutz bei.
- Überall dort, wo die Vegetation mit ihren Wurzeln das Grundwasser erreicht, ist auch in längeren Trockenzeiten mit Transpiration und damit mit Kühlung zu rechnen. Diese besonders besonders verdunstungsaktive Landschaftsausschnitte sollten geschützt bzw. wieder hergestellt werden.

Die Aufzählung der möglichen angedeuteten, eher kleinteiligen Maßnahmen deutet eher auf die Berücksichtigung in der Landschafts- und Flächennutzungsplanung hin. Dennoch könnte analog zu anderen Belangen in der räumlichen Planung eine Kategorie von Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebieten für „Landschaftswasserhaushalt und Klimawandelanpassung“ eingefügt werden. Dies birgt jedoch zwei mögliche Konflikte in sich: Zum einen sind die Maßnahmen möglichst großflächig in den Wassereinzugsgebieten zu realisieren, d. h. eine Beschränkung auf kleinere Teilflächen führte nicht zum gewünschten Erfolg. Zum anderen beschränkte sich dieses Vorgehen ebenfalls auf bestimmte Teilgebiete als Strukturen und nicht auf eine dynamische Entwicklung der Landschaft hin.

Vorgeschlagen wird deshalb, weiterhin besonders verdunstungsaktive Gebiete mit einem grundsätzlichen Schutz zu belegen (sind zu erhalten, zu sichern und weiter zu entwickeln). Der Schwerpunkt des Handelns könnte dann auf den Teilflächen mit besonderen Defiziten in der Verdunstungsaktivität gelegt werden, in denen als Vorrang- oder Vorbehaltsgebieten entsprechende Umsetzungen

von Maßnahmen angestoßen werden sollen. Schrittweise könnte der Fokus auf andere Teilflächen verschoben werden, um den Landschaftswasserhaushalt und dessen Klimawirksamkeit landesweit zu verbessern.

Zur Ausweisung solcher Gebiete wird zur Identifikation und Ableitung von Suchräumen eine Methodik vorgeschlagen (Kap. 6.1 auf S. 93), die sowohl an den aus den multitemporalen Temperaturdaten gewonnenen Beobachtungen als auch an weiteren Kriterien, die auf Handlungsoptionen hin abzielen, ansetzt.

Auch bei der Bewertung von Eingriffen nach BNatSchG kann der Landschaftswasserhaushalt und dessen Einfluss auf die lokalen Temperaturen an der Bodenoberfläche und in der bodennahen Luft mit berücksichtigt werden. So können z. B. bei Änderungen der Landnutzung Prognosen über die spätere Überwärmung bzw. Kühlung der Flächen aus vergleichbaren Biotopen in der Umgebung abgeleitet werden (Kap. 2.6, Kap. 3.2). Eine Veränderung im Anteil der Gehölzvegetation ist hierüber deutlich ableitbar. Dabei ist zu gewährleisten, dass es sich nicht um eine einmalige Erfassung, wie sie z. B. sehr detailliert mit mobilen Thermalkameras durchgeführt werden können, handelt, sondern um eine multitemporal abgesicherte Aussage (Kap. 3.1.1).

5 Maßnahmentypen

5.1 Maßnahmentypen zur Verbesserung von Landschaftswasserhaushalt und Klima

5.1.1 Maßnahmentypen und konkrete Umsetzung

Nachfolgend werden Maßnahmentypen vorgestellt, die zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes und der Verdunstungskühlung beitragen können. Dies erfolgt – dem Charakter eines Maßnahmentyps entsprechend - in einer verallgemeinerten und zusammenfassenden Form. Auf der Umsetzungsebene bedarf es daher der standörtlich angepassten Planung und Konkretisierung. In diesem Zuge sind auch Konflikte mit anderen Belangen zu prüfen, z. B. Eigentumsbelange, wasserrechtliche Belange oder Naturschutzbelange. Insbesondere Naturschutzbelange können vielfältig auftreten. Auf sie wird daher bei den jeweiligen Maßnahmentypen gesondert verwiesen. Adressat dieser Maßnahmentypen ist die Landes- und Regionalplanung.

Die Wirksamkeit der Maßnahmen bezieht sich auf die Fläche, auf der diese durchgeführt werden und ggf. auf die direkt angrenzenden Bereiche. Die Wirkung einer Maßnahme ergibt sich daraus, dass durch diese mehr Verdunstungskühle entstehen kann, indem auf der betreffenden Fläche der Wasserrückhalt gestärkt und die Vegetationsdecke intensiviert wird.

Dargestellt ist eine Auswahl von Maßnahmentypen, die sich für die hier adressierten Ziele anbieten. Dennoch gibt es eine Reihe weiterer möglicher Maßnahmentypen, die ebenfalls zum Wasserrückhalt und zur Steigerung der Verdunstung beitragen können. Hierbei sei auch auf den WOCAT¹ verwiesen, einen Katalog der Vereinten Nationen mit Maßnahmen zur nachhaltigen Landwirtschaft. Dieser enthält auch Maßnahmen zum Wasserrückhalt, wie etwa die Anlage von Flutungspoldern zum Hochwasserschutz oder zur Wiedernutzung von Wasser, etwa aus Fischteichen. Auch die angepasste Nutzung organischer Böden einschließlich deren Wiedervernässung wird dort beschrieben. Eine Reihe von dort beschriebenen Technologien beschäftigt sich mit dem Sammeln von Wasser für bestimmte Ackerkulturen. Ein Teil der aufgelisteten Verfahren ist jedoch in Hessen nicht anwendbar, z. B. weil sie auf spezielle Kulturen wie Bananen oder Baumwolle abzielen oder diese für aride Gebiete entwickelt wurden.

5.1.2 Übersicht über mögliche Maßnahmentypen

Maßnahmentypen mit dem Ziel, Landschaftswasserhaushalt und Verdunstungskühlung zu verbessern, können unterschiedlich gegliedert werden, je nachdem, ob mehr der Wasserrückhalt oder

¹<https://qcat.wocat.net/en/wocat/>

mehr die Verdunstung im Vordergrund steht sowie abhängig davon, ob diese im urbanen oder im ruralen Raum geplant wird.

1. Maßnahmentypen im ländlichen Raum

a) Maßnahmentypen in der Landwirtschaft

Der Verbesserung des Wasser- und Stoffrückhaltes bei der landwirtschaftlichen Produktion und damit verbunden der Kühlfunktion der genutzten Flächen dienen u. a. folgende Maßnahmen:

- Maximierung der Humusanreicherung (einschließlich des Weinbaus), z. B. durch
 - Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten
 - Vermeidung von Schwarzbrachen
 - tiefwurzelnde Ackerfrüchte
 - konservierende Bodenbearbeitung
 - Belassen einer ausreichenden Menge an Ernterückständen auf den Flächen
 - Zugabe von Kompost nach den Regeln der guten fachlichen Praxis
- Steigerung der Infiltration und des Wasserrückhaltes, z. B. durch
 - Contour farming (Abbremsen des Wasserflusses und Infiltration in den Oberboden)
 - Vermeidung von Bodenschadverdichtungen
- Maximierung transpirierender und dadurch kühlender Vegetation, angepasst an den Standort, z. B. durch
 - die Landschaft strukturierende (bewirtschaftete) Gehölze (z. B. Kurzumtriebsstreifen)
 - Agroforstwirtschaft
 - Kurzumtriebsplantagen
 - Gewässerbegleitende Streifen von Feuchtgebieten, die ihrerseits bewirtschaftet werden können (z. B. Schilf, Weiden im Kurzumtrieb)
- vielgliedrige Fruchtfolgen mit hohem Anteil an Hauptkulturen mit hohem Wasserrückhaltevermögen (nachteilig: Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Gemüse, spät gesätes Wintergetreide)
- Mulden und Flachgewässer in Tälern und Senken
- Keyline design
- sachgemäße Wiedervernässung mit dem Ziel der Feuchtgebietenbewirtschaftung (z. B. Schilf-Polder)
- Klarwassernutzung in der Landwirtschaft, z. B. für nachwachsende Rohstoffe bzw. Energieträger (Schilf, Kurzumtrieb)

b) Maßnahmentypen in der Forstwirtschaft

Der Verbesserung des Wasser- und Stoffrückhaltes in der waldbaulich genutzten Fläche und damit verbunden auch von deren Kühlfunktion dienen u. a.

- extensiv bewirtschaftete, naturnahe Wälder auf auswaschungsgefährdeten Kuppenlagen
- Waldumbau zur Optimierung des Landschaftswasserhaushaltes

c) Maßnahmentypen des Naturschutzes

- Renaturierung der Fließgewässer (verzögerter Abfluss des Wassers aus dem Einzugsgebiet)
- Moor- und Feuchtgebietsrenaturierung
- Entwicklung naturnaher Wälder (Natura 2000-Gebiete, Prozessschutz im Wald etc.)
- Entwicklung von Auwäldern und Überflutungsbereichen

2. Maßnahmentypen im urbanen Raum

Der Verbesserung des Rückhaltes und der Verdunstung von (Niederschlags)wasser sowie dem sparsamen Umgang mit der Ressource Wasser (Mehrfachnutzung) dienen u. a.

- Maximierung der Dach- und Fassadenbegrünung
- Intensivierung der Stadtbegrünung (z. B. Baumpflanzungen, Entsiegelung, Aufwertung von Brachflächen u. a. durch (temporäre) Gehölzpflanzungen)
- Strategien, um mehr Wasser in der Stadt für Verdunstungszwecke zu halten (z. B. Techniken zur Speicherung von Niederschlag, Wasser als Gestaltungselement)
- Muldenspeicher
- Nutzung von Grauwasser zur Vermeidung unnötiger Grundwasserabsenkungen, ggf. in Kombination mit „Eigenversorgungsstrategien“ (kombinierte Aquakultur und Gemüseproduktion in der Stadt)

In Kap. 5.4 werden die Maßnahmen in Form von Maßnahmeblättern beschrieben, die lediglich in Maßnahmentypen für den ländlichen und den urbanen Raum gegliedert sind.

5.2 Wirksamkeit der Maßnahmentypen

5.2.1 Bewertungsansätze

Die Oberflächentemperatur und damit die mögliche lokale Kühlung hängt von dem Zusammenwirken einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit, etwa über den Wasserrückhalt auf dem Standort, und einer ausreichend verdunstungsfähigen Vegetation ab (Kap. 3). Beides wiederum ist, wie in Kap. 3 dargestellt, von einer Reihe von Standorteigenschaften abhängig. Dazu gehören z. B. auch Faktoren wie die Bodenart, die Lage im Wassereinzugsgebiet oder die Versorgung mit Grund- und Niederschlagswasser.

Maßnahmen zur Verbesserung der lokalen Kühlung durch Verdunstung müssen deshalb sowohl die Wasserversorgung als auch die mögliche Verdunstungsleistung berücksichtigen:

- Mit der Steigerung des Rückhalts von Niederschlags- oder Oberflächenwasser wird die Menge des Wassers, die überhaupt verdunstet werden kann, erhöht.
- Damit diese auch aktiv verdunstet wird, und so zu dem gewünschten Kühleffekt führen kann, muss eine standortangepasste Vegetation mit hoher Verdunstungsleistung vorhanden sein.

Je nach Standort gilt es, den Wasserrückhalt zu steigern, die Vegetation zu verändern oder auch auf beide Parameter gleichzeitig einzuwirken.

Die *flächenspezifische Wirksamkeit* einer Maßnahme ergibt sich dann aus der erzielten Steigerung (also der Veränderung gegenüber dem aktuellen Wert) der Verdunstung (ausdrückbar als L/m^2 oder mm).

Die *Gesamtwirksamkeit* einer Maßnahme hängt zudem davon ab, auf welcher Fläche diese umgesetzt wird und kann ausgedrückt werden durch die Menge zusätzlicher Verdunstung gegenüber dem vorherigen Zustand (ausdrückbar z. B. in L). Im Idealfall würde im Wassereinzugsgebiet auf möglichst großer Fläche dazu beigetragen werden, dass die Niederschläge vermehrt im Boden gespeichert, für die pflanzliche Produktion und Verdunstung genutzt und zu möglichst geringen Anteilen zu raschem Abfluss mit Stoffauswaschung und / oder Erosion führen.

Maßnahmen unterscheiden sich hinsichtlich dieser beiden Aspekte. Eine sehr hohe flächenspezifische Wirksamkeit kann z. B. mit der Wiedervernässung eines degradierten Feuchtgebietes erzielt werden, bei der sowohl viel Wasser zurückgehalten werden kann (z.B. durch das Schließen von Drainagegräben) als auch über die schrittweise Veränderung der Vegetation (z. B. hin zu Röhrriechen) die mögliche Verdunstungsleistung steigt. Diese Maßnahme kann aber nur für die begrenzte Fläche des früher vorhandenen Feuchtgebietes durchgeführt werden, so dass die Gesamtwirksamkeit durch die Fläche beschränkt ist. Anders hingegen kann z. B. die erreichte Steigerung des Humusanteils in einem Ackerboden begrenzt sein (z. B. verändert auf einem mittel sandigen Lehm die Humusanreicherung von einem schwach humosen Boden (1-2 M%) auf einen stark humosen Boden (4-8 M%) die nutzbare Feldkapazität um 4%). Wird die Maßnahme jedoch auf einer sehr großen Fläche durchgeführt, kann die Gesamtwirkung der Humusanreicherung die der Feuchtgebietsreaktivierung übertreffen, obwohl die flächenspezifische Wirksamkeit letzterer deutlich höher ausfallen kann.

In dem vorliegenden Gutachten werden in allgemeiner Form Maßnahmentypen beschrieben. Wie hoch die flächenspezifische Wirksamkeit einer Maßnahme tatsächlich ist, hängt in hohem Maße von den Ausgangsbedingungen und den standörtlichen Bedingungen ab. So ist die Bodenart und der aktuelle Humusanteil in einem Ackerboden mit ausschlaggebend für die aktuelle Verdunstungsleistung und auch für die überhaupt mögliche Steigerung des Wasserrückhaltes. Für die konkrete Auswahl von Maßnahmen sind deshalb *standort- und einzelfallspezifische Betrachtungen* unverzichtbar.

Die Gesamtwirksamkeit einer Maßnahme wiederum hängt von der Fläche ab, auf der die Maßnahme umgesetzt werden kann. Hier kann nur grob das Flächenpotential für den jeweiligen Maßnahmentyp abgeschätzt werden.

5.2.2 Bewertung der Wirksamkeit anhand von Beispielen

Nachfolgend werden Maßnahmen in den Kategorien „sehr hohe, hohe, mittlere und geringe Wirksamkeit“ beschrieben, wobei eine scharfe Kategorienabgrenzung schwierig ist, da die flächenspezifische Wirksamkeit von den aktuellen Standorteigenschaften, der Art der Maßnahme und dem Grad der Maßnahmenumsetzung abhängt.

Sehr hoch ist die Wirksamkeit derjenigen Maßnahmentypen, bei denen die natürlichen und flächenhaften Wasserspeicher mit ihrer verdunstungsaktiven Vegetation entwickelt werden.

Maßnahmen mit *sehr hoher flächenspezifischer Wirksamkeit* sind z.B.

- die Aufforstung von geeigneten Flächen mit Laubwald in Verbindung mit dem langfristigen Aufbau einer standortangepassten Humusschicht,
- die Renaturierung degradierter Feuchtgebiete und Gewässer,
- intensive Begrünung von Dachflächen verbunden mit dem Aufbau eines ausreichenden Wasserspeichers auf dem Dach.

Die Auswertung der Thermaldaten (Kap. 3) belegt die verdunstungsbedingte Kühlleistung, die von Wäldern und der Vegetation an Gewässerufeln ausgeht. Die Ufervegetation kann stellvertretend für die hohe Verdunstungs- und Kühlleistung von intakten, d. h. optimal mit Wasser versorgten Feuchtgebieten betrachtet werden. Deren hohe Verdunstungsleistung wird bereits in Abb. 16 hervorgehoben. Aber auch intensiv begrünte Dachflächen weisen eine im Vergleich zu einem unbegrünten Dach deutlich höhere Verdunstung auf.

Entsprechenden Maßnahmentypen kommt bei der Speicherung und Verdunstung des Niederschlages sowie der damit einhergehenden Kühlung eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere Wälder können in Abhängigkeit ihrer räumlichen Ausdehnung ein eigenes Innenklima ausbilden, das gegenüber der unbewaldeten Umgebung u. a. durch ausgeglichene Temperaturen charakterisiert ist.

Das räumliche Potential für die Umsetzung dieser Maßnahmen in Hessen ist als begrenzt einzuschätzen. Die Aufforstung von Flächen wird in Hessen aufgrund des bereits jetzt vergleichsweise hohen Waldanteils nicht aktiv verfolgt. Die Möglichkeiten, ehemals vorhandene Feuchtgebiete wieder zu renaturieren, sind von ihrer Flächenausdehnung her (auch durch die heutige Landnutzung) begrenzt. Die intensive Begrünung von Dachflächen ist nur auf einem Teil der Dächer aus statischen Gründen überhaupt möglich und Dachflächen stellen wiederum nur eine kleine Fläche im Vergleich zur Landesfläche von Hessen dar.

Hoch ist die Wirksamkeit von Maßnahmentypen, bei denen die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und die Verdunstung der Vegetation auf ausgewählten Teilflächen des bewirtschafteten

oder besiedelten Raums erhöht wird (im Landwirtschaftsbereich z. B. durch Muldenanlage, im besiedelten Raum z. B. durch die Anlage von Straßenbäumen und Grünanlagen). Für London werden von MONTEIRO ET AL. (2016) für den Sommer 2012 Kühleffekte von innerstädtischen Grünanlagen untersucht. Die Autoren kommen zu der Schlussfolgerung, dass Grünanlagen von 3-5 ha Größe in einem Abstand von 100-150 m zu einer flächigen Reduzierung der städtischen Überwärmung führten.

Beispiele für Maßnahmen mit einer *hohen flächenspezifischen Wirksamkeit* sind:

- die Verbesserung des Wasserrückhaltes durch Muldenspeicher, die Einführung hangparalleler Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Kulturen mit integriertem Wasserrückhalt,
- die Aufwertung städtischer Quartiere durch die Verdichtung der Begrünung mit Straßenbäumen und Grünanlagen.

Dort, wo Wasser entsprechend der veränderten orographischen Gegebenheiten zusammenläuft, kann auch mehr Wasser im Boden gespeichert und nachfolgend verdunstet werden. Anders als bei einem Feuchtgebiet handelt es sich dabei um jeweils kleinere Teilflächen, die durch die Versickerung dann auch wieder trockenfallen. Jedem Muldenspeicher ist ein kleines Teileinzugsgebiet zugeordnet, von dem aus das Wasser zuläuft und in dem die Verdunstung nicht erhöht ist.

Der positive Effekt der Gehölze und Grünanlagen konnte durch die Auswertung der Satellitendaten (Kap. 3) belegt werden. Die Kronendichte ist auch im städtischen Bereich ein wichtiger Parameter, der die jeweilige Thermalklasse mitbestimmt. Grünanlagen sind regelmäßig als kühler zu bewerten als unbegrünte Straßen, Plätze und Baugebiete.

Die Gesamtwirksamkeit für die genannten Maßnahmen zum kleinflächigen Wasserrückhalt wird als mittel bis hoch eingeschätzt, weil diese in weiten Teilen des reliefierten Landwirtschaftsgebietes umgesetzt werden könnte. Das Potential für Maßnahmen im Siedlungsbereich ist, bezogen auf die Landesfläche, begrenzt. Auch innerhalb des Baubestandes ist es schwierig, nachträglich den Anteil an Bäumen und Grünflächen zu erhöhen, wengleich dies den Einwohnern direkt zugutekommt.

Mittel ist die Wirksamkeit von Maßnahmentypen, bei denen mit Hilfe einer angepassten Bewirtschaftung bzw. Nutzung die Infiltrationsleistung auf der Landnutzungsfläche zwar gestärkt wird, aber nutzungsbedingt die Wasserretention nur geringfügig steigen kann.

Maßnahmen mit einer *mittleren flächenspezifischen Wirksamkeit* sind z.B.

- die Humusanreicherung und Dauerbegrünung im Ackerbau auf Flächen mit bislang geringer Wasserspeicherkapazität.

Die positive Wirkung der Humusanreicherung und der dauerhaften Begrünung zeigt das Verteilungsmuster der Temperatur der Landoberfläche in Hessen, nach dem Grünländer durchgängig kühler erscheinen als Ackerflächen (Abb. 3.5).

Durch die Humusanreicherung und Dauerbegrünung mittels Untersaaten und Zwischenfrüchten wird eine wichtige Verbesserung zur Kühlung durch Verdunstung erreicht. Auf zur Verschlammung

neigenden Flächen kann auch die Infiltration verbessert werden und so mehr Niederschlagswasser zurückgehalten werden. Dennoch ist die nutzbare Feldkapazität durch die Steigerung des Gehaltes organischer Substanz nur um einige Prozentpunkte zu steigern (Bodenkundliche Kartieranleitung, KA 5).

Die Gesamtwirksamkeit der Humusanreicherung und Dauerbegrünung hingegen wird aufgrund der weiten Verbreitung von Ackerflächen in Hessen als sehr hoch eingeschätzt.

Maßnahmen mit nur einer *geringen flächenspezifischen Wirksamkeit* werden nicht vorgeschlagen. Dies könnte z. B. die Humusanreicherung auf Flächen mit bereits heute hoher Wasserspeicherkapazität sein.

Eine noch stärkere Differenzierung der Wirksamkeit kann nur im konkreten Einzelfall standortabhängig ermittelt werden. Wie oben bereits dargelegt, müssten hierzu die Ausgangsbedingungen und Größe der Maßnahmenfläche (z. B. in Abhängigkeit des schon vorhandenen Humusanteils, Versiegelung) zugrunde gelegt werden. Dies ist im Rahmen des Grundsatzgutachtens nicht leistbar.

5.3 Funktionale Schnittstellen zum Boden-, Grundwasser-, Gewässer- und Naturschutz, gesundheitliches Wohlbefinden des Menschen

Die enge Verknüpfung zwischen Landschaftswasserhaushalt und bodennaher Lufttemperatur bietet einen Ansatz, um Maßnahmen abzuleiten (Kap. 2.5 auf S. 19). Es ist notwendig, diese Maßnahmen von vornherein auf mögliche Wechselwirkungen zu anderen Schutzziele zu prüfen, zumal sich zahlreiche Synergieeffekte erwarten lassen.

Einige Schnittstellen lassen sich grundsätzlicher beschreiben (Kap. 2.3). Mit den Maßnahmen sind deshalb auch positive Effekte auf bestimmte **Funktionen des Bodens** zu erwarten. Der Rückhalt von Wasser und damit die Abbremsung von Oberflächenabfluss reduziert die Gefahr der Erosion. Die Steigerung des Anteils an dauerhafter Begrünung, z. B. in Form von Gehölzen, erhöht zugleich die Beschattung und Kühlung, wodurch auf den betreffenden Flächen die Mineralisation herabgesetzt wird. Kommt es zu einer vermehrten Humusanreicherung, wird auch das Bodenleben verbessert.

Zum **Grundwasser** bestehen ebenfalls enge Anknüpfungspunkte. Der Rückhalt von Niederschlagswasser, etwa in Mulden oder durch eine quer zum Hang orientierte Bewirtschaftung, steigert zugleich die Versickerung und trägt damit zur Grundwasserneubildung bei. Durch eine verbesserte Retention des Niederschlagswassers mit Hilfe der Vegetation ist dieses Wasser länger im Wassereinzugsgebiet verfügbar. Gegenüber unbegrünten Flächen oder Flächen mit geringem Sukzessionsstadium kann dem beschleunigten Abfluss entgegengewirkt werden und das Niederschlagswasser verbessert sowohl die pflanzlichen Stoffwechselprozesse (Aufbau von Biomasse, Verdunstung) und kann auch zur Versickerung genutzt werden.

Für den **Gewässerschutz** stellt sich die Situation so dar, dass vor allem der qualitative Aspekt

verbessert wird. Maßnahmen, die Stoffausträge mindern, führen auch zu einer geringeren Nährstofffracht in den Fließgewässern, so dass die Wasserqualität verbessert wird. Zugleich wird über den dezentralen Rückhalt, z. B. über Muldenspeicher oder vor Gehölzreihen, die Wassermenge, die bei Starkregenereignissen abfließt, verringert und zeitlich gestreckt. Damit wird die hydraulische Belastung der Gewässer verringert und die Gefahr der weiteren Eintiefung gemindert. Werden in der Landschaft mehr Gehölze gepflanzt, so kann durch die Verdunstung die Abflussmenge verringert sein. Dafür ist, von der Tendenz her ähnlich wie bei einem Wald, zum Ausgleich die bessere Wasserqualität mit zu betrachten.

Die Auswirkungen auf den **Naturschutz** sind deshalb schwieriger zu bewerten, weil die möglichen Bewertungsmaßstäbe durchaus widersprüchlich sind. Offenlandbiotope auf Trockenstandorten, wie z. B. Borstgrasrasen oder Magerrasen, sind geschützte Biotope und liegen oftmals in Naturschutzgebieten oder FFH-Gebieten. Diese Flächen tragen nicht zur Kühlfunktion der Landschaft bei; diese tritt hinter den Schutz des jeweiligen Biotops zurück. Anders verhält es sich jedoch dort, wo naturnaher Wald, Gewässer oder Feuchtbiotope Schutzgegenstand sind, ob als geschützte Biotope, als Gebiet der Flächenkulisse Natura 2000 oder als Naturschutzgebiet. Hier zeigen sich deutliche Synergien zur Kühlfunktion, wie zahlreiche Schutzgebiete in Hessen zeigen. Die Anreicherung der Landschaft mit Gehölzstrukturen bietet Gebüschbrütern zusätzliche Lebensräume. Vermehrt Vegetation in den urbanen Raum einzubringen ist die Grundlage für eine Reihe von Arten, da stark versiegelte Flächen oder vegetationsfreie Dächer ansonsten nicht als Lebensraum dienen.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf das **Schutzgut Mensch** ergeben sich mehrere positive Effekte. Zuallererst sind die lokalklimatischen Veränderungen zu nennen, bei denen die abgemilderten Temperaturextreme sich für das Wohlbefinden der Menschen vorteilhaft auswirken. Darüber hinaus wirkt eine stärker mit Vegetation gegliederte Landschaft auch belebend auf das Landschaftsbild, ebenso wie mehr Grün in der Stadt von der Mehrheit der Menschen als angenehmer empfunden wird.

5.4 Beispiele für Maßnahmentypen

5.4.1 Maßnahmentypen im ländlichen Raum

Maßnahmenblatt Humusanreicherung	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input checked="" type="checkbox"/>	Hanglage <input checked="" type="checkbox"/> Tal <input checked="" type="checkbox"/>
Landnutzung	
Landwirtschaft <input checked="" type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/> Gewässer <input type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/> Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Die Erhöhung des Humusanteils im Oberboden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen dient der Verbesserung der Wasserspeicherkapazität der Ackerfläche. Eine erleichterte Infiltration senkt den Oberflächenabfluss und wirkt damit Erosions- und Denudationsprozessen entgegen, ein verbesserter Bodenspeicher verzögert die Austrocknung des Oberbodens.
Beschreibung:	Zur Anreicherung von Humus im Oberboden kann sowohl Biomasse von der Fläche selbst oder organische Substanz aus anderen Quellen eingebracht werden. Zu ersterem gehört, Ernterückstände auf dem Acker zu belassen. In Fruchtfolgen können tief wurzelnde Ackerfrüchte eingebunden werden, die mit der Wurzelbildung und durch die Abgabe von Wurzelexsudaten Kohlenstoff auch in die tieferen Bodenzonen bringen. Über eine ständige Pflanzenbedeckung (z. B. mit Hilfe von Zwischenfrüchten und Untersaaten) kann über die Hauptfrucht hinaus zusätzlich Kohlenstoff gebunden werden. Dieser kann dem Boden zugeführt werden, was z. B. in der regenerativen Landwirtschaft über eine Flächenrotte in Form einer 2 bis 3 cm tiefen Einarbeitung des Bewuchses erfolgt. Von außerhalb können organische Materialien wie Komposte eingebracht werden. Die hier vorgeschlagene Humusanreicherung zielt auf die Anreicherung der organischen Substanz auf Landwirtschaftsflächen im Boden ab und weniger auf die Ausbildung einer organischen Auflage, wie sie in Wäldern zu finden ist. Eine Humusanreicherung kann auch durch Umwandlung von Acker in Grünland z. B. im Rahmen der Eingriffskompensation bewirkt werden.
Synergieeffekte:	Mit Hilfe des höheren Humusanteils wird zugleich die Nährstoffversorgung für die Kulturpflanzen verbessert. Mit dem Anbau von Untersaaten und Zwischenfrüchten kann die Boden-erosion vermieden werden. Konflikte mit dem Naturschutz sind bei dieser Maßnahme i.d.R. nicht zu erwarten, aber zu prüfen. Diese könnten auf Sonderstandorten, wie Kalkscherbenäckern mit einer besonderen Segetalflora, auftreten.

Wirksamkeit:	Durch die Maßnahme kann zusätzlich Kohlenstoff im Boden gespeichert werden, dessen Umfang abhängig von der Art der Durchführung der Maßnahme und vom jeweiligen Standort ist.
Akteure & Umsetzung:	Landwirte
Bevorzugte Standorte:	Generell auf allen Standorten erwünscht. Besonders wirksam ist sie auf Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität und in Regionen mit eher niedrigerem Jahresniederschlag.
Hemmnisse:	Anpassung der Betriebsabläufe in der Flächenbewirtschaftung. Die Flächenbewirtschaftung muss zudem so ausgelegt sein, dass der Humusanteil auf Dauer erhöht bleibt. Bei einer Bewirtschaftungsänderung können zu hohe Humusgehalte rasch abgebaut werden und es kann zu erheblichen Nitratverlagerungen kommen.
Literatur:	DAWSON & SMITH (2007); ALLEN (2007); JONES (2008); BRUNEL-SALDIAS ET AL. (2018); FISCHER ET AL. (2019)
Beispiel:	Der Aufbau von Humus ist ein zentrales Ziel der "regenerativen Landwirtschaft". Dabei soll Kohlenstoff über die auf der Fläche wachsenden Pflanzen in den Boden eingetragen werden. Hierzu werden von den Befürwortern mehrere Schritte vorgeschlagen. Zuerst werden auf dem Gebiet der Bodenchemie ausgeglichene Nährstoffverhältnisse, eine ausreichende Basensättigung und Austauschkapazität durch gezielte Düngungen unter Beachtung der Düngeempfehlungen und der guten fachlichen Praxis angestrebt. Der zweite Schritt besteht in der möglichst durchgängigen Begrünung der Böden, zumindest während der Vegetationszeit. Das dritte Element der regenerativen Landwirtschaft besteht in der Flächenrotte. Dabei werden die Zwischenfrüchte zerkleinert und in die obersten Zentimeter des Bodens eingearbeitet, so dass die mikrobiellen Prozesse im Oberboden durch die Pflanzenbiomasse mit ihren Blattsäften und dem darin enthaltenen Zucker optimal gefördert werden. Nur, wenn dies notwendig erscheint, werden Böden als vierter Schritt des Bodenaufbaus auch einer Tiefenlockerung unterzogen, jedoch immer in Verbindung mit der Saat neuer Pflanzen zur raschen Stabilisierung des Bodengefüges. Als letztes Element wird über Blattspritzungen z.B. mit Komposttee versucht, die Vitalität der angebauten Pflanzen zu steigern. Es wird derzeit in Hessen geprüft, das System der regenerativen Landwirtschaft wissenschaftlich zu untersuchen. Anwender berichten von deutlichen Erfolgen und Ertragssteigerungen auf ihren Flächen. Ein Beispiel für regenerative Landwirtschaft ist der Landwirtschaftsbetrieb Reber, Schwäbisch Hall-Gailenkirchen.

Maßnahmenblatt Contour farming	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input type="checkbox"/>	Hanglage <input checked="" type="checkbox"/>
Tal <input type="checkbox"/>	
Landnutzung	
Landwirtschaft <input checked="" type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Gewässer <input type="checkbox"/>
	Landschaftselemente <input type="checkbox"/>
	Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Diese Form der Bewirtschaftung soll das Erosionsrisiko senken und den Wasserrückhalt in der Fläche steigern, indem hangabwärts fließendes Wasser durch die parallel zum Hang angelegten Pflanzenreihen aufgehalten wird.
Beschreibung:	Die Bewirtschaftung der Ackerfläche erfolgt entlang der Höhenlinien des Hangs und folgt damit dem Relief der Landschaft. Die Pflanzenreihen reduzieren den Hangabfluss und erhöhen die Versickerung direkt bei den Pflanzen. Es entstehen keine bevorzugten Fließwege, sondern das Wasser wird auf der Fläche verteilt. Contour farming kann auch mit dem Streifenanbau (strip cropping) kombiniert werden. Für die Aufteilung der Flächen entsprechend der Geländemorphologie wird das Keyline-Design beschrieben.
Synergieeffekte:	Reduzierung des Nährstoffverlusts, so dass weniger Düngung erforderlich ist. Zugleich können Erntereste verbleiben und so die Menge an organischer Substanz erhöhen.
Wirksamkeit:	Verringerung der Erosion im Vergleich zu Flächen mit Bewirtschaftung hangauf- und -abwärts (die Höhe des Effekts ist immer standortspezifisch).
	
<p><i>Die Sicherung eines Hanges durch hangparallele Bermen und Bepflanzung erinnert an das Contour-Farming, dass in Deutschland bislang kaum zu finden ist. Foto: Hildmann.</i></p>	

Akteure & Umsetzung:	Landwirte; Anreize über Prämienzahlungen basierend auf cross compliance für die Einhaltung eines guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustands sind denkbar.
Bevorzugte Standorte:	Flache, nicht zu steile Hänge; in Kombination mit Streifenanbau, bei dem sich Feldstreifen mit und ohne Ackerpflanzen abwechseln, können auch längere und steilere Hänge bewirtschaftet werden mit dem Ziel der Erosionsminderung.
Hemmnisse:	Anpassung der Betriebsabläufe in der Flächenbewirtschaftung; Verkleinerung der effektiven Anbaufläche durch unbebaute Feldstreifen und Feldbereiche zum Wenden der Landmaschinen; wenig Erfahrungen bei der Umsetzung und dem Effekt auf die Erosionsminderung in Deutschland.
Literatur:	https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/wi/technical/cp/?cid=nrcs142p2_020785 ; https://www.envirothonpa.org/documents/WSS_Intro_to_Soils_part2.pdf SVOMA ET AL. (2016); KULLIK (2016); HILL (2003)

Maßnahmenblatt Agroförstwirtschaft	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input checked="" type="checkbox"/>	Hanglage <input checked="" type="checkbox"/>
Tal <input checked="" type="checkbox"/>	
Landnutzung	
Landwirtschaft <input checked="" type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Gewässer <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Erhöhung der Verdunstungsleistung durch die Integration von Bäumen in die landwirtschaftliche Nutzung und damit die Kühlung der Umgebung sowie Rückhalt von Wasser im Bereich der Pflanzung.
Beschreibung:	<p>Landnutzungssystem aus Gehölzen und Ackerkulturen bzw. Tierhaltung, die auf einer Fläche kombiniert werden, so dass zwischen den verschiedenen Komponenten ökologische und ökonomische Vorteilswirkungen entstehen.</p> <p>Die Gehölze sollen dabei auch genutzt werden. Möglich ist eine forstwirtschaftliche Nutzung, in dem Edellaubbäume angebaut werden (z. B. als Furnierholz). Energieholz im Kurzumtrieb (S. 70) kann in Form von Streifen oder kleinen Gruppen integriert werden. Die Nutzung von Obstbäumen, wie sie in Deutschland früher traditionell erfolgte (z. B. Obstbaumalleen), ist ebenfalls eine Variante.</p> <p>Der Anteil an Gehölzen beträgt zwischen etwa 2 und 40 %. Auf den nicht von Gehölzen bestandenen Flächen ist sowohl der Anbau von Feldfrüchten als auch die Tierhaltung (Beweidung, Geflügelhaltung) möglich. Auch die Haltung von Bienen kann integriert werden.</p> <p>Auf Kompatibilität von Baumarten und Kulturpflanzen muss geachtet werden. Vor allem Baumarten mit hohem Wasserbedarf verursachen unnötig Konkurrenz.</p>
	
	<p><i>Traditionelle Form der Agroförstwirtschaft, in der die einzelnen Parzellen durch Gehölzreihen voneinander getrennt sind. Foto: Hildmann.</i></p>

Synergieeffekte:	Erosionsschutz durch Baumwurzeln, Windschutz, Erhöhung der Biodiversität, Mehrfachnutzung, Reduzierung der Gefahr von Totalausfällen, Schutz vor Überhitzung durch Schattenwurf der Bäume, Humusanreicherung durch Laub, Ertragssteigerung auf der Ackerfläche, geringerer Dünger- und Pestizideinsatz, Holznutzung, CO ₂ -Bindung, weniger Nitrataustrag (bei Tierhaltung). Konflikte mit dem Naturschutz könnten bei einem Vorkommen von Arten auftreten, die auf großflächiges Offenland angewiesen sind und im Vorfeld zu prüfen und abzuwägen.
Wirksamkeit:	Bäume erreichen tiefliegendes Wasser; aufgrund des höheren Baumanteils erhöht sich die Verdunstungsleistung der Gesamtfläche, die als „Kühlrippen“ die gesamte Fläche beeinflussen. ZHANG ET AL. (2018): 3,4 mm/Tag mehr Verdunstung auf der Fläche Bäume-Gras als auf Ackerfläche für eine Karstlandschaft in einem feuchten subtropischen Klima
Akteure & Umsetzung:	Landwirte
Bevorzugter Standort:	Große Ackerschläge bzw. ausgeräumte Agrarfluren
Hemmnisse	Eingriff in bestehende Nutzungssysteme, langfristige Entscheidungen, rechtliche Rahmenbedingungen, hohe Erstinvestition, Eigentumsverhältnisse
Literatur:	https://agroforst-info.de/agroforstwirtschaft/ DUPRAZ & NEWMANN (1997); GORDON ET AL. (1997); HERZOG (1997); HERZOG ET AL. (1997); HERZOG (1998); KÜRSTEN (2000); LUICK & VONHOFF (2009); WAGENER (2009); WARD ET AL. (2012)

Maßnahmenblatt Kurzumtriebsplantagen	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input checked="" type="checkbox"/>	Hanglage <input checked="" type="checkbox"/> Tal <input checked="" type="checkbox"/>
Landnutzung	
Landwirtschaft <input checked="" type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/> Gewässer <input type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/> Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Gehölze erhöhen die Verdunstungsleistung auf der Ackerfläche.
Beschreibung:	Auf Ackerflächen werden schnellwachsende, stockausschlagsfähige Baumarten (bevorzugt Pappel und Weide) mit kurzer Umtriebszeit (5-20 Jahre) angepflanzt; die Bäume werden in regelmäßigen Abständen geerntet und hauptsächlich zu Hackenschnitzeln zur Energiegewinnung verarbeitet.
Synergieeffekte:	Die Auswirkungen von KUP auf den Bodenwasserhaushalt sind standort- und situationsabhängig. Durch die lange Bodenruhe verbessert sich die Bodenstruktur durch Bodenlebewesen, Humus kann aufgebaut werden. Der Wasserrückhalt wird gesteigert und durch die Gehölze ist die Verdunstungsleistung höher als bei anderen landwirtschaftlichen Kulturen. Die Flächen werden während der Rotationsperiode i.d.R. nicht gedüngt, so dass die Qualität des Sickerwassers verbessert wird. Ebenso werden Herbizide oder Pestizide nur in Ausnahmefällen angewendet. Durch die ganzjährige Bodenbedeckung können Kurzumtriebsplantagen auch zur Reduzierung der Erosion eingesetzt werden. Durch den Stoffrückhalt in KUP-Streifen können Fließgewässer auch vor Stoffeinträgen geschützt werden bis hin zur Phytoremediation von verunreinigtem Grundwasser (GUIDI NISSIM ET AL., 2014). Durch die relative Störungsarmut können die Flächen auch einen Beitrag zur Biodiversität leisten, etwa für Gebüschbrüter. Für die Landwirtschaft bieten Kurzumtriebsplantagen eine langjährige Wertschöpfung. Konflikte mit dem Naturschutz sind bei dieser Maßnahme im Vorfeld zu prüfen und abzuwägen. Ob die Verwendung von Ackerflächen für andere Zwecke als zur Nahrungsmittelproduktion, also zur Bereitstellung von Energie oder nachwachsenden Rohstoffen, gerechtfertigt ist, ist an anderer Stelle zu diskutieren.
Wirksamkeit:	Durch den Wasserrückhalt durch die Bäume steht mehr Wasser zur Verdunstung zur Verfügung.

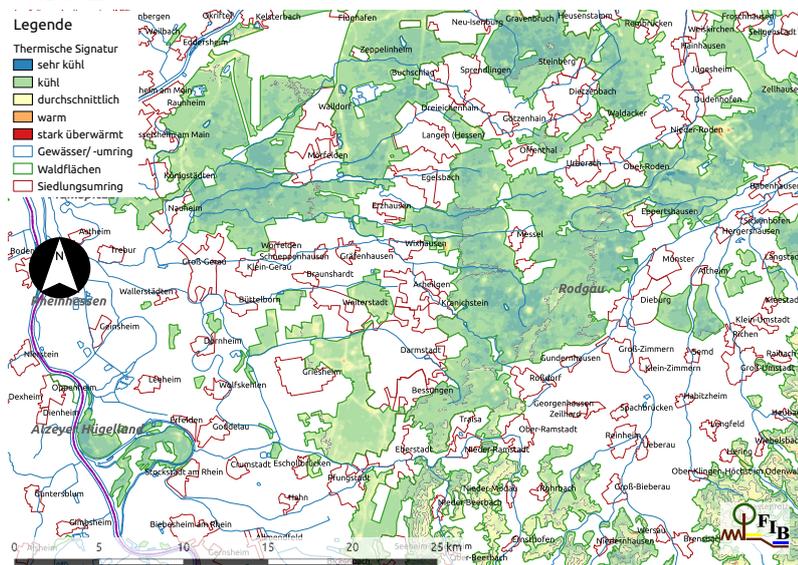


Berntung einer Kurzumtriebsplantage. Foto: Hildmann.

Akteure & Umsetzung:	Landwirte; Greening-Maßnahme
Bevorzugte Standorte:	Geeignet sind Ackerflächen mit ausreichender Wasserversorgung. Gezielt können sie als Streifen zum Schutz von Fließgewässern oder in Trinkwasserschutzgebieten eingesetzt werden. Auch zur Strukturierung ausgeräumter Feldfluren (als moderne Hecken mit wirtschaftlicher Nutzung) sind sie denkbar.
Hemmnisse:	Die Festlegung auf ± 20 Jahre auf eine Anbauvariante ist vor allem bei Pachtflächen problematisch. Hohe Investition für Leihgebühren für die Erntefahrzeuge. Die Flächen erfordern eine andere Bewirtschaftung als von landwirtschaftlichen Kulturen. Trockene Standorte sind für die meisten Baumarten ungünstig. KUP sind agrarische Monokulturen, was unter Biodiversitätsaspekten auch nachteilig sein kann.
Literatur:	https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/w79_gesamt_nbf.pdf JØRGENSEN & SCHELDE (2001); RÖHRICHT & KUSCHER (2004); DIMITRIOU (2005); WERNER ET AL. (2006); KARAČIĆ (2005)

Maßnahmenblatt Waldumbau	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input checked="" type="checkbox"/>	Hanglage <input checked="" type="checkbox"/>
Tal <input checked="" type="checkbox"/>	
Landnutzung	
Landwirtschaft <input type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input checked="" type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Gewässer <input type="checkbox"/>
	Landschaftselemente <input type="checkbox"/>
	Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	<p>Im Jahr 2014 nahm die Waldfläche in Hessen insgesamt 847.683 ha ein. Die Höhe der CO₂-Einlagerung betrug -4.350 t CO₂. Davon entfielen ca. -3.200 t CO₂ auf die Fixierung im Holzvorrat und ca. -1.150 t CO₂ auf die Einlagerung in Böden (vgl. Maßnahmensteckbrief LF-06: „Förderung einer nachhaltigen, multifunktionalen Forstwirtschaft im Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025). Dies belegt die hohe Bedeutung des Waldes für den Klimaschutz durch CO₂-Bindung.</p> <p>Das vorliegende Gutachten hebt die hohe Bedeutung des Waldes für die Kühlung in Zeiträumen der sommerlichen Erwärmung und damit seine Rolle für geeignete Klimaanpassungsmaßnahmen hervor. Dabei zeigt die Temperaturkarte, dass die Waldflächen in Hessen standortabhängige Differenzierungen in der Kühlung aufweisen (Abb. weiter unten in diesem Maßnahmensteckbrief). Darüber hinaus werden auch die Beobachtungen zu den Effekten großflächiger Waldrodungen beschrieben, wozu Niederschlagsrückgänge der in Windrichtung gelegenen Flächen auf kontinentaler Skala gehören (vgl. Kap. 2.4.1). Der Wald mit seiner organischen Streuauflage kann auch zum vermehrten Rückhalt von Stoffen beitragen. Demzufolge können Waldrodungen und damit einhergehende Bodenerwärmung und vermehrte Mineralisation die Stoffauswaschung erhöhen (vgl. Kap. 2.3). Ziel des vorliegenden Maßnahmentypes „Waldumbau“ ist es, den Wald in seinen vielfältigen Funktionen für einen nachhaltigen Naturhaushalt, insbesondere im Hinblick auf seine „Kühlfunktion“, auch im Zeitraum des Klimawandels zu erhalten.</p>
Beschreibung:	<p>Geeignete Maßnahmentypen müssen berücksichtigen, dass der fortschreitende Klimawandel zunehmend die ökologischen Rahmenbedingungen in Hessen verändert. Dies führt zu einer standortabhängigen Veränderung der Leistungsfähigkeit der Baumarten und zu höheren biotischen und abiotischen Risiken (vgl. PAAR ET AL., 2018). Gut durchmischte, artenreiche Wälder, die klimaangepasst und klimaresilient sind, stellen geeignete Optimierungsmöglichkeiten dar. Hierdurch wird zugleich dazu beigetragen, dass der Wald möglichst wenig anfällig für Schadinsekten und Pilze wird sowie wenig Potenzial für deren Massenausbreitung bietet.</p>

Eine weitere geeignete Maßnahme besteht darin, den in der Temperaturkarte erkennbaren Unterschieden in der Kühlfunktion der Wälder vertiefend nachzugehen. Hierdurch können Standortbesonderheiten bei der Maßnahmenplanung besser berücksichtigt und die Effizienz der Maßnahmen somit verbessert werden.



Thermische Signatur von Waldflächen am Beispiel eines Ausschnittes des Hessischen Rieds. Auch innerhalb von Waldflächen, die meist deutlich besser gekühlt sind als andere Flächen, findet sich eine Differenzierung der thermischen Signatur, die etwa über die Wasserversorgung der Standorte und den Zustand der Bestände erklärt werden kann.

Synergieeffekte:

Wirksamkeit:

Akteure & Umsetzung:

Bevorzugter Standort:

Hemmnisse

Literatur:

Erhöhung der Artenvielfalt

Zu erwartende, durch den Klimawandel bedingte, zukünftige Waldausfälle werden gemildert / vermieden. Hierdurch werden Einbrüche der zukünftigen Verdunstungsleistung der betroffenen Wälder weniger wahrscheinlich.

Forstbesitzer

Monokulturen, Waldbestände mit besonderer Sensitivität für den Klimawandel.

Investitionskosten

LINDNER (1998); FLECK ET AL. (2015); PAAR ET AL. (2018)

Maßnahmenblatt	Bewirtschaftung zur Abfluss- und Erosionsminderung
Lage im Einzugsgebiet	Kuppe <input type="checkbox"/> Hanglage <input checked="" type="checkbox"/> Tal <input type="checkbox"/>
Landnutzung	Landwirtschaft <input checked="" type="checkbox"/> Forstwirtschaft <input type="checkbox"/> Gewässer <input type="checkbox"/> Urbaner Raum <input type="checkbox"/> Landschaftselemente <input type="checkbox"/> Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Verringerung von Oberflächenabfluss und Verhinderung von Erosion zum Erhalt des Oberbodens.
Beschreibung:	Durch eine gezielte Anpassung der landwirtschaftlichen Fruchtfolgen und die Kombination mit ergänzenden Maßnahmen soll der Oberflächenabfluss minimiert werden. Einige Kulturen wie Mais, Zuckerrüben und Kartoffeln verringern den Wasserspeicher auf der Ackerfläche, außerdem geht Mais erst im späten Frühjahr auf, was zu einer längeren Brachzeit der Fläche führt. Ein hohes Erosionsrisiko besteht zusätzlich durch Gemüse, spät gesätes Wintergetreide und Winter-Freilandbeweidung. Es empfehlen sich eine vielgliedrige Fruchtfolge mit hohem Anteil von Hauptkulturen mit geringem Erosionsrisiko und hohem Wasserrückhaltevermögen, außerdem Zwischenfruchtanbau, Untersaaten, Schonstreifen, Uferrandstreifen, Mulchsaat, Vermeidung von Schwarzbrache, konservierende Bodenbearbeitung, Vermeidung von Bodenschadverdichtung, Mischkulturen und Agroforstsysteme.
Synergieeffekte:	Weniger Düngung erforderlich (Einsparungspotenzial und verringertes Stoffeintrag in Grund- und Oberflächengewässer), Verbesserung bzw. Schutz der Humusschicht, welche Wasser speichert und in Trockenperioden für die Kulturpflanzen vorhält.
Wirksamkeit:	Hängt stark von der Umsetzung und Kombination der Maßnahmen ab.
Akteure & Umsetzung:	Landwirte
Hemmnisse:	zusätzlicher Arbeitsaufwand, Veränderung der Betriebsabläufe
Literatur:	HOLSTEN ET AL. (2012); QUAST ET AL. (2010)

Maßnahmenblatt		Muldenspeicher		
Lage im Einzugsgebiet				
	Kuppe	<input type="checkbox"/>	Hanglage	<input checked="" type="checkbox"/>
			Tal	<input type="checkbox"/>
Landnutzung				
	Landwirtschaft	<input checked="" type="checkbox"/>	Forstwirtschaft	<input type="checkbox"/>
			Gewässer	<input type="checkbox"/>
	Urbaner Raum	<input checked="" type="checkbox"/>	Landschaftselemente	<input type="checkbox"/>
			Naturschutz	<input type="checkbox"/>
Ziele:	Erhöhter Wasserrückhalt und gesteigerte Verdunstung, damit verzögert sich der Zwischen- und Oberflächenabfluss, besonders bei Starkregenereignissen.			
Beschreibung:	<p>Unter Ausnutzung des Reliefs können unterschiedlich große Mulden/Bodensenken angelegt werden; am Rand der Mulden können z. B. Weiden und Erlen gepflanzt werden, die das sich sammelnde Wasser verdunsten.</p> <p>Im urbanen Raum dienen diese Mulden der Regenwasserver-sickerung von befestigten Oberflächen; steht wenig Platz zur Verfügung, kann ein Mulden-Rigolen-System in den Boden eingesetzt werden. Hauptsächlich soll damit der Abfluss verzögert werden.</p>			
Synergieeffekte:	Mit der Versickerung über den Oberboden wird das Wasser durch Adsorptionsvorgänge gereinigt (vorsorgender Grundwas-serschutz vor allem im urbanen Raum). Durch das Abbremsen des Oberflächenabflusses wird Erosion vermieden. Möglicher-weise bilden sich auch temporäre Kleingewässer. Die Grund-wasserneubildung kann ebenso wie der Hochwasserschutz profitieren.			
Wirksamkeit:	Die Wirkung ist immer auf eine kleine Fläche beschränkt.			
Akteure & Umsetzung:	Landwirte, Kommunen, Landschaftspflegeverbände, Hauseigen-tümer			
Bevorzugte Standorte:	Im ländlichen Raum möglichst weit oben im Einzugsgebiet, wo der Oberflächenabfluss zusammenfließt. Auf bereits beste-henden Grünflächen im urbanen Raum, entlang dem Relief am Hang und Senken.			
Hemmnisse:	(Geringer) Flächenbedarf; ggf. bei Bewirtschaftung umliegender Flächen störend.			
Literatur:	<p>https://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/landentwicklung/dokumentationen/dateien/le_auerswald_ft_2017.pdf;</p> <p>http://regklam.de/fileadmin/Daten_Redaktion/Publikationen/Maßnahmenblaetter/Maßnahmenblatt115.pdf ; http://www.integra-fishing.de/Hochwasserschutz/Veroeffentlichungen/Gewaesserschutz-Hochwasserschutz-Bodenschutz/03_Expertise_Dezentraler_Hochwasserschutz.pdf</p>			

Maßnahmenblatt	Senken und Flachgewässer		
Lage im Einzugsgebiet	Kuppe <input type="checkbox"/>	Hanglage <input type="checkbox"/>	Tal <input type="checkbox"/>
Landnutzung	Landwirtschaft <input type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/>	Gewässer <input checked="" type="checkbox"/>
	Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/>	Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Vergrößerung der Wasseroberfläche und Ausbreitung von Röhrichtpflanzen. Optimierung der Verdunstung von Wasser über die Pflanzen.		
Beschreibung:	Leichte Verdichtung des Untergrunds und der Seiten mit Lehm. Ansiedlung von Röhrichtpflanzen wie Schilf, Rohrkolben, Binsen usw.		
Synergieeffekte:	Wiederbeleben verlandeter Kleingewässer. Wasserrückhalt, Feuchtbiotope für Amphibien und Insekten, Laichplätze, Brutplätze, Rastplätze Konflikte mit dem Naturschutz sind im Vorfeld zu prüfen und abzuwägen.		
Wirksamkeit:	Erhöhung der Verdunstung von Wasserflächen und Sumpfpflanzen, oftmals nur temporär wirksam.		
Akteure & Umsetzung	Kommunen, Naturschutzverbände		
Bevorzugter Standort:	Auen, grundwassernahe Bereiche, bereits vorhandene oder ehemalige Senken und Weiher		
Hemmnisse	Flächenkonkurrenz		
Literatur:	PATT (2016)		

Maßnahmenblatt Gewässerrenaturierung	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input type="checkbox"/>	Hanglage <input type="checkbox"/> Tal <input type="checkbox"/>
Landnutzung	
Landwirtschaft <input type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/> Gewässer <input checked="" type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/> Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Erhöhung der Verdunstung durch mehr Stillwasserbereiche, größere Gesamtwasserfläche, mehr feuchte Bereiche in Ufernähe, Ansiedlung von Gewässervegetation, vermehrter Wasserrückhalt.
Beschreibung:	Natürliche Gewässermorphologie herstellen durch Entfernung des Uferverbau, Verbreiterung des Gewässerquerschnitts sorgt für verzögertes Abfließen, Anregung zur Mäandrierung des Wasserlaufes, Abflachen der Gewässerböschung, Gewässerdurchgängigkeit sicherstellen
<p><i>Renaturierung des Breiten Grabens zwischen Werenzhain und Lichtena (Niederlausitz, Brandenburg). A) Morphologie des Grabens vor Beginn der Renaturierungsarbeiten; B) Neumodellierung (Verbreiterung, Terrassierung und Modellierung Mäander) des Gerinnes mittels Bagger; C) Naturnaher Zustand des Breiten Grabens nach Abschluss der Neumodellierung, stellenweise erhaltener Altbaumbestand und Neuanpflanzungen mit Baumstützen; D) die Sohlrampe ist eine naturnahe, für aquatisches Leben passierbare Alternative zum örtlich verbreiteten Wehr. Fotos: H. Munack.</i></p>	

Synergieeffekte:	Ehemalige Überschwemmungsbereiche reaktivieren, indem z. B. nicht mehr genutzte Bauwerke entfernt und eine intensive Nutzung eingestellt wird, Standortgerechte Baumarten als Initiale pflanzen, Einbringung wasserbaulicher Elemente wie Sohlstufen, Röhricht ansiedeln bzw. Ausbreitung fördern
Wirksamkeit:	Hochwasserschutz, Lebensraum für Tiere (Vögel, Fische usw.), Anbindung und Wiederbelebung von Auen Wirkung richtet sich nach dem Umfang der Renaturierungsmaßnahme. Richtet sich nach der Vergrößerung der Wasserfläche bzw. der Feuchtbereiche.
Akteure & Umsetzung:	Maßnahmen können z.B. in bereits geplante Projekte gemäß der Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Gewässerentwicklung und zum Hochwasserschutz integriert werden. Kommunen führen die Umsetzung durch.
Bevorzugter Standort:	Stark verbaute Gewässer, Relikte von Auenwäldern. Es können im Einzelfall Konflikte mit dem Naturschutz vorliegen, besonders wenn es sich um nährstoffarme, mit nur wenig Gehölzen gegliederte Landschaftsausschnitte handelt.
Hemmnisse	Nutzungskonflikte, finanzieller Aufwand
Literatur:	LÜDERITZ & JÜPNER (2009)

Maßnahmenblatt		Renaturierung von Feuchtgebieten		
Lage im Einzugsgebiet				
	Kuppe	<input type="checkbox"/>	Hanglage	<input type="checkbox"/>
				Tal <input checked="" type="checkbox"/>
Landnutzung				
	Landwirtschaft	<input checked="" type="checkbox"/>	Forstwirtschaft	<input checked="" type="checkbox"/>
	Urbaner Raum	<input type="checkbox"/>	Landschaftselemente	<input checked="" type="checkbox"/>
				Gewässer <input checked="" type="checkbox"/>
				Naturschutz <input checked="" type="checkbox"/>
Ziele:	Mit feuchten Flächen kann die Transpirationsleistung von Pflanzen mit dem Evaporationspotential von Wasserflächen kombiniert werden, was zur Kühlung der Umgebung beiträgt. Über einen niedrigen Grundwasserflurabstand kann dieses Ziel erreicht werden.			
Beschreibung:	Schließen von Entwässerungsgräben und Rückbau von künstlichen Uferbefestigungen. Ansiedlung von Schilf und anderen habitattypischen Pflanzen am Gewässerufer bzw. Gehölzen auf Auenstandorten und in zu entwickelnden Bruchwäldern. Extensive Beweidung mit z. B. Wasserbüffeln. Auch das Anlegen von künstlichen Feuchtgebieten (constructed wetlands) ist möglich, z. B. zum Sammeln und Filtern von Abflusswasser von befestigten Oberflächen wie Straßen und Plätzen.			
Synergieeffekte	Wasserspeicherung und -rückhalt, Lebensraum für seltene Tier- und Pflanzenarten, Stofffilter in der Landschaft, Verbesserung der Wasserqualität			
Wirksamkeit:	Intakte Feuchtgebiete können 34% mehr Wasser verdunsten als stark entwässerte Feuchtgebiete; Verdunstung von offenen Wasserflächen kann mit Vegetation z. B. um 7% erhöht werden; der Kühlungseffekt durch Feuchtgebiete kann bis zu 400 m ins Umland reichen (Effekte sind immer standortspezifisch).			
Akteure, Umsetzung:	Landwirte, Naturschutzorganisationen, Forstbetriebe, private Waldbesitzer, Behörden, entsprechende politische Entscheidungen			
Bevorzugter Standort:	Entwässerte Grünlandflächen und Feuchtwiesen, ehemalige Erlenbruchwälder, Altarme von Flussläufen, entwässerte Auenbereiche; sind Relikte der genannten Biotoptypen vorhanden, ist eine Vergrößerung und die Verbesserung dieser Flächen bevorzugt zu behandeln.			
Hemmnisse	Anpassung der Bewirtschaftung, möglicherweise auch Aufgabe der Nutzung (nicht unbedingt)			
Literatur:	WU ET AL. (2016); SIMSEK & ÖDÜL (2018); ANDA ET AL. (2015); ZERBE & WIEGLEB (2009); PATT (2016)			

Maßnahmenblatt	Moorrenaturierung		
Lage im Einzugsgebiet	Kuppe <input type="checkbox"/>	Hanglage <input type="checkbox"/>	Tal <input type="checkbox"/>
Landnutzung	Landwirtschaft <input type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/>	Gewässer <input type="checkbox"/>
	Urbaner Raum <input type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/>	Naturschutz <input checked="" type="checkbox"/>
Ziele:	Steigerung des Wasserrückhalts in der Landschaft, Vergrößerung der Fläche eines verdunstungsstarken Ökosystems.		
Beschreibung:	Renaturierung bzw. Revitalisierung degradierter Moorstandorte Auffinden von degradierten Moorstandorten und Identifizierung des Wiedervernässungspotenzials Schließen von Entwässerungsgräben und intensive Nutzung der Flächen aufgeben, ggf. extensive Nutzung in Form von Pflegenutzung Grundwasserspiegel nahe der Geländeoberfläche halten Flächenmonitoring		
Synergieeffekte:			
Wirksamkeit:	Starke Erhöhung der Verdunstungsleistung		
Akteure & Umsetzung:	Landwirte, Kommune, Naturschutzorganisationen, wissenschaftliche Begleitung		
Bevorzugter Standort:	Moorrelikte erweitern, degradierte Moorstandorte mit hohem Wiedervernässungspotenzial		
Hemmnisse:	Nutzungskonflikte mit Landwirtschaft und Forstwirtschaft, finanzieller Aufwand. Fallabhängig können Moorrenaturierungen mit hohen Kosten und Prognoseunsicherheiten einhergehen. Diesbezügliche Prüfungen sind vorzunehmen.		
Literatur:	TIMMERMANN ET AL. (2009)		
<p><i>Die Renaturierung von Mooren bedarf einer genauen Planung. Foto: Hildmann.</i></p>			

5.4.2 Maßnahmentypen im urbanen Raum

Maßnahmenblatt Aufwertung von Brachflächen	
Lage im Einzugsgebiet	
Kuppe <input type="checkbox"/>	Hanglage <input type="checkbox"/> Tal <input type="checkbox"/>
Landnutzung	
Landwirtschaft <input type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/> Gewässer <input type="checkbox"/>
Urbaner Raum <input checked="" type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/> Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Brachflächen oder untergenutzte Flächen in der Stadt sollen ökologisch sinnvoll genutzt werden. Aktive Einbindung dieser Flächen in den Wasserkreislauf durch die Förderung der Versickerung und Erhöhung der Verdunstung.
Beschreibung:	Häufig sind in den Städten Brachflächen oder untergenutzte Flächen (z. B. Abstandsflächen, Grünflächen, die ihre Funktion verloren haben) vorhanden. Diese können umgestaltet werden, wobei auch eine temporäre Umnutzung in Frage kommt, wenn ggf. später eine andere Nutzung wie z. B. Bebauung ansteht. Entsiegelung nicht mehr genutzter Flächen; Anbindung an das Grundwasser (so weit möglich); Umgestaltung z. B. zu einer Parkanlage, Grünfläche oder Gemeinschaftsgarten; Entsprechend der geplanten Nutzung können Bäume, Sträucher und andere Nutzpflanzen angepflanzt oder Blumensamen ausgebracht werden.
Synergieeffekte:	Verbesserung der Lebensqualität der Bewohner; es können naturschutzfachlich wertvolle Flächen entstehen; Revitalisierung von Bodenfunktionen; Verbesserung der Luftqualität; Grundwasserneubildung; Erhöhung der Biodiversität des Ökosystems Stadt
	
<p><i>Beispiel einer Brachfläche, die sich bereits erfolgreich selbst begrünt. Die sich stark erwärmenden, versiegelten Bereiche könnten hier entsiegelt werden. Foto: Hildmann.</i></p>	

Wirksamkeit:	Durch eine Aufforstung bzw. Bepflanzung mit Gehölzen erfolgt eine Flächenkühlung und – in Abhängigkeit von der räumlichen Dichte der Grünflächen – unter Umständen auch ein Kühlungseffekt auf die angrenzenden Flächen (VAZ MONTEIRO ET AL., 2016). Zur Kühlleistung von Böden, insbesondere im urbanen Raum, liefern KASTLER ET AL. (2015) im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW eine umfassende Studie, die die Bodenkühlleistung als integralen Bestandteil stadtklimatischer Konzepte qualitativ und quantitativ beschreibt.
Akteure & Umsetzung:	Flächeneigentümer, kommunale Verwaltung. Eine finanzielle Unterstützung durch die Städtebauförderung ist möglich, wenn die Flächen innerhalb der Gebietskulisse der Städtebauförderung liegt.
Bevorzugte Standorte:	Auswahl kann über das Brachflächenkataster erfolgen; Brachen mit möglicher Anbindung an bereits bestehende Grünflächen; Brachen in besonders stark verdichteten und erwärmten Stadtteilen ohne Grünflächen
Hemmnisse:	Nutzungskonflikte z. B. mit Wohnungsbau, ungeklärte Eigentumsverhältnisse; Kosten für Unterhaltung der Fläche; mögliche Altlasten müssen beseitigt werden.
Literatur:	LIN & LIN (2016); http://www.naturmagazin.info/ausgaben/1-2013/titelthema/Stadtbrachen/

Maßnahmenblatt **Dach- und Fassadenbegrünung**

Lage im Einzugsgebiet

Kuppe Hanglage Tal

Landnutzung

Landwirtschaft Forstwirtschaft Gewässer
 Urbaner Raum Landschaftselemente Naturschutz

Ziele: Durch die Begrünung von Gebäuden mit Dach- und Fassadenbegrünungen soll der Temperaturengleich auch in den dicht bebauten, urbanen Bereichen verbessert werden. Neben dem Kühleffekt im Außenbereich sollen dabei auch die Gebäude selbst profitieren. Das Aufheizen großer Dachflächen soll verringert werden.

Beschreibung: Niederschlagswasser wird auf dem Dach zurück gehalten. Gebäude weisen Oberflächen auf, die weder Wasser zurückhalten noch verdunsten sollen. Die trockenen, direkt der Sonne ausgesetzten Baustoffe können sich erheblich erwärmen und sehr heiß werden. Steine, Beton und Asphalt speichern die Wärme und strahlen sie im Sommer auch noch nach Sonnenuntergang ab. Urbane Flächen sind deshalb als Wärmeinseln auch im Satellitenbild deutlich erkennbar (Kap. 3.2). Durch die Begrünung der Gebäude kann die Überwärmung verringert werden.
 Fassaden können durch rankende Pflanzen vom Boden aus eine grüne Hülle bekommen. Efeu oder Wilder Wein ranken mit ihren Haftwurzeln allein die Fassade hinauf, während andere Arten wie z. B. Blauregen oder Clematis eine Rankhilfe benötigen. Sollen auch höhere Gebäudeteile begrünt werden, die die Rankpflanzen nicht mehr aus eigener Kraft erreichen, so können diese in Kübeln in gewünschter Höhe gepflanzt werden. Bei ausreichender Wasserversorgung sorgen die Rankpflanzen für eine Kühlung der Gebäudeoberfläche.



Beispiel für eine mehrstöckige, intensive Fassadenbegrünung, die zur Kühlung des Gebäudes einen aktiven Beitrag leistet. Foto: M. Schmidt.

Auch Dächer können begrünt werden. Hierfür sind zahlreiche Systeme entwickelt worden, die sowohl eine extensive Begrünung mit trockenheitstoleranten Pflanzen als auch eine intensivere Bepflanzung mit höherer Transpirationsleistung zulassen. Notwendig ist ein Substrat zur Speicherung des Regenwassers, so dass die Pflanzen möglichst ohne zusätzliche Bewässerung auskommen. Der Aufbau wird schichtenweise auf das Dach aufgetragen und besteht zumeist aus einer wurzelfesten Dachabdeckung, einem Schutzvlies, einer Dränschicht, einem Filtervlies und einem Bodensubstrat.

Die dabei entstehenden zusätzlichen Dachlasten sind bei der Konstruktion zu berücksichtigen bzw. im Altbestand an die Möglichkeiten des Gebäudes anzupassen. Durch die Verdunstung auf dem Dach kann sowohl ein Kühleffekt für die Umgebung als auch für das Gebäude selbst erreicht werden.

Bei extensiver Begrünung ist auch eine Kombination mit Solar-
nutzung (Photovoltaik, Solarthermie) möglich.



Dachbegrünung am Beispiel des Block 108 in Berlin-Kreuzberg (1986). Foto: M. Schmidt.

- Synergieeffekte:** Die Kühlung des Gebäudes wirkt sich vorteilhaft für die Bewohner aus. Eine entsprechende Begrünung kann Ersatz für die Klimatisierung eines Gebäudes leisten, wodurch der Energiebedarf reduziert wird. Bei Dachbegrünungen wird zudem Wasser im Speicher zurückgehalten, so dass der Dachabfluss verringert und Starkregenereignisse abgepuffert werden. Die Flächen sind auch Lebensraum, z. B. für Insekten (Bienenhaltung möglich).
- Wirksamkeit:** Die Maßnahme ermöglicht die Verdunstung und Kühlung im bebauten Bereich, der sonst besonders stark überwärmt ist.

Akteure & Umsetzung:	<p>In BESIR & CUCE (2018): Albedo erhöht sich von 0,1 (normales Dach) auf 0,3 (Dachbegrünung), Heizbedarf kann zwischen 10 und 30 % reduziert werden, die Umgebungstemperatur von Gründächern kann zwischen 0,3 und 3,0 Grad reduziert werden</p> <p>SUTER ET AL. (2017): Kühlung durch Verdunstung von -0,35 K/d mm</p> <p>MORAKINYO ET AL. (2017): Simulierte Kühlung der Umgebung (1,5 m) um 0,05 bis 0,6 Grad, wobei der Effekt mit abnehmender Bebauungsdichte steigt und tagsüber höher ist als nachts; Effekt sinkt in dieser Reihenfolge: 100% Bäume, 50% Bäume, 100% Sukkulenten, 50% Sukkulenten</p> <p>MORAKINYO ET AL. (2017): Simulierte Reduzierung der Innentemperatur bei gemäßigttem Klima liegt zwischen 0,3 und 0,7 Grad, Effekt ist unabhängig von der Bebauungsdichte</p>
Bevorzugter Standort:	<p>Die Umsetzung muss durch die Bauherren und Architekten erfolgen. Information und Schulungen können helfen, das Wissen um diese Maßnahmen zu verbreiten. Bei der Entwicklung von B-Plänen könnte eine entsprechende Begrünung durch die Kommunen beauftragt werden. Eine finanzielle Unterstützung durch die Städtebauförderung ist möglich, wenn die Flächen innerhalb der Gebietskulisse der Städtebauförderung liegen.</p>
Hemmnisse:	<p>Gebäude, vor allem in einem nicht oder nur wenig begrüntem Umfeld.</p>
Literatur:	<p>Die Maßnahmen ziehen höhere Investitionskosten nach sich (Gewicht der Konstruktion (ca. 150 kg/m² im wassergesättigtem Zustand), Investition der Nachrüstung). Im Vergleich mit einer Klimatisierung von Gebäuden können sie jedoch bereits heute die langfristig wirtschaftlichere Alternative darstellen.</p>
	SCHMIDT (2008, 2009, 2010)

Maßnahmenblatt	Wasserrecycling und integrierte Produktion im urbanen Raum		
Lage im Einzugsgebiet	Kuppe <input type="checkbox"/>	Hanglage <input type="checkbox"/>	Tal <input type="checkbox"/>
Landnutzung	Landwirtschaft <input type="checkbox"/>	Forstwirtschaft <input type="checkbox"/>	Gewässer <input type="checkbox"/>
	Urbaner Raum <input checked="" type="checkbox"/>	Landschaftselemente <input type="checkbox"/>	Naturschutz <input type="checkbox"/>
Ziele:	Mit diesem Ansatz sollen durch die Kreislaufführung der auch im urbanen Kontext vorhandenen Ressourcen Grau- und Regenwasser land- und fischwirtschaftliche Produkte in direkter Nähe zum Verbraucher produziert werden.		
Beschreibung:	Die im Grauwasser vorhandenen Nährstoffe werden bislang von wenigen Ausnahmen abgesehen nicht genutzt. Aufbereitetes und hygienisiertes Grauwasser wird, zusammen mit gesammeltem Regenwasser, für Aquakulturanlagen genutzt. Das bei der Produktion der Fische anfallende Wasser wird weiter für die Pflanzenproduktion genutzt (Aquaponik). Als Standort für diese Prozesskette bieten sich Dächer an, da hier sowohl ausreichend Licht für die Pflanzenproduktion als auch überhaupt eine mögliche Fläche im dicht besiedelten urbanen Raum verfügbar ist. Überschüssiges Wasser kann zur Verbesserung des Mikroklimas verdunstet werden.		
Synergieeffekte:	Mit dem Ansatz werden die Menge des Abwassers deutlich reduziert, Nährstoffe darin recycelt, pflanzliche und tierische Lebensmittel hergestellt. Über den Standort werden die Menschen vor Ort direkt mit eingebunden und für die Thematik sensibilisiert.		
Wirksamkeit:	Klimatische Effekte sind vor allem über die Verdunstung von überschüssigem Wasser zu erzielen, wie es im Fall der Pilotanlage im Block 6 in Berlin erfolgt ist.		
	<p><i>Die Produktion tropischer Früchte in Ruswil (Schweiz) unter Nutzung von Abwärme und Regenwasser mit integrierter Fischzucht und Kreislaufführung des Wassers ist eines der frühen Beispiele für die integrierte Produktion im urbanen Raum. Foto: Hildmann.</i></p>		

Akteure & Umsetzung:	Für die Umsetzung sind eine Reihe von Akteuren, vom Immobilienbesitzer über die Bewohner, Technologieanbieter, Architekten bis zu den Betreibern erforderlich. Die Umsetzung bietet sich als Projekt entsprechender Interessengruppen an, könnte aber auch durch Investoren initiiert werden.
Bevorzugter Standort:	Größere Gebäude(komplexe) mit ausreichenden Dachflächen und Grauwasseranfall im urbanen Kontext.
Hemmnisse:	Planung und Umsetzung solcher Anlagen stehen trotz einiger erfolgreicher Projekte noch am Anfang der Entwicklung. Mögliche Hemmnisse sind deshalb eine ausreichende Finanzierung, das Fehlen kreativer Köpfe für die Umsetzung, fehlende Motivation der Bewohner bis hin zu behördlichen Auflagen (Baurecht).
Literatur:	MILLION ET AL. (2018)
Beispiel:	Roof Water Farm in Berlin, http://www.roofwaterfarm.com/

5.5 Synergien zu bestehenden Maßnahmenplanungen

5.5.1 Maßnahmen zur Bewirtschaftung der Gewässer nach WRRL

Ein wesentliches Ziel der EU-WRRL (RL 2000/60/EG) ist es, für alle Gewässer einen guten ökologischen Zustand zu erreichen. Die EU-WRRL ist in Deutschland über das WHG in nationales Recht umgesetzt worden. Demnach sind für alle Gewässer Maßnahmenprogramme aufzustellen, die den guten ökologischen Zustand zum Ziel haben. Auch für Hessen ist nach Erfassung des aktuellen Zustands ein Maßnahmenprogramm erarbeitet und für die Periode 2015 bis 2021 fortgeschrieben worden (HLUG, 2015). Hierin sind die durchgeführten und geplanten Maßnahmen in Steckbriefen für die einzelnen Gewässerabschnitte in der Periode 2015 bis 2021 dargestellt.

Einige, wenngleich nicht alle, der dort vorgeschlagenen Maßnahmen bieten die Möglichkeiten für Synergien zum Schutz des Wasserhaushaltes durch den Rückhalt von Niederschlag und damit zur Bildung von Verdunstungskühle. Diese sollen im Folgenden exemplarisch benannt und dargestellt werden.

- Wassergebührenpolitik mit Anreizen für eine effiziente Nutzung der Wasserressourcen
Wenn Pflanzen optimal mit Wasser versorgt sind, können sie auch entsprechend viel Wasser verdunsten und damit zum Temperatúrausgleich in der Landschaft beitragen. Dort, wo Wasser so entnommen wird, dass der von den Wurzeln erreichbare Bodenwasserspiegel abgesenkt wird, kann auch die Transpirationsleistung der Pflanzen reduziert werden. Dies kann sowohl bei der Entnahme von Grundwasser als auch von Oberflächenwasser geschehen. Wird der Absenkung des Bodenwasserspiegels durch eine reduzierte Wasserentnahme entgegen gewirkt, trägt dies auch zum Schutz des Landschaftswasserhaushaltes bei.
- Die Minimierung der Grundwasserabsenkungen oder die Erhöhung in abgesenkten Bereichen, soweit dies nutzungsbedingt möglich ist, die in direkter Wechselbeziehung zu Landökosystemen stehen, kann auch durch entsprechende Bewirtschaftungspläne erfolgen. Zu nennen sind hier der „Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried“ und die „Umweltschonende Grundwassergewinnung Vogelsberg“, die grundwasserabhängige Landökosysteme nicht gefährden sollen.
- Maßnahmen zur Sicherstellung der hydromorphologischen Bedingungen für einen guten ökologischen Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potential

Für die Oberflächengewässer wird ein naturnaher Zustand angestrebt. Mit einer vielfältigen, naturnahen Gewässerstruktur wird das Wasser abgebremst, Selbstreinigungsprozesse gefördert und es werden unterschiedliche Kleinstlebensräume geschaffen. Mit der Verlangsamung des Abflusses durch die variantenreiche Morphologie, durch Steine am Gewässergrund, durch einen entsprechenden Bewuchs sowie durch Mäander bleibt das Wasser länger in der Landschaft, es kann mehr Wasser in die ufernahen Bereiche exfiltrieren (bei niedrigeren Grundwasserständen) und insgesamt mehr Wasser zur Verdunstung kommen. Damit wirken sich derartige Maßnahmen vorteilhaft für den Landschaftswasserhaushalt aus.

Im Rahmen des Maßnahmenprogramms wird bei den ergänzenden Maßnahmen sehr differenziert auf die Möglichkeiten zur Verbesserung der Hydromorphologie eingegangen. Viele der Maßnahmen weisen positive Synergien auf den Landschaftswasserhaushalt auf, von denen wichtige Ansätze hier dargestellt sind:

- ▶ Die Bereitstellung von Flächen und die Anlage von Gewässerrandstreifen sind vor allem dann vorteilhaft, wenn hier oberflächlich zulaufendes und infiltrierendes Wasser zurückgehalten und über eine entsprechende Vegetation auch verdunstet werden kann. Gleichzeitig tragen sie zum Stoffrückhalt und damit zur Nachhaltigkeit im Einzugsgebiet insgesamt bei.
- ▶ Die Entfesselung einschließlich der Bereitstellung von Flächen für eine Eigenentwicklung der Gewässer kann zur Verlangsamung des Abflusses und zu größeren Ufer- und Flachwasserbereichen führen. Die Aufweitung des wirksamen Aubereiches, etwa durch die Reaktivierung von Verzweigungen, Altarmen und Altwässern schafft eine größere, sehr verdunstungsaktive Fläche. Auch die Sohlanhebung tiefererodierter Gewässerstrecken wird sich positiv auswirken.

In Verbindung mit einer naturnahen Vegetation aus Röhricht und Gehölzen können die so entwickelten Gewässerauen sehr wertvolle Kühlelemente in der Landschaft darstellen.

- ▶ Eine modifizierte extensive Gewässerunterhaltung kann ebenfalls zum langsameren Abfluss und zur Steigerung der Verdunstung beitragen.
 - ▶ Die Entwicklung der Ufervegetation sowie der Auenv egetation kann auch zur Steigerung der klimatischen Wirksamkeit der Gewässer genutzt werden. Der Transpirationsprozess setzt an den Blattoberflächen an, die ausreichend mit Wasser versorgt sind. Deshalb sollte die Entwicklung von Röhricht und Gehölzen wie z. B. Erlen an den Gewässern zugelassen werden. Besonders Au- und Bruchwälder bieten durch ihre gute Wasserversorgung einen überdurchschnittlichen Temperatenausgleich.
 - ▶ Synergien bestehen auch bei der Sicherung eines ökologisch begründeten Mindestwasserabflusses. Trocknen Fließgewässer weitgehend aus, steht auch kein Wasser für die Transpiration durch die Ufervegetation zur Verfügung.
 - ▶ Für die Förderung des natürlichen Wasserrückhaltes sind eine Reihe unterschiedlicher Maßnahmengruppen vorgesehen wie die Aktivierung von Rückhalteflächen, die Flutung von Poldern und die Rückverlegung bzw. Außerbetriebnahme von Deichen. Diese Maßnahmen tragen alle dazu bei, dass bei höheren Wasserständen bzw. bei Hochwasserereignissen das Wasser länger in der Landschaft bleibt. Je nach den standörtlichen und jahreszeitlichen Rahmenbedingungen kann dies zur Auffüllung des Grund- und Bodenwassers führen und ein Teil des Wassers verdunstet werden.
 - ▶ Ähnlich vorteilhaft kann sich die Gerinneaufweitung oberhalb der Mittelwasserlinie an Bundeswasserstraßen auswirken, da dann bei höheren Wasserständen flach bespannte Uferbereiche vorhanden sind, auf denen etwa ein Röhricht aus Schilf und Rohrkolben einen Anteil des Wassers verdunsten kann.
- Maßnahmen zum Umbau von Abflussregulierungen

Maßnahmen zur Regulierung des Abflusses sind im Maßnahmenprogramm besonders dort im Fokus, wo die Wanderbewegungen der Gewässer- und insbesondere der Fischfauna z. B. durch Wehre unterbunden werden (Wanderhindernisse). Bei der Renaturierung der Gewässer mit dem Ziel, die Durchgängigkeit der Gewässer wieder herzustellen, können positive Synergien

für den Landschaftswasserhaushalt erreicht werden, wenn dabei die Wasserstände nicht abgesenkt werden, sondern für die angrenzenden Bereiche möglichst hoch gehalten werden.

- Maßnahmen gegen Stoffeinträge können zugleich auch vorteilhaft für den Wasserrückhalt sein. So wird in landwirtschaftlich geprägten Gebieten auch vorgeschlagen, Zwischenfrüchte über den Winter beizubehalten und Gewässer- und Erosionsschutzstreifen anzulegen. Gerade letztere könnten auch ganzjährig bei entsprechender Ausformung wie Muldenspeicher zum Rückhalt und anschließender Verdunstung von Niederschlagswasser beitragen.

Beim Anbau quer zum Hang, einer eigentlich der guten fachlichen Praxis zuzuordnenden Maßnahme, kann das Niederschlagswasser besser vom Boden aufgenommen werden, so dass nicht nur die Erosion verringert, sondern auch der Wasserrückhalt verbessert wird.

Für den Weinbau werden ebenfalls Maßnahmen vorgeschlagen, bei denen neben dem Erosionsschutz auch Vorteile für den Landschaftswasserhaushalt erzielt werden können. Dies betrifft verschiedene Formen der Begrünung der Rebassen oder der Böschungsbegrünung von Quertrassen.

5.5.2 Maßnahmen für den Verbund Natura 2000

Der Schutz von Arten und Lebensräumen ist durch die EU mit der Vogelschutz-RL (2009/147/EG) und der FFH-RL (92/43/EWG) voran getrieben worden. Die auf der Grundlage der beiden Richtlinien ausgewiesenen Flächen bilden gemeinsam ein zusammenhängendes Netz aus Schutzgebieten, das als Natura 2000 bezeichnet wird. Für diese Schutzgebiete sind Maßnahmenpläne zu erarbeiten, die den günstigen Erhaltungszustand in allen Gebieten zum Ziel haben. Bei Flächen, die auch im Rahmen der WRRL bearbeitet werden, werden die Maßnahmen in enger Abstimmung zwischen den Behörden entwickelt.

Positive Synergien zum Ziel, über den Landschaftswasserhaushalt den kleinräumigen Temperaturengleich zu verbessern, finden sich überall dort, wo die verschiedenen Lebensräume bzw. geschützten Arten auf entsprechende standörtliche Bedingungen angewiesen sind. Beispiele hierfür sind:

- Bereiche in der Aue, in denen die natürliche Auendynamik zugelassen werden soll. Dadurch können auch Altwässer neu entstehen und sich die Morphologie der Gewässer und Ufer entwickeln. Die Entwicklung der Aue als Feuchtgebiet mit angepasster Vegetation trägt zum besseren Rückhalt des Wassers und zur Steigerung der Verdunstung bei.

Vergleichbar gilt dies auch für Stillgewässern mit naturnaher Überflutungsdynamik und breiten Flachuferzonen.

- Viele für den Naturschutz wertvolle Lebensräume, die durch hoch anstehendes Wasser oder Staunässe geprägt sind, besitzen auch die Voraussetzungen, dass die Vegetation viel Wasser verdunstet. Hierzu gehören verschiedene Waldlebensräume, vor allem feuchter Ausprägung bis hin zu Auwäldern. Feuchtgebiete wie Übergangs- und Schwingrasenmoore, kalkreiche Niedermoore oder Kalktuffquellen können mit ihrer guten Wasserversorgung ebenfalls einen wichtigen Beitrag zum Temperaturengleich leisten. Etwas abgeschwächt, da Gehölze fehlen, gilt dies auch für Pfeifengraswiesen, Brenndolden-Auwiesen und feuchte Hochstauenfluren.

Da die erarbeiteten mittelfristigen Maßnahmenpläne in ihrer konkretisierten Ausdifferenzierung für die Flächen auch als Flächenkulisse für Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen dienen sollen, besteht hierüber die Möglichkeit, zugleich zum Landschaftswasserhaushalt, zur Klimawandelanpassung und zum Klimaschutz beizutragen.

Neben den Lebensräumen stehen mit der FFH-Richtlinie auch zahlreiche Arten im Fokus. Artenhilfsmaßnahmen, die zum Erhalt von Feuchtgebieten oder durch hohe Wasserstände geprägten Habitaten beitragen, können deshalb ebenfalls positive Synergien aufweisen. Für Hessen sind vor allem Arten zu nennen wie die Groppe (*Cottus gobio*), das Bachneunauge (*Lampetra planeri*), der Bitterling (*Rhodeus amarus*), der Lachs (*Salmo salar*), die Europäische Sumpfschildkröte (*Emys orbicularis*) und die Grüne Keiljungfer (*Ophiogomphus cecilia*).

Der Biber (*Castor fiber*) ist ebenfalls in der FFH-RL aufgeführt. In der Vergangenheit war der Biber auch in Hessen ausgerottet, wurde aber Ende der 1980er Jahre gezielt wieder angesiedelt. Mittlerweile besiedelt er fast alle Gewässersysteme Hessens. Über seine aktuelle Verbreitung gibt HLNUG (2017) einen Überblick. Seine Besonderheit besteht darin, dass er oftmals aktiv seinen Lebensraum gestaltet. Mit dem Bau von Dämmen setzt er dabei auch Flächen unter Wasser und hält die Wasserstände hoch. Zweifelsohne sind mit der Ausbreitung des Bibers erhebliche Konflikte mit der Land-, Fisch- und Forstwirtschaft absehbar, was ein proaktives und intelligentes Konfliktmanagement notwendig macht. Dort, wo in Schutzgebieten seine Tätigkeit toleriert werden kann, führt dies zu wassergeprägten Habitaten mit eher hohen Verdunstungsleistungen.

6 Suchräume für Maßnahmentypen in Hessen

Generell ist flächendeckend im Einzugsgebiet die Optimierung der Wasserretention positiv für die Verbesserung der Kühlfunktion der Landschaft. Vorliegend werden computergestützte, regelbasierte und reproduzierbare *Suchräume* abgeleitet, in denen Maßnahmen zur Milderung der Übererwärmung besonders effektiv sind. Bei der Planung und der Förderung von Maßnahmen können die Aufwendungen so zielgerichtet in die Räume gelenkt werden, in denen die Maßnahmen besonders zur Kühlung der Flächen beitragen. Die Eigenschaften dieser Suchräume ergeben sich durch die in Kap. 3.2 identifizierten Prädiktoren, d. h. einflussnehmenden Parameter.

6.1 Identifikation und Ableitung von Suchräumen

Gemäß der in Kap. 3.2 präsentierten Analysen, verfügen Suchräume über folgende Eigenschaften, die im Sinne einer funktionierenden Landschaftskühlung als Defizite betrachtet werden müssen und deshalb bei der Identifikation von Zielgebieten für Maßnahmentypen als Kriterien verwendet werden können

- Suchräume sind, verglichen mit ihrem Umland, *überwärmt* (MUSS).
- Suchräume verfügen über eine *geringe Kronendichte* (KANN) und/oder
- eine *geringe Pflanzenvitalität* (KANN).
- Suchräume weisen einen *erheblichen Grad an Oberflächenversiegelung* auf (KANN).
- In Suchräumen *mangelt es an pflanzenverfügbarem Wasser* (KANN).

Die Ableitung der Suchräume orientiert sich folglich an den oben genannten Kriterien.

In GRASS GIS wurden zur Ableitung von Suchräumen für jedes Höhenintervall sämtliche Polygone mit einem mittleren T_{Land} oberhalb des Intervall-Medians extrahiert. Weiterhin wurden, ebenfalls intervallspezifisch, die Prädiktoren *TCD₂₀₁₅*, *NDVI_{med}*, *IMD₂₀₁₅* und *BGR_NFK* gemäß der in Abbildung 6.1 gegebenen Schwellenwerte extrahiert und in einem weiteren Schritt einzeln mit den bereits ausgewählten T_{Land} -Daten räumlich verschnitten (Abb. 6.5 D–F). In nachfolgenden Arbeitsschritten wurden die Produkte dieser GIS-Operationen nochmals miteinander verschnitten, um potentielle Suchräume weiter einzuengen (Abb. 6.5 G–K).

Wie Abbildung 6.1 illustriert, wird bei der Ableitung von Suchräumen grundsätzlich zwischen ruralen und urbanen Situationen unterschieden werden müssen. *IMD₂₀₁₅* (der Versiegelungsgrad der Landoberfläche) ist, hessenweit betrachtet, hochselektiv und für die Ausdifferenzierung ländlicher Bereiche denkbar ungeeignet, da sie nicht versiegelt sind. Ähnliches, wenn auch nicht in dieser Stärke, gilt umgekehrt für *TCD₂₀₁₅* (»Kronendichte«), die in ruralen Bereichen hervorragend differenziert, in urbanen Gebieten – aufgrund fehlender Bäume – aber oft versagen muss.

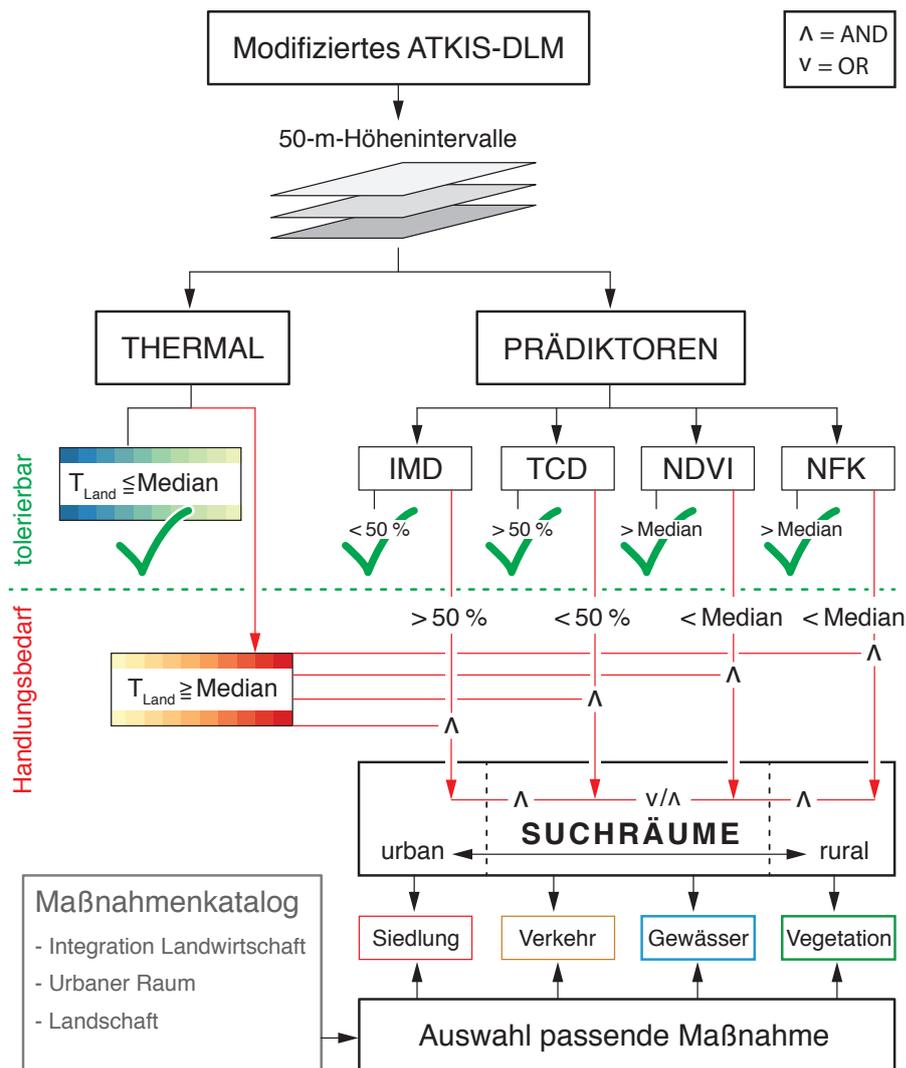


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der GIS-basierten Ableitung von Suchräumen. Aus einem modifizierten vektorisierten Landschaftsmodell werden, nach seiner Zerlegung in Höhenintervalle, Polygone extrahiert, die mit ihren Mittelwerten der (i) Oberflächentemperatur und (ii) ausgewählter Prädiktoren (Grad der Oberflächenversiegelung (IMD), Kronendichte (TCD), Vegetationsvitalität (NDVI) und Wasserverfügbarkeit (BGR_NFK)) definierte Schwellenwerte unter- resp. überschreiten. Die ausgewählten Polygone werden jeweils zuerst nach dem Muster (i) AND (ii) verschnitten. Die räumlichen Produkte dieser Operation werden nachfolgend miteinander verschnitten, um potentielle Suchräume weiter einzugrenzen.

6.2 Identifizierte Suchräume

Abbildung 6.5 zeigt einen Ausschnitt des Ergebnisses der Suchraum-Suche für das Höhenintervall 71–100 m im Bereich des Rhein-Main-Tieflandes und des Nördlichen Oberrhein-Tieflandes.

Die folgenden Schritte resp. Szenarien der Identifikation von Suchräumen sind auf den einzelnen Tafeln von Abb. 6.5 – jeweils in Form von vektorisierten Masken, die die einzelne Stufe der Suchraumidentifikation repräsentieren – dargestellt. Im ersten Schritt werden die vergleichsweise

stärker erwärmten Flächen selektiert, die für Maßnahmen besonders relevant sind (Abb. 6.2, 6.5):

- C) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$
Alle Landschaftsbereiche mit einem $T_{Land} < THERMAL$ -Median – das sind mutmaßlich nicht überwärmte Landschaftsbereiche – sind von hieran nicht mehr Bestandteil der Suchraum-Identifikation.

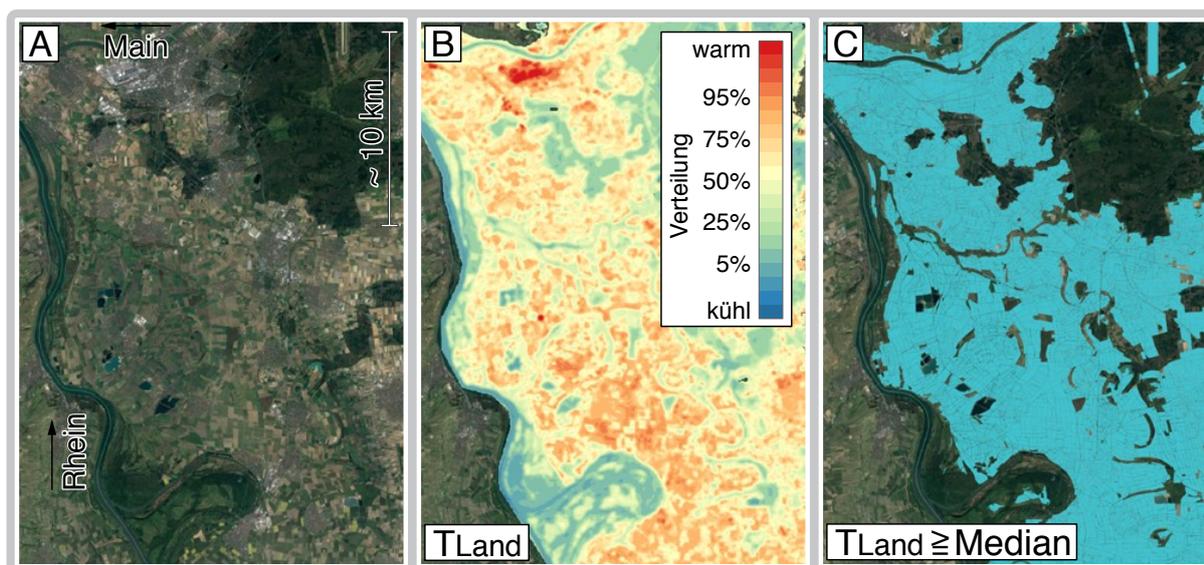


Abbildung 6.2: Abgeleitete Suchräume für das Höhenintervall 71–100 m, Ausschnitt (A) – Nördliches Oberrheintiefland und Rhein-Main-Tiefland (KLAUSING, 1988). Aus der klassifizierten Raster-Verteilung der Temperatur der Landoberfläche (B) wurden räumliche Statistiken für Polygone mit Landnutzungsbezug ausgelesen. Polygone, die definierte Schwellenwert-Kriterien erfüllen – in diesen Fall $T_{Land} \geq Median$ – wurden extrahiert (C). Sie dienen als Suchraum für Maßnahmentypen, die im folgenden weiter eingegrenzt werden.

Die in Tafel C (Abb. 6.2) als überwärmte Flächen identifizierten Suchräume machen gemäß der Herleitung etwa die Hälfte der Flächen aus. Um die Maßnahmen später effizient räumlich zuordnen zu können, werden deshalb weitere Eingrenzungen des Suchraumes vorgenommen. Hierzu erfolgen zunächst einfache räumliche Verschneidungen überwärmter Landschaftsbereiche, d. h. der in Tafel C) gezeigten Räume, mit Räumen, in denen die Merkmale der in Kap. 3.2 identifizierten erfolgreichen Prädiktoren mutmaßlich nachteilig ausgeprägt sind, d. h. den Variablen, die die Überwärmung besonders gut erklären (Abb. 6.3, 6.5).

- D) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$ UND $Kronendichte < 50\%$
Erfasst werden überwärmte Suchräume mit defizitärer Ausstattung an Gehölzen. Steuerbar über den TCD_{2015} -Schwellenwert, können hierbei z. B. alle Wälder ausgeschlossen werden.
- E) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$ UND $Pflanzenvitalität < Median_{NDVI_{med}}$
Erfasst werden überwärmte Suchräume mit defizitärer oder gar fehlender Pflanzenvitalität.
- F) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$ UND $nutzbare\ Feldkapazität < Median_{BGR_NFK}$
Erfasst werden überwärmte Suchräume mit einem Mangel an pflanzenverfügbarem Wasser.

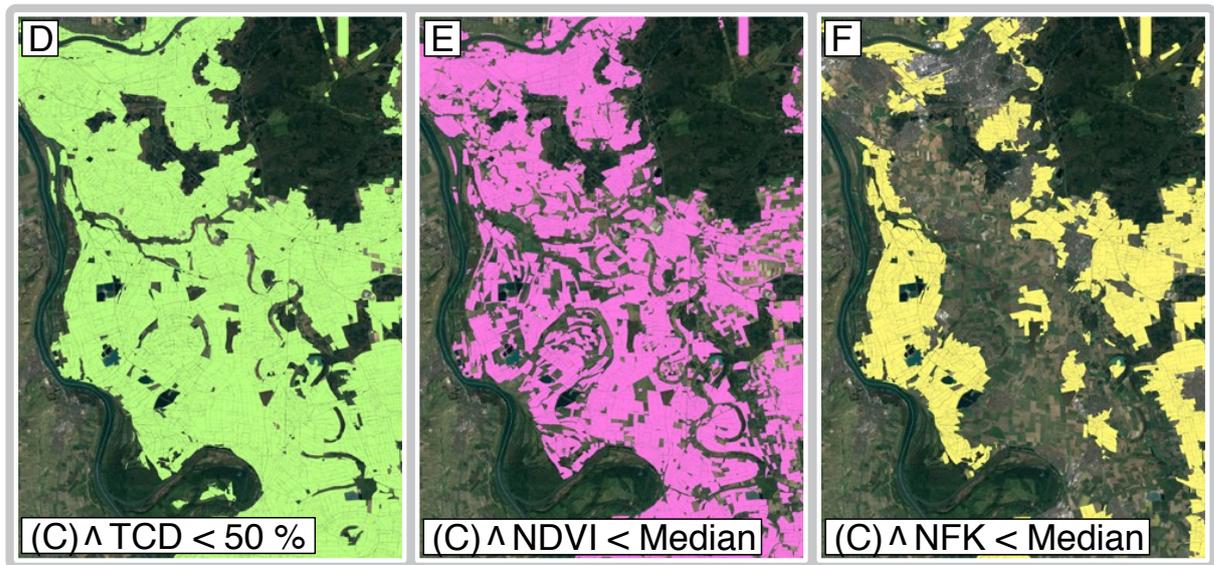


Abbildung 6.3: Abgeleitete Suchräume für das Höhenintervall 71–100 m, die Ausschnitt zeigen die im ersten Schritt ausgewählten, besonders erwärmten Polygone (C) in räumlicher Verschneidung mit bestimmten Ausprägungen ausgesuchter Prädiktoren (D–F). Dabei handelt es um Flächen mit vergleichsweise geringer Kronendichte (D), geringer Pflanzenvitalität (E) und geringem Bodenspeichervermögen (F).

Die räumlich-inhaltliche Selektivität der Verschneidungsprodukte kann erhöht werden, indem multiple Verschneidungen vorgenommen werden. Hierbei wird das räumliche Limit durch den Prädiktor mit der flächenmäßig geringsten Ausbreitung gesetzt (dessen Erstreckung sich allerdings über den gewählten Schwellenwert variieren lässt) (Abb. 6.4, 6.5).

- G) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$ UND $Kronendichte < 50\%$ UND $Pflanzenvitalität < Median_{NDVI_{med}}$
Erfasst werden überwärmte Suchräume mit defizitärer Baumausstattung und mit defizitärer oder gar fehlender Pflanzenvitalität.

Hier werden die Bereiche dargestellt, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der Vegetationsdichte und -vitalität besonders wirksam sein werden.

- H) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$ UND $Kronendichte < 50\%$ UND $Pflanzenvitalität < Median_{NDVI_{med}}$ UND $nutzbare\ Feldkapazität < Median_{BGR_NFK}$
Erfasst werden überwärmte Suchräume mit defizitärer Baumausstattung, mit defizitärer oder gar fehlender Pflanzenvitalität und mit einem Mangel an pflanzenverfügbarem Wasser.

Im Unterschied zur Tafel G sind hier zusätzlich die Bereiche ausgewiesen, in denen die Verbesserung der Wasserretention besonders empfehlenswert ist.

- K) $T_{Land} > Median_{THERMAL}$ UND $Versiegelungsgrad > 50\%$.
Erfasst werden überwärmte Suchräume mit hohem Versiegelungsgrad. Hierbei handelt es sich im Regelfall um ATKIS-Siedlungsbereiche oder Verkehrsflächen; Vegetationsbereiche und Gewässerflächen sind unversiegelt.

Auf den hier ausgewiesenen Flächen bieten sich Maßnahmen an, die der starken Erwärmung der versiegelten Bereiche entgegenwirken.

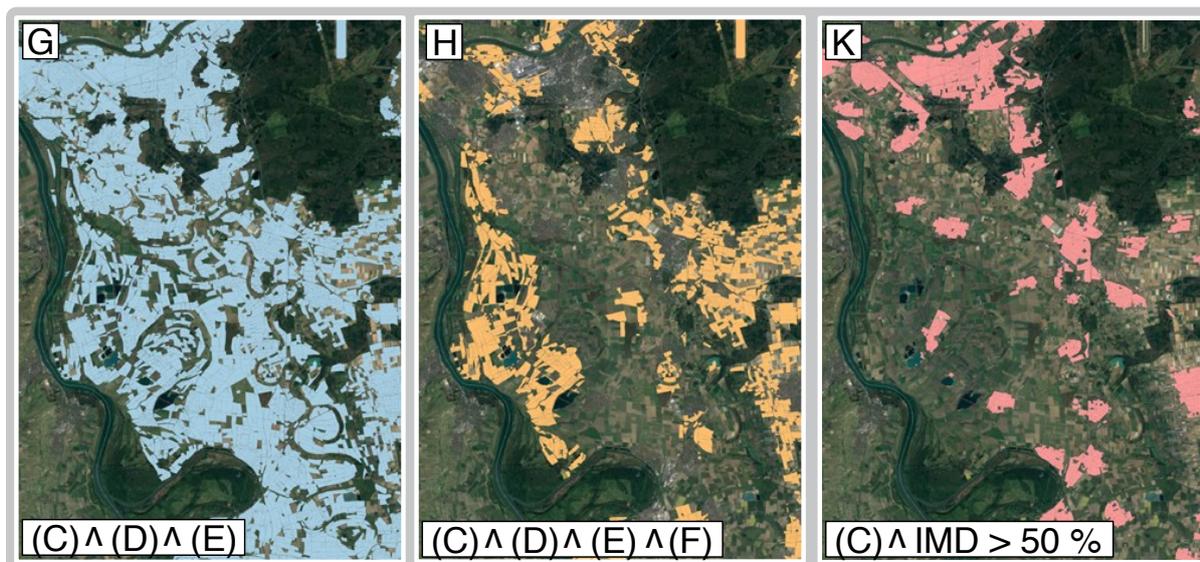


Abbildung 6.4: Abgeleitete Suchräume für das Höhenintervall 71–100 m, die Ausschnitt zeigen die im ersten Schritt ausgewählten, besonders erwärmten Polygone (C) in multipler räumlicher Verschneidung mit bestimmten Ausprägungen ausgesuchter Prädiktoren (G und H) bzw. verschnitten mit der Versiegelungsgrad (K). In Tafel G sind die überwärmten Flächen mit geringer Kronendichte und geringer Pflanzenvitalität verschnitten. Tafel H zeigt das Ergebnis der Verschneidung von Tafel G mit den Flächen geringer Bodenwasserspeicherkapazität.

Bereits bei der Extraktion der oberen 50 Prozent von T_{Land} wird deutlich, dass sich die wärmsten Landschaftsbereiche und Waldflächen räumlich ausschließen (Abb. 6.5 C), da Waldgebiete die bestgekühlten Teile der Landschaft repräsentieren (vgl. Kap. 3.3.2). Diese Aussage relativiert sich mit steigender Höhe, da Wald-Beobachtungen in diese Richtung zahlenmäßig zunehmen und somit zwangsläufig auch obere Bereiche der Thermalverteilung besetzen müssen.

Weiterhin fallen, auf der Ebene des gesamten Höhenintervalls, riparische Zonen und Auenbereiche, Altarme und Gehölzstreifen, einige extensiv genutzte Grünflächen, Lichtungen in größeren Waldgebieten sowie stehende Gewässer und ihre Randstreifen durch diesen Filter. Diese Landschaftsbereiche sind relativ gut gekühlt.

Nicht überraschend ist die Koinzidenz von Flächen mit niedrigen Kronendichtewerten (Abb. 6.5 D) und Flächen geringer Pflanzenvitalität (Abb. 6.5 E). Die Gründe hierfür liegen auf der Hand: Sämtliche in das Thermal-Mosaik eingegangenen Satellitenszenen sind während der vegetationsaktiven Phase zwischen Ende Mai und September aufgenommen worden, Laubbäume waren zu jedem Aufnahmedatum also belaubt, d. h. nach *NDVI* vital. Eine eventuelle Differenzierung mittels *NDVI* zwischen den drei verfügbaren »Wald«-Klassen würde deshalb eine hierfür angepasste Methodik erfordern.

Um Suchräume, die durch die Verschneidung von $T_{Land} \geq \text{Median}$ mit Flächen mit defizitärer *TCD*- und/oder *NDVI*-Ausstattung gebildet wurden, semantisch noch stärker zu belegen, wurden weitere Verschneidungen mit Flächen mit Mangel an pflanzenverfügbarem Wasser ($BGR_NFK < \text{Intervall-Median}$) vorgenommen (Abb. 6.5 H). Suchraumspezifische Maßnahmen könnten in den somit identifizierten Gebieten daher nicht nur die Pflanzenwelt selbst, sondern auch entsprechende Bodeneigenschaften adressieren. Die in Kap. 3.2.3 angesprochenen Schwächen des Prädiktors

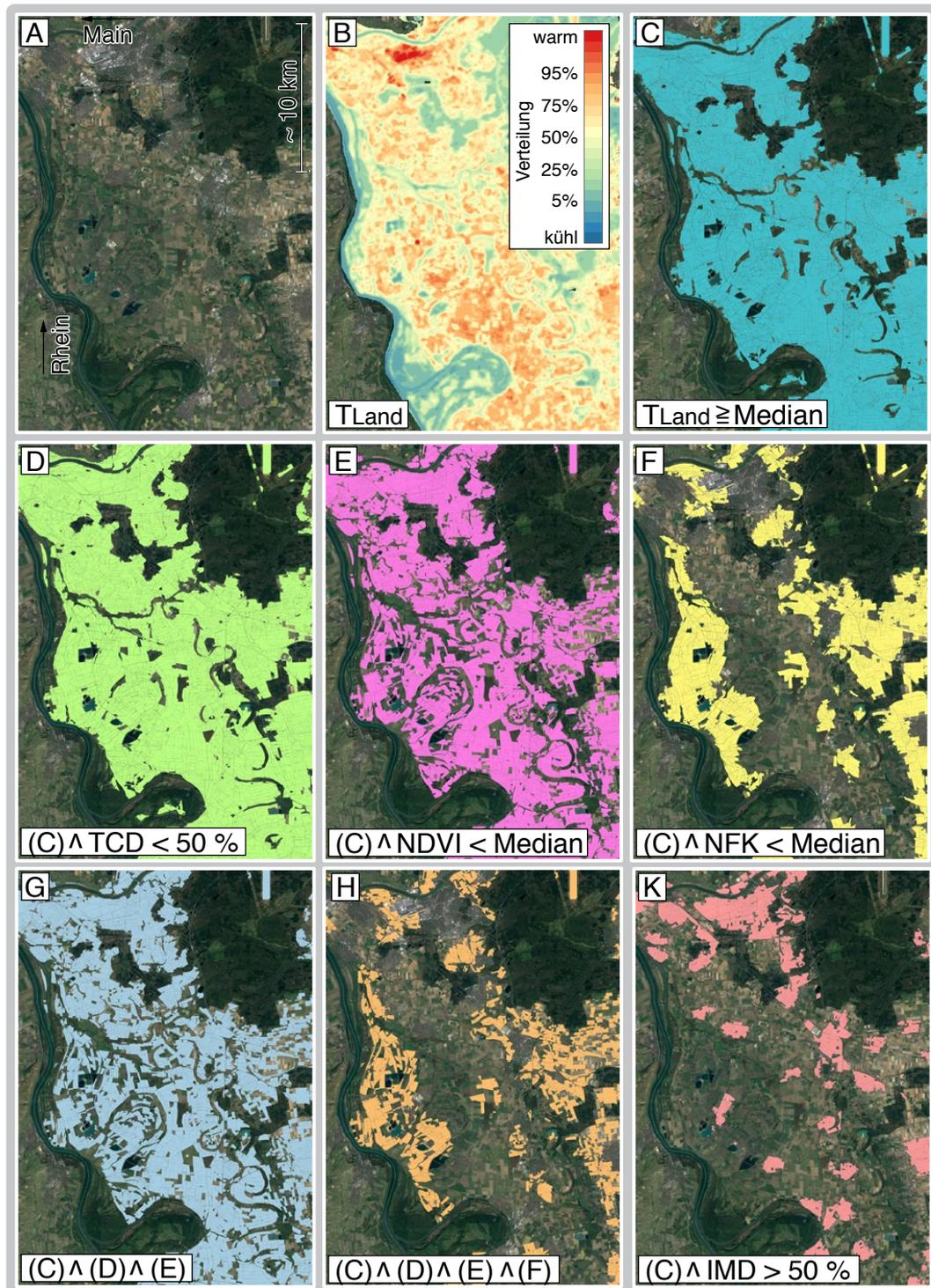


Abbildung 6.5: Abgeleitete Suchräume für das Höhenintervall 71–100 m, Ausschnitt (A) – Nördliches Oberrheintiefland und Rhein-Main-Tiefland (KLAUSING, 1988). Aus der klassifizierten Raster-Verteilung der Temperatur der Landoberfläche (B) wurden räumliche Statistiken für Polygone mit Landnutzungsbezug ausgelesen. Polygone, die definierte Schwellenwert-Kriterien erfüllen – in diesen Fall $T_{Land} \geq \text{Median}$ – wurden extrahiert (C). Mit (C) wurden dann, ebenfalls schwellenwert- und regelbasiert ($\wedge = \text{AND}$), Polygone mit bestimmten Ausprägungen ausgesuchter Prädiktoren räumlich verschnitten (D–F). Die Produkte dieser Operation können dann abermals untereinander verschnitten werden (G–K), um Suchräume weiter einzuzugrenzen.

BGR_NFK bleiben allerdings bestehen. Aus diesem Grund bedürfen sein Einsatz und die Interpretation der Ergebnisse daraus unbedingt der Interaktion des Benutzers.

Auffällig ist die hohe Selektivität des Prädiktors »Versiegelungsgrad« (IMD₂₀₁₅), der, wenn als räumlicher Bezug für die Verschneidung verwendet, zu einer vollständigen Diskriminierung ruraler Bereiche führt. Dies spricht zuerst für die hohe Qualität der von Copernicus/European Environment Agency (EEA) bereitgestellten 20-m-Rasterdaten. Flächen im ländlichen Raum sind eben nicht versiegelt¹ und für eine einfache Unterscheidung zwischen urbanen und ruralen Bereichen wären Informationen aus den ATKIS-DLM-Daten somit durchaus suffizient gewesen. Die Nutzung der von 0 bis 100 skalierten IMD-Daten gestattet aber bedeutende Unterscheidungen, die weit über eine einfache Aussage der Komplexität »Urban oder Rural« hinausgeht – über das Maß der Versiegelung ist eine Filterung der Daten nach dem Grad der Urbanität von Flächen möglich und eine kausale Differenzierung der Oberflächentemperaturen innerhalb urbaner Räume wird greifbar.

6.3 Biosphärenregion Rheingau-Taunus

Das Prädikat »Biosphärenregion« kann von der UNESCO an Regionen verliehen werden, die in besonderer Weise für Nachhaltigkeit in der regionalen Entwicklung und den Erhalt von biologischer Vielfalt sowie den zugehörigen Lebensräumen stehen. Die Idee hinter dem Konzept der Biosphärenregion adressiert somit nicht nur den Schutz von Ökosystemen, sondern auch die nachhaltige Integration von Mensch und Umwelt.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, und unter Beteiligung von regionalen Akteuren und Bürgern der Region, soll zum Zeitpunkt ermittelt werden, ob eine *Biosphärenregion Rheingau-Wiesbaden-Main-Taunus* (BRT) perspektivisch umsetzbar sein könnte.

Die Landnutzung einer potentiellen BRT wird im Wesentlichen durch ihre naturräumliche Ausstattung und Gegebenheiten bestimmt. Aus naturräumlicher und auch aus naturschutzfachlicher Sicht ist die BRT überaus *heterogen*. Sie besteht, stark generalisiert, aus dem Verdichtungsraum des Rhein-Main-Gebietes, den rheinnahen Weinanbaugebieten und Obstbaulandschaften des Rheingaus (geringe naturschutzfachliche Bedeutung), den Waldlandschaften des Vor-, Hoch- und Hintertaunus (schutzwürdig resp. besonders schutzwürdig) sowie den agrarisch geprägten, offenen Kulturlandschaften des Limburger Beckens und der Idsteiner Senke (schutzwürdig mit Defiziten, vgl. BfN 2012).

Mit Hinblick auf die mögliche Etablierung einer BRT stellt sich die *Frage, ob sich der beschriebene Raum in besonderer Weise zur Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung eignet*. Abb. 6.6 zeigt thematische Übersichten einer potentiellen BRT, mit (A) der Landnutzung, (B) exemplarisch den besonders aussagekräftigen Prädiktoren »Kronendichte« (TCD₂₀₁₅) und »Versiegelungsgrad« (IMD₂₀₁₅), (C) T_{Land} und (D) vergrößerten Ausschnitten der Mittelgebirgs-Waldlandschaft um Obergladbach (C₁) sowie des rechtsrheinischen Verdichtungsraumes bei Amöneburg (C₂).

Die zentralen Bereiche der BRT (das sind die Höhenzüge des Taunus), der Westen und auch große Teile des Nordens sind von Mischwäldern besetzt (die Kämme der Höhenzüge tragen Na-

¹Ableitungskriterien siehe technisches Dokument COPERNICUS/EEA.

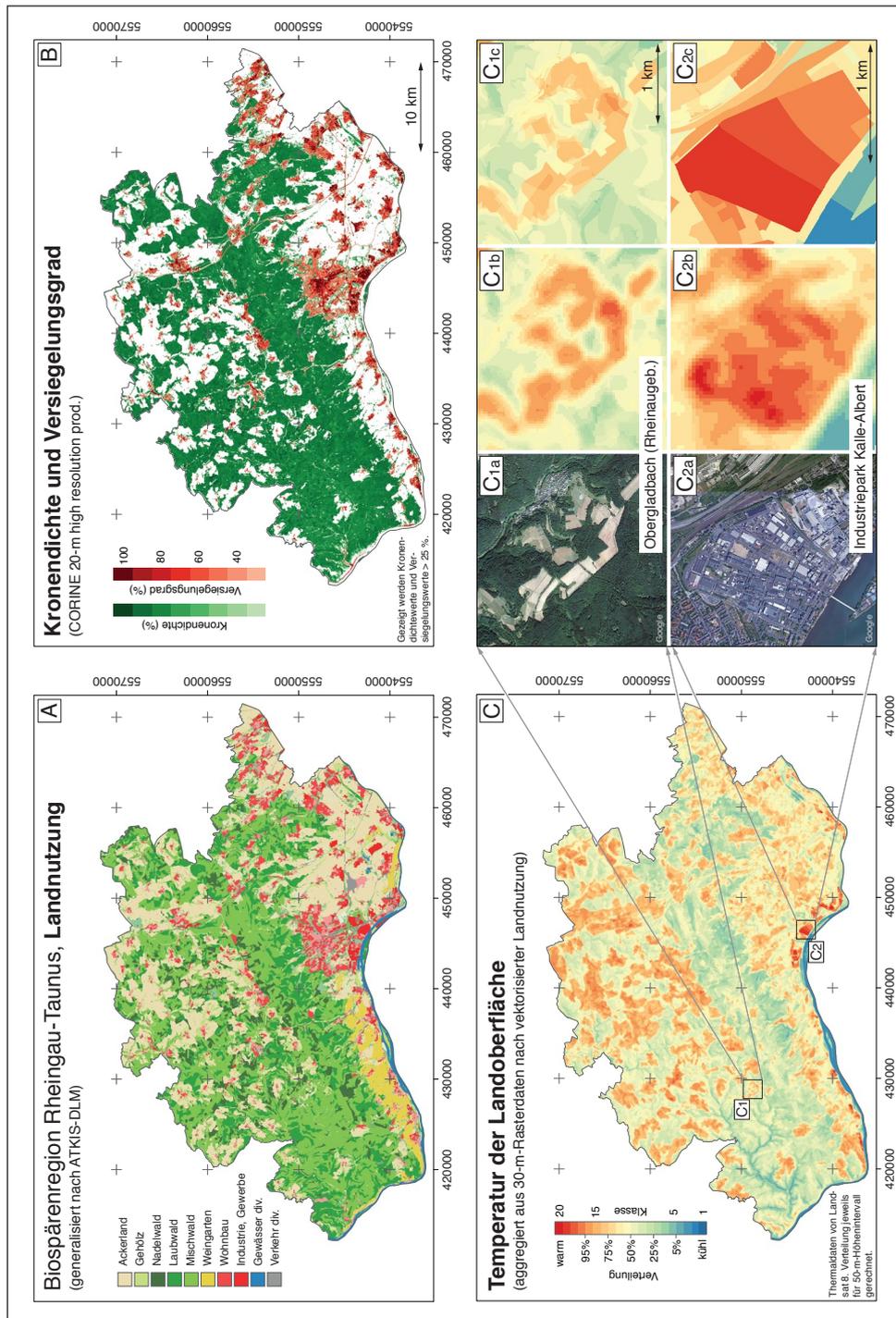


Abbildung 6.6: Mögliche Biosphärenregion Rheingau-Taunus – Landnutzung (A), »Kronendichte« und »Versiegelungsgrad« (B), T_{Land} (C) und Beispielorte Obergladbach (Rheinaugebirge, C1) und Industriepark Kalle-Albert (C2). A) Flächenmäßig bedeutendste Landnutzungen generalisiert aus ATKIS-DLM-Daten. B) Kronendichte (grün) und Versiegelungsgrad (rot) in Flächenprozent per 20-m-Pixel (Daten: Corine). C) T_{Land} , aggregiert aus Rasterdaten in Verschneidungsprodukte (d. h. Polygone) aus ATKIS-DLM und Standorttypisierung Boden (Abb. 3.2), jeweils für 50-m-Höhenintervall (Hessen gesamt). D) Landschaftsausschnitte – C1) Obergladbach im Rheinaugebirge, C2) Industriepark Kalle-Albert, Amöneburg, hoch-urbanes Rhein-Main-Tiefeland; C_a) Satellitenbild, C_b) 30-m-Thermal-Raster, C_c) Thermal-Rasterstatistik bezogen auf Landnutzungsflächen.

delwälder, Laubwälder finden sich v.a. an südexponierten oberen Hängen), die sich in Richtung Osten zugunsten einer agrarisch geprägten Offenlandschaft ausdünnen. An den rechtsrheinischen Hängen dominieren Obst- (untere Hangbereiche) und Weinanbau (untere bis mittlere Lagen, vgl. auch 3.5). Die südliche Mitte der BRT wird durch den Ballungsraum Wiesbaden dominiert, der sich nach Westen, bis nach Kriftel und Hattersheim am Main, öffnet und in eine agrarisch dominierte Offenlandschaft übergeht.

Das Muster der in Abb. 6.6 A gezeigten Landnutzungen deckt sich hervorragend mit der Verbreitung der Prädiktoren »Kronendichte« und »Versiegelungsgrad« in Karte B (es werden jeweils nur *TCD₂₀₁₅*- und *IMD₂₀₁₅*-Werte $> 25\%$ gezeigt) – Bereiche mit *TCD₂₀₁₅*-Werten über dem genannten Schwellenwert sind Wälder, dargestellte Bereiche mit *IMD₂₀₁₅* $> 25\%$ sind Siedlungen, tragen aber verschiedene Siedlungsmerkmale (z. B. »Wohnbau unspez.«), Bereiche ohne *TCD₂₀₁₅*- resp. *IMD₂₀₁₅*-Vorkommen sind landwirtschaftlich genutzt, sei es als Grünland oder für Obst-, Wein- oder anderen Ackerbau. Schmale Streifen mit *TCD₂₀₁₅* $> 25\%$ sind i. d. R. Uferzonen oder Säume von Verkehrsadern innerhalb waldfreier Gebiete und tragen das ATKIS-Merkmal »Gehölz«. Flächen mit *TCD₂₀₁₅*-Werten und *IMD₂₀₁₅*-Werten über dem Schwellenwert schließen sich gegenseitig aus.

Der Abgleich von Abb. 6.6 C mit den Karten A) and B) unterstreicht schließlich, dass die Wälder in der gesamten BRT die kühlest Landnutzungen darstellen – niedrige *THERMAL*-Werte decken sich mit hohen *TCD₂₀₁₅*-Werten und mit jeweils einer der Wald-Klassen aus ATKIS. Dies ist *keine Funktion der Höhe*, da die *THERMAL*-Daten ja für Höhenintervalle von jeweils 50 Metern gerechnet wurden. Hohe Thermalwerte besetzen passgenau baumlose Areale, d. h. Siedlungs- und Ackerbereiche, aus denen sich Gehölzstreifen mit ihren erkennbar kühleren Temperaturen abheben.

Siedlungen finden sich grundsätzlich oberhalb des *THERMAL*-Medians und besonders große versiegelte Flächen der Nutzung »Industrie und Gewerbe« erweisen sich als herausragend überwärmt (z. B. Gewerbegebiet Flörsheim am Main (ehem. Hertiegelände), Mainz-Kastel Storage Station, Gewerbegebiet zwischen Schiersteiner Kreuz und Wiesbaden Äppelallee, Betriebsgelände der Federal-Mogul Wiesbaden GmbH, Industrie- und Gewerbegebiet Oestrich), aber auch baumarme (*TCD₂₀₁₅* niedrig), hochversiegelte (*IMD₂₀₁₅* hoch) Innenstadtbereiche wie z. B. in Rüdesheim am Rhein erscheinen thermisch problematisch.

Abbildung 6.6 C₁–C₂ zeigt exemplarisch Ausschnitte einer moderat temperierten und einer stark überwärmten Oberflächensituation.

► C_{1a}–c) Der Ort Obergladbach im Rheinaugebirge ist im Thermalbild an den, im Vergleich zum Umland, erhöhten Oberflächentemperaturen gut erkennbar. Auch die umliegenden Ackerflächen – ihrerseits durch kleinere Waldflächen getrennt – sind deutlich zu sehen und werden nach dem Auslesen der Rasterstatistik in die einzelnen Landnutzungspolygone sinnvoll repräsentiert. Interessanterweise stellt nicht die Siedlung selbst, sondern ein landwirtschaftlicher Schlag im Süden der Ortslage den lokalen Wärmepol dar.

► C_{2a}–c) Eine ebenfalls gute Differenzierung von *THERMAL*-Werten lässt sich für den rekordverdächtig überwärmten Industriepark Kalle-Albert feststellen. Das Areal hat eine versiegelte Gesamtfläche von $> 1\text{ km}^2$ und der Hitzekern liegt offensichtlich im Westen des Areals, inmitten des Komplexes von Gebäuden mit dunklen Dachflächen. Die *THERMAL*-Werte innerhalb des Industrieparks sind allesamt außerordentlich hoch, nehmen allerdings von W nach E ab, was sich in den Durchschnittswerten der flächenmäßig doch recht großen Polygone korrekt widerspiegelt.

Eignet sich der Raum der potenziellen Biosphärenregion Rheingau-Taunus nun in besonderer Weise als Untersuchungsgebiet im Sinne der Ziele dieser Studie? Diese Frage kann in gleich mehrfacher Hinsicht mit ja beantwortet werden.

Zum einen bildet die BRT, aus naturräumlicher Sicht, das Bundesland Hessen gut ab – die Höhenlagen variieren zwischen ~70 und ~630 m über Null, verschiedenste Kombinationen von Exposition, Hangneigung und Landnutzung sind vorhanden. Darüber hinaus sind große und auch kleine Areale der verschiedenen Landnutzungen vorhanden, es gibt, insbesondere entlang des Rheins, beträchtliche Ansiedlungen von Industrie und Gewerbe, es gibt jegliche Art von Infrastruktur, es gibt mit Wiesbaden einen Ballungsraum von mehreren Dutzend km² Größe, es gibt zusammenhängende Offenlandflächen von mehreren 10³ ha Fläche, es gibt Waldareale im Wisper- und Hochtaunus, die als (besonders) schutzwürdig eingestuft worden sind, und es gibt ausgedehnte Obst- und Weinbaugebiete an den Hängen entlang des rechtsrheinischen Ufers. Das ist Hessen im Kleinformat.

Darüber hinaus, und nun fokussierend auf die nachhaltige Integration von Mensch und Umwelt – eine Kernidee hinter den UNESCO Biosphärenregionen – können das Wissen über einen intakten Landschaftswasserhaushalt und dessen integrative Einbindung in die Regionalplanung einen entscheidenden Beitrag zu ebenjenem Thema leisten. Einem, als mit dem Klimawandel wahrscheinlich steigend prognostiziertem, gesundheitlichem Risiko für die Bevölkerung (WATTS ET AL., 2018) würde somit aktiv – und damit im Sinne der Idee einer Biosphärenregion – entgegengewirkt.

7 Vorschläge für Pilotprojekte

Pilotprojekte, die der eigentlichen Umsetzung von Maßnahmen(-typen) vorausgehen sollen, sind zum einen als Test für die tatsächliche Durchführbarkeit der in diesem Gutachten erarbeiteten Handlungsvorschläge zu verstehen. Zum anderen sollen Pilotprojekte wichtige Praxiserfahrungen liefern, Antworten auf bestehende Fragen generieren und natürlich als Paradigmen zur Nachahmung dienen.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, müssen Pilotprojekte wesentliche Kernforderungen erfüllen. Sie sollen

- kurzfristig initiiert sein,
- möglichst kontrollierten Rahmenbedingungen unterliegen,
- quantifizierbare Effekte versprechen und
- in ihrer Gesamtheit die volle Bandbreite möglicher Maßnahmen abbilden.

Als Teil des IKSP 2025 wird unter anderem auch die Ausrichtung von Hessens Natura 2000-Maßnahmenplanung auf Hessens Klimaschutzziele adressiert. Diese von der Neuausrichtung betroffenen Maßnahmen decken sich inhaltlich oftmals mit den Maßnahmen aus Kapitel 5 der hier vorliegenden Studie, beziehungsweise involvieren diese zumindest. Die Bandbreite der im IKSP genannten Maßnahmen umfasst unter anderem

- die Wiedervernässung von ehemaligen Feuchtgebieten in FFH- und Vogelschutz-Gebieten,
- die Intensivierung der Gewässer- und Auenrenaturierung,
- die Vermeidung von zukünftiger Landschaftszerschneidung,
- die Systematisierung und Bewertung der Klimavulnerabilität von Böden,
- der Schutz von Moorböden und im Speziellen die Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung von Moorflächen sowie
- die Steigerung der Energieeffizienz von Gewerbegebieten.

Bereits begonnene bzw. umgesetzte Natura-2000 resp. IKSP-Maßnahmen böten also die Möglichkeit, zeitnah und wenig kostenintensiv den Erfolg wasserhaushaltlicher Eingriffe in die Landschaft im Sinne der hier vorliegenden Grundsatzstudie zu evaluieren und zu quantifizieren. Eine Liste geeigneter Projekte gälte es zusammenzustellen und abzustimmen.

Auf der Basis der oben genannten Kriterien werden im Folgenden Vorschläge für Pilotprojekte im städtischen und im ländlichen Raum präsentiert und deren Auswahl begründet.

7.1 Städtischer Raum

7.1.1 Dachbegrünung

Industrie- und Gewerbegebiete sind großflächige Hot-Spots in der hessischen Landschaft, die die Nachbarschaft zu Siedlungen und Verkehrsanlagen suchen. Typischerweise sind die betreffenden Areale großflächig (oft dunkel) versiegelt und mit Gebäuden mit extensiven Dachflächen (ebenfalls dunkle Oberflächen) der Größenordnungen $10^4 - 10^5 \text{ m}^2$ bebaut. Bezeichnenderweise überragen die Oberflächentemperaturen dieser Dachflächen sogar die ihrer asphaltierten, vegetationslosen Umgebungen (Parkplätze, Stellflächen, Unland) noch bei weitem¹.

Aber was genau passiert über einer heißen Fläche von mehreren Hektar Ausdehnung inmitten einer kühleren Umgebung? Luftmassen über der Fläche werden erwärmt und zum Aufstieg gezwungen. Hierdurch etabliert sich ein thermisches Tief über der Fläche und Umgebungsluft wird entlang des Druckgradienten in das Tief geführt, um dort dann erwärmt und zum Aufstieg gezwungen zu werden. Es entsteht somit ein bodennahes thermisches Druckgebilde, das kontinuierlich Umgebungsluft importiert, erwärmt und in größere Höhen befördert. Dieses Prinzip aber gilt es im Sinne einer gut gekühlten Landschaft zu vermeiden. Die Entschärfung der genannten thermischen Hot-Spots wird somit zu einem wichtigen Baustein für die lokale Abkühlung der bodennahen Luft. Sie endet aber nicht bei der Kühlung von Dachflächen. Auch die umliegenden versiegelten Stell-, Park- und Produktionsflächen wirken in der beschriebenen Weise auf ihr Umland und müssen Berücksichtigung in zukünftigen Planungen finden.

7.1.2 Entsiegelung und Zwischennutzung / Umwidmung von Brachflächen

Versiegelte vegetationslose Flächen – und unter diesen insbesondere die Fußgängerzonen – in Innenstadtbereichen sind Leuchttürme der Überwärmung. Wie in den Kap. 3.4.1 und 3.4.2 diskutiert und belegt, sind versiegelte Flächen generell nachteilig für das Stadtklima und somit, in der Folge, auch für das Wohlergehen der Stadtbevölkerung. Nachteilige Versiegelungseffekte werden durch die Absenz von Vegetation noch verstärkt, was eine Kombination diesbezüglicher Maßnahmen nahelegt – bei der Zwischennutzung von Brachen sind die größten Effekte bei Bepflanzung UND Entsiegelung erwartbar. Diese Flächen erhalten sozusagen eine Auszeit, eine generelle Entschleunigung der urbanen Verdichtung ist ein wünschenswerter Nebeneffekt hierdurch².

Beim Thema der nachteiligen Effekte von Versiegelung urbaner Flächen resp. Brachen drängen sich zwangsläufig Bilder aus großen Verdichtungsräumen auf. Beobachtungen aus Fernerkundungsdaten legen jedoch nahe, dass auch kleinere hessische Siedlungen das Problem der Überwärmung durch Komplettersiegelung ihrer Zentren, mit vorwiegend dunklen Asphaltdecken, haben. In den hier gemeinten Ortschaften dominieren dunkle Dachschildeln, sind die Gehsteige schmal und baumarm, existieren wenig Gärten, Parks oder grüne Hinterhöfe und die asphaltierten zentralen Plätze und Kreuzungen sind vergleichsweise raumgreifend. Das Durchbrechen dieser klimatisch

¹Einige Beispiele wurden in den Kap. 3.3.3 und 6.3 genannt. Eine Liste mit betroffenen Arealen wäre zwanglos erweiterbar.

²Das Maßnahmenblatt „Aufwertung von Brachflächen“ in Kap. 5.4.2 liefert Informationen zu diesem Maßnahmentyp.

nachteiligen Strukturen böte die Möglichkeit von Effekten direkt vor der Haustür der betroffenen Bürger.

Entsprechende Pilotprojekte – die mit der Entsiegelung und Begrünung strategisch besonders geeigneter Flächen beginnen sollten – an diesen Orten sollten die Türöffner für nachfolgende Maßnahmen des Klimaschutzes und der -anpassung sein, die dann, auf der Ebene ganzer Ortschaften integrativ wirken sollen.

7.2 Ländlicher Raum

Maßnahmen im ländlichen Raum unterscheiden sich von Maßnahmen in Siedlungsgebieten durch die größere räumliche Ausdehnung der Zielflächen, auf denen sie wirken sollen. Entsiegelung ist in ruralen Gebieten nicht relevant, Evaporationsprozesse müssen somit v. a. über die Faktoren Vegetations- (bzw. Kronen-)dichte, Pflanzenvitalität und die Verfügbarkeit von Wasser gestärkt werden.

7.2.1 Wiedervernässung von Feuchtgebieten

Wiedervernässung von Feuchtgebieten ist die, die Kühlung der Landschaft betreffend, unterstellt wirkungsvollste Maßnahme. Wiedervernässung soll relevante Wassermengen für einzelne Landschaftselemente zur Verfügung stellen, die in der Vergangenheit vom Grundwasserstrom abgekoppelt wurden. Hierbei kann es sich z. B. um Altarme von Flussläufen, Auwälder und Niederungen, ehemalige Feuchtwiesen und Grünländer handeln.

Wiedervernässung hat die Reaktivierung inaktiver oder reliktscher Feuchtgebiete zum Ziel. Diese Maßnahme zielt damit auf die Verringerung des Grundwasserflurabstandes, was eine Steigerung der Menge des pflanzenverfügbaren Wassers zur Folge haben soll. Der lokalklimatische Einfluss von Feuchtgebieten ist hinlänglich dokumentiert und auch in den Thermaldaten dieser Studie hinterlassen sie ihren deutlichen Fußabdruck – die in Abb.3.1 gezeigten „Altarme“ östlich der Kühkopf-Knoblochsaue z. B. sind reliktsche Flussschleifen des vormaligen Neckarverlaufs. In diesen Bereichen fließt heute kein Fluss mehr. Sie sind aber gut durchfeuchtet, baumbestanden und landwirtschaftlich höchstens extensiv genutzt. Klar heben sich diese bogenförmigen Landschaftselemente im Thermalbild von ihrer Umgebung ab, indem sie das rechtsrheinische Tiefland bis zu den Ausläufern des Odenwaldes wie eine Kühlrippe durchbrechen. Natürlich kann eine einzelne Sequenz von Altarmen nicht die Kühlung einer Region wie des Oberrheingraben betreiben. In den Landsat-8-Thermaldaten zeigen sich aber durchaus Kühlungseffekte über die Grenzen der Altarm-Bereiche hinaus – ein Phänomen, das sich mit Beobachtungen anderer Studien deckt (vgl. Maßnahmenblatt „Renaturierung von Feuchtgebieten“ in Kap. 5.4.1).

7.2.2 Klimaresiliente Agrarsysteme

Ein großer Anteil der Landesfläche wird durch die landwirtschaftliche Nutzung bestimmt, die mit ausgedehnten Ackerschlägen und vor allem nur wenigen Gehölzen oft zu den überwärmten Flächen zählt. Durch die Kombination aus großem Flächenpotential und fehlender Verdunstungsleistung sind die landwirtschaftlichen Flächen prädestiniert für ein entsprechendes Pilotprojekt.

Das Ziel ist es, durch die Kombination der in Kap. 5.1 vorgestellten Maßnahmentypen für landwirtschaftliche Flächen zu demonstrieren, wie eine nachhaltige und zugleich zur Kühlung der bodennahen Luftschichten beitragende Landwirtschaft aussehen kann. Im Idealfall würde ein überschaubares (Teil-)Wassereinzugsgebiet schrittweise komplett umgestaltet. Maßnahmentypen, die hierbei in Kombination erprobt werden sollten, sind

- Contourfarming,
- die Anreicherung mit Gehölzen (Agroforst, Kurzumtriebsstreifen),
- die Integration von Muldenspeichern und
- die Steigerung der Humusgehalte auf der Fläche.

Für ein solches Pilotprojekt ist zunächst ein geeignetes Teileinzugsgebiet bzw. Flächen auszuwählen, die ein umfassendes Monitoring der verschiedenen Parameter ermöglichen. Im Rahmen des Monitorings würde sowohl die Entwicklung der bodennahen Lufttemperatur als auch des Landschaftswasserhaushaltes und zu erwartender Wechselwirkungen, etwa auf die Stoffausträge der Wassereinzugsgebiete, verfolgt werden, um die Effekte der verschiedenen Teilmaßnahmen zu erfassen und daraus schließlich Handlungsempfehlungen für die klimagerechte landwirtschaftliche Nutzung in Hessen abzuleiten.

7.2.3 Gewässerrenaturierung

Die Grenzen zwischen den Maßnahmen, Zielen und Effekten der Wiedervernässung von Feuchtgebieten und der Gewässerrenaturierung sind fließend. Grundsätzlich zielt die zuerst genannte Maßnahme aber eher auf den Grundwasserstrom, während die zweite Maßnahme das Oberflächenwasser im Fokus hat.

Die Rückführung von Oberflächengewässern in eine natürliche resp. naturnahe Form involviert verschiedene Antriebe der Landschaftskühlung, seien es die Etablierung von (mehr oder anderer) Ufervegetation, ein langsamerer Abfluss oder die (Re)Aktivierung von Überschwemmungsgebieten, in denen Oberflächenwasser stehen können, wie z. B. in Schilfpoldern³.

Die Daten dieser Studie (Kap. 3.3.2) lassen den Schluss zu, dass, in Bezug auf ihren Verdunstungsbeitrag, gerade der Ufervegetation eine herausragende Rolle zukommt. Die Transpiration dieser Vegetation ist hydrologisch in geringem Maße versorgungslimitiert. Für entsprechende Pilotprojekte gälte es also unter zweierlei Gesichtspunkten zu prüfen, ob Gewässersäume optimal mit Vegetation besetzt sind – in qualitativer und quantitativer Hinsicht.

Fazit: Die Kühlfunktion durch Verdunstung von Oberflächengewässern kann kaskadenartig aufgewertet werden – beginnend mit einer größeren Oberfläche, über den langsameren Abfluss bis hin zu geeigneter Ufervegetation, die die Gesamtverdunstung des hydrologischen Systems weiter steigert.

Das Ziel wäre es nunmehr, geeignete rezente Renaturierungsbereiche zu identifizieren und diese dann mit den in dieser Studie verwendeten Methoden auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen.

³Für einen Überblick siehe Maßnahmenblatt „Gewässerrenaturierung“ in Kap. 5.4.1.

8 Kommunikationsstrategie

Die Beauftragung des vorliegenden Grundsatzgutachtens ist ein weiterer Baustein in Hessens Bestrebungen, dem Klimawandel proaktiv zu begegnen. Angesichts der frühen Umsetzungsphase von L-19 sollte der Schwerpunkt auf die interne Kommunikation gelegt werden, d. h. zunächst die in der Präambel genannten Synergien zu anderen Maßnahmensteckbriefen des hessischen Klimaschutzplanes genutzt und Wissen hierüber ressortübergreifend ausgetauscht werden. Dies erfolgt über HMWEVW und HMUKLV. In einem zweiten Schritt sind relevante Wissenslücken zu einzelnen Maßnahmentypen zu schließen, z. B. über Pilotprojekte. Erst auf dieser Grundlage werden wissenschaftliche Publikationen vorgenommen. Zudem lässt sich erst dann sinnvoll über HMUKLV und HMWEVW prüfen, ob und wie eine erweiterte Kommunikation, z. B. über Stakeholder erfolgen kann.

Um eine nachhaltige Umsetzung bewirken zu können, ist jedoch auch die Adressierung und Beteiligung zukünftig Handelnder und Betroffener, d. h. lokaler Akteure, die die Umsetzung von Maßnahmen tangieren wird, erforderlich. Für Prozesse der Entscheidungsfindung und der Wissensgenerierung sollten deshalb von Anfang an die Interessen und Erfahrungen verschiedenster Stakeholder¹ zusammengeführt werden. Gemachte Erfahrungen aus vergleichbaren Prozessen der jüngeren Vergangenheit² werden dabei helfen.

8.1 Externe Teilöffentlichkeit

8.1.1 Stakeholder

Innovative Konzepte der Klimaanpassung sind nachhaltig nicht ohne Stakeholder-Teilhabe um- und durchsetzbar. Zu einer profunden Zusammenführung und Dissemination von Wissen bedarf es deshalb hierfür sensibilisierter und entsprechend vorgebildeter Multiplikatoren, die den Prozess bis hin zur Umsetzung konkreter Maßnahmen begleiten. Diese Multiplikatoren KÖNNTEN sinnvollerweise Teilnehmer des heute bereits aktiven Projektbegleitkreises sein, deren Kreis mit Experten aus dem Ministerium erweitert werden könnte. Hier sollte darauf geachtet werden, Experten zu gewinnen, um weitergehende wissenschaftliche Expertise einzubinden.

Der folgende, auf die Stakeholder gerichtete Kommunikationsprozess kann als erster Vorschlag auf ein dreiphasiges Modell generalisiert werden, das einen nur geringen projektbezogenen Grundkenntnisstand, aber eine hohe fachliche Kompetenz der Adressaten voraussetzt. Das HMWEVW könnte seine etablierten Kanäle zur ersten Ansprache der Stakeholder nutzen.

¹Das wären z. B. öffentliche Körperschaften, Naturschutzverbände, große Unternehmen und KMU, Wasser- und Bodenverbände, Waldeigentümer, Vertreter von Land-, Wasser- und Forstwirtschaft und der Regionalplanung.

²Implementierung Natura 2000, Umsetzung der WRRL, IKSP 2025

Im Verlauf des Beteiligungsprozesses könnte eine *Steuerungsgruppe* aus dem Ministerium alle Aktivitäten lenken.

► Beteiligungsverfahren Phase 1: **Wissensstand und Interessenslagen**

Themenspezifische Arbeitsgruppen könnten von der Steuerungsgruppe installiert werden. Stakeholder diskutieren, bewerten und kommentieren in diesen Gruppen die fachlichen Aspekte und Maßnahmen des Gutachtens. Gruppenwissen wird generiert und Interessenslagen werden auf Gemeinsamkeiten und Konflikte hin geprüft. Die Gruppenberichte gehen dem Auftraggeber zu.

Der Auftraggeber evaluiert, in einem transparenten Prozess unter Beisitz der Steuerungsgruppe, die Ergebnisse der Arbeitsgruppensitzungen.

► Beteiligungsverfahren Phase 2: **Abstimmung und methodische Anpassung**

Die Evaluationsergebnisse könnten als Feedback in eine zweite Sitzungsrunde der Arbeitsgruppen gehen, in der nachgesteuert werden könnte. Für BürgerInnen bestünde parallel nun auch die Möglichkeit, online zu kommentieren. Die BürgerInnenbeteiligung schüfe ein Stimmungsbild und ergänzte resp. erweiterte die Vorarbeiten der Fachebene.

Nachsteuerungen und Online-Beteiligungen könnten evaluiert und im Bedarfsfall in den Arbeitsstand aufgenommen werden. Ein belastbarer Projektstand wäre damit hergestellt.

► Beteiligungsverfahren Phase 3: **Dissemination und Implementierung**

Es könnten interne Abstimmungen im Ministerium und ein Beschluss erfolgen. Das Projekt könnte an die Öffentlichkeit gehen. Die Zielgruppen für das Vorhaben würden mit passenden Veranstaltungen informiert.

Wissenschaftliche Publikation

Forschung, die mit öffentlichen Mitteln gefördert wurde, sollte der Öffentlichkeit ihre Ergebnisse verfügbar machen.

8.1.2 Informationen für die breite Öffentlichkeit

Ausgehende Kommunikation

Klassische Pressemitteilungen könnten helfen, die Inhalte und Ergebnisse des Grundsatzgutachtens einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Weiterhin könnten folgende Kommunikationskanäle bedient werden: Webseiten und Bloggingdienste des HMWEVW, Social-Media Auftritte des HMWEVW, Internetauftritte und Periodika hessischer Gebietskörperschaften und Medienauftritte der potentiellen Biosphärenregion Rheingau-Taunus.

Direkten Kontakt des Projekts mit den BürgerInnen könnte eine *Wanderausstellung* herstellen, die in Form von informativen Tafeln und einem *Ausstellungs-Highlight* (wie z. B. einem 3D-Landschaftsausschnitt vorher / nachher oder einer begehbaren Themen-3D-Cave, d. h. eines Raumes zur Projektion virtueller Realität) informierte und den Diskussionsprozess anregte. Begleitet werden könnte die Ausstellung durch einen publikumsgerechten Fachvortrag und jeweils eine Gesprächsrunde unter Beteiligung der lokalen Stakeholder. Dieses Format könnte zunächst bevorzugt dort

eingesetzt werden, wo Pilotprojekte vorgesehen sind oder mit dem geplanten Biosphärengebiet eine vorbildgebende Entwicklung angestoßen werden soll.

Weitergehend könnte auch ein (Kurz-)film über die Thematik und Ziele breiter informieren. Darin könnten sowohl die wesentlichen Zusammenhänge prägnant dargestellt werden als auch verschiedene Experten zu Wort kommen.

Eingehende Kommunikation

Die Anpassung an den Klimawandel ist ein komplexes Wissens- und Handlungsfeld, das bei der fachfremden Öffentlichkeit Fragen wecken muss. Das HMWEVW nimmt die Interessen und Bedenken der BürgerInnen ernst und könnte FAQ-Antworten (auch in Form von Experteninterviews) sowie detaillierte Inhalte auf seinen Servern bereithalten. Es könnte, über ein Kontaktformular oder auch telefonisch, für Interessierte die Möglichkeit geben, mit Experten des HMWEVW in Kontakt zu treten. Es werden Wege gesucht, Themen des Klimaschutzes und der Anpassung an den Klimawandel in Bildungsangebote zu integrieren.

8.2 Interne Teilöffentlichkeit

Über hausinterne Medien könnten die Mitarbeiter des HMWEVW, des HMUKLV und der nachgeordneten Behörden über die Existenz und die groben Ziele der Grundsatzstudie informiert werden. Parallel könnte das Thema im Top-Down-Prinzip hausintern kommuniziert werden.

9 Wissensdefizite und zukünftige Forschungsaufgaben

Die Suche nach Antworten auf Forschungsfragen ist unweigerlich mit dem Entstehen einer Vielzahl neuer, anknüpfender Fragen verbunden. Im Folgenden wird eine Auswahl an Forschungsfragen präsentiert, die sich während der Arbeiten an der vorliegenden Studie ergaben. Sie setzen, zusammen mit den Erkenntnissen und Wissensdefiziten der bisherigen Forschung, den Rahmen für eine zukünftige Fortführung der für diese Studie begonnenen Forschungstätigkeit.

Verbesserung der räumlichen, thematischen und zeitlichen Auflösung der Thermaldaten

Die verwendeten Landsat-8-Thermaldaten haben neben ihren Stärken – das wären zum Beispiel die räumliche Abdeckung und Kostenneutralität – auch Limitationen, die sich aus Zwängen des Träger- und Sensorsystems ergeben.

Nicht optimal für die Erfassung von Evapotranspirations-Prozessen ist der unveränderliche Zeitpunkt des Überflugs, nämlich ~10 Uhr am Vormittag, von Landsat 8 über das Zielgebiet Hessen. Pflanzliche Transpiration, als Reaktion auf den täglichen solaren Energiepuls, ist zu dieser Zeit zwar messbar – das zeigen die Daten dieser Studie. Eine bessere Differenzierbarkeit von Verdunstungsprozessen zwischen Pflanzengruppen, Landnutzungsarten und auch Versiegelungsgraden ergäbe sich aber durch nutzbare Daten der späten Mittags- resp. frühen Nachmittagszeit. Es ist nicht möglich, den Satelliten zu den gewünschten Zeiten über Hessen zu bringen. Möglich wäre es hingegen, an Tagen des Satellitenüberflugs, vom Boden aus, kleinräumige Thermaldaten mithilfe von UAVs¹ zu erzeugen. Der Einsatz eines UAV am Tag der Landsat-Passage böte folgende Möglichkeiten einer Verbesserung der Datenlage:

- Verbesserte zeitliche Auflösung. Stündliche Wiederholungsmessungen über gleichbleibenden Flächen könnten, als Ergänzung zu den Satellitendaten, zur Erfassung von Tagesgängen von T_{Land} befähigen.
- UAV-generierte Daten, zeitgleich mit Landsat-Daten aufgenommen, könnten der Validierung absoluter Temperaturwerte aus den Landsat-Daten dienen.
- Durch den Einsatz von UAV über bestimmten Landnutzungen ließe sich die räumliche, und auch die thematische, Auflösung (liegt für Landsat 8 bei 30 Metern) enorm steigern. Hierdurch würde eine qualitative Steigerung der Vorhersage von Suchregionen möglich.

Gezielte Analyse einzelner Landnutzungsgruppen

Analytische Unschärfen entstehen durch die gleichzeitige Betrachtung von urbanen und ruralen Räumen, die sich in ihrer Ausstattung bezüglich Oberflächenversiegelung, -rauigkeit, Polygon-

¹Unpiloted Aerial Vehicle = Drohne

größe und Vegetation erheblich unterscheiden. Bei der Betrachtung von Thermaldaten auf der Ebene ganzer Regionen werden demnach wahrscheinlich immer dieselben Landnutzungen bestimmte Ränge der Thermalklassifizierung belegen, so z. B. werden hohe Temperaturklassen immer von Siedlungsgebieten maskiert werden. Um dieses Problem zu handhaben, müssten einzelne Landnutzungen dezidiert analysiert werden, z. B. unter besonderer Berücksichtigung des Versiegelungsgrades oder aber auch der Größe der einzelnen Flächen. Zum Beispiel sollte mit Hilfe einer Literaturrecherche geklärt werden, ob und wie die Flächengröße einer Landnutzung einen Einfluss auf ihre thermische Signatur hat, d. h. ob zum Beispiel große Waldflächen in Richtung ihres Zentrums kühler werden oder ausgedehnte Ackerflächen in der Mitte signifikant wärmer sind als an ihren Rändern.

Zwar über Landnutzungsgrenzen hinaus, dafür aber mit stärkerer regionaler und auch thematischer Fokussierung, würde eine gezielte Studie der potentiellen Biosphärenregion Rheingau-Taunus sich ebenfalls in die Liste von Zukunftsvorhaben einreihen.

Dezidierte Analyse von Gewässerrandstreifen

Die Daten dieser Studie deuten darauf hin, dass insbesondere Randstreifen und Uferbiotope stehender Gewässer einen Kühlungseffekt auf ihre Umgebung ausüben (Kap. 2.2, 3.3.2). Für die zukünftige Klimaanpassung von Ballungsräumen ist dies sicherlich relevant. Blattwerk geeigneter Ufervegetation erhöht die aktiv verdunstende Fläche. Die Pflanzen reinigen darüber hinaus stofflich belastete Wasser ufernaher Infiltrationszonen und leisten einen bedeutenden Beitrag zur Verbesserung von Grund- und Trinkwasserqualität. Für die Kommunen der Zukunft sollte ein entsprechendes Management von Uferbereichen deshalb (noch) stärker in den planerischen Fokus rücken. Die mit dieser Studie gelegte Datengrundlage und methodische Vorgehensweise können dabei entscheidende Impulse geben.

Bessere Integration von Bodendaten

Unbedingt sollte weiterführende Forschung auf eine bessere Integration diesbezüglicher Bodendaten setzen. Wie in Abschnitt 3.2.3 angesprochen, leisten die getesteten Bodendaten des BGR zur nutzbaren Feldkapazität einen überraschend geringen Beitrag zur Erklärung der Ausprägung von T_{Land} . Auch die Verwendung der nFK aus der BK50 konnte diesen Mangel nicht beheben. Die Kopplung der nFK-Daten mit weiteren Daten zur Abschätzung der Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung von T_{Land} könnte ein Weg sein, die Bodendaten sinnvoll zu integrieren.

Vorhersage von Suchregionen und Maßnahmeneffekten

Die Nutzungsmöglichkeiten der für diese Studie geschaffenen Datengrundlage – das sind u.a. 1.55 Mio. Polygone als Repräsentanten der Erscheinungen der Landoberfläche Hessens; jedes davon Träger mehrerer Dutzend umweltbezogener Merkmale – sind vielfältig. Vielversprechende konsequente Analyseschritte, in der genannten Reihenfolge an die hier vorliegenden Forschungsergebnisse anknüpfend, wären

1. eine systematische *Analyse der jeweiligen Antwortverteilung* von *THERMAL* auf seine einzelnen Prädiktoren mittels geeigneter Regressionsverfahren,

2. die Schaffung einer Routine zur *Vorhersage von Suchregionen* und
3. die *quantitative Vorhersage von Maßnahmeneffekten* für die Suchregionen.

Zu 1) Dieser Punkt zielt auf die systematische Datenanalyse mittels Methoden der Quantilregression. Es handelt sich hierbei um ein Median-Regressionsverfahren, bei dem beliebig viele Regressionsmodelle durch eine Antwortverteilung gelegt werden können (CADE & NOON, 2003; KOENKER, 2005). Quantilregression erlaubt somit – im Gegensatz zur gängigen Ordinary-Least-Squares-Regression (DRAPER & SMITH, 1998) – einen vollen Einblick in die gesamte Antwortverteilung einer Variable, incl. der Analyse von Extremwerten. Modifikationen von Systemen durch Veränderungen einflussnehmender Merkmale lassen sich so aufdecken.

Zu 2) Eine modellbasierte Vorhersage von Suchregionen würde auf den Ergebnissen einer vorausgehenden Regressionsanalyse aufbauen. Vorhersagen eines robusten Modells könnten dann benutzt werden, um die Qualität der GIS-getriebenen Suchraum-Suche zu verbessern, um Suchregionen unter (zukünftig) veränderten Klimabedingungen zu identifizieren oder um die Methodik auf andere Regionen wenden.

Zu 3) Welche Maßnahmen führen wo zu welchen Ergebnissen? Die quantitative Vorhersage konkreter Maßnahmeneffekte wäre ein bedeutender Schritt in Richtung einer anwendungsbezogenen Nutzbarkeit der vorliegenden Forschung. Die Liste potentiell nutznießender Akteure ist lang und reicht von höchsten politischen und gesetzgebenden Ebenen bis hin zur Planern und Handelnden auf kommunalem Level.

Erfolgsmonitoring und Change Detection

Die vorgeschlagenen Maßnahmentypen operieren auf durchaus unterschiedlichen Zeitskalen der Umsetzung und Etablierung ihrer Wirksamkeit. So sollte zum Beispiel – zunächst ohne Berücksichtigung des Betrags der Effekte – die Begrünung eines großen Fabrikhallendaches schneller eine messbare Veränderung liefern als die Aufforstung einer unversiegelten Brache inmitten von Wald. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Dauer bis zum Einsetzen quantifizierbarer Effekte, müssen die im Rahmen dieser Studie identifizierten Maßnahmentypen auf ihre tatsächliche Wirkung hin untersucht werden.

Die in Kapitel 7 benannten Pilotprojekte wären die idealen Test-Setups zur Kontrolle des Maßnahmenerfolgs und zur Quantifizierung von Veränderungen der Zielvariable T_{Land} . Ein weiteres Ziel, neben der Validierung der mit dieser Studie vorgelegten Forschung, wäre die Ableitung empirischer funktionaler Zusammenhänge, die dann zur Nachsteuerung und zur Abschätzung von Maßnahmeneffekten an anderen Standorten verwendet werden könnten.

Flankierend hierzu wäre die hydrologische Modellierung repräsentativer Testgebiete ein wissenschaftliches Unterfangen, das weiterführende Forschungsbemühungen zur Anpassung an den Klimawandel auf einen breiteren methodischen Sockel stellen würde.

Anreiz- und Planungssysteme für die Umsetzung geeigneter Maßnahmen

Damit die in der vorliegenden Studie skizzierten Maßnahmentypen auch hessenweit in einer angepassten Form umgesetzt werden, bedarf es noch weitergehender Arbeiten. Dies betrifft zum einen zielgerichtete, richtungssichere Anreize für die Akteure, damit die Umsetzung möglichst von diesen selbst mit einem Eigeninteresse vorangetrieben wird. Denkbar ist die Honorierung der Landnutzung auf der Grundlage etwa der Entwicklung der Oberflächentemperaturen bzw. der Stoffausträge aus den Wassereinzugsgebieten (Landnutzer als Wasserwirte). Dabei könnten die Mittel auch gezielt in ausgewählte Suchräume, in denen eine besonders hohe Effizienz zu erwarten ist, geleitet werden. Diese Honorierung müsste in die bestehenden Anreizsysteme, wie z. B. das Greening der Agrarförderung, integriert werden bzw. diese mittel- bis langfristig ablösen. Dabei ist zu berücksichtigen, wie andere Landnutzungsformen außerhalb der Agrarförderung mit eingebunden werden, insbesondere die häufig besonders überwärmten urbanen Räume.

Zum anderen ist zu klären, ob es unterstützend für die Landnutzer (Anregungen und Umsetzungsalternativen für die Landnutzer) oder als verbindliche Rahmensetzung einer landesweiten, detaillierten Planung bedarf, die wie bei der Umsetzung der WRRL oder des Netzes Natura 2000 für jedes Wassereinzugsgebiet die erfolgsversprechendsten Maßnahmen ableitet und in einem mittelfristigen Monitoring und Berichtssystem begleitet, bis schließlich ein „guter Zustand“ landesweit erreicht ist. Damit wäre Hessen Vorreiter für einen wichtigen ergänzenden Beitrag zur Klimapolitik, der das Handeln auch auf EU-Ebene beeinflussen und anstoßen sollte.

10 Anhang: Methoden

10.1 Aggregation der Thermalszenen

Zur Erstellung eines hessenweiten Thermal-Mosaiks der Temperatur der Landoberfläche (T_{Land}) wurden frei verfügbare Fernerkundungsdaten der Landsat-8-Mission (earthexplorer.usgs.gov) verwendet. Das Landsat-8-System hat einen Überflug-Wiederholzyklus von 16 Tagen; Landsat-8-Daten der Bänder 1 bis 9 liegen in 30-m Auflösung (resp. 15 m bei panchrom. Band 8) vor, während die Daten der Thermalbänder 10 und 11 mit 100 m aufgelöst sind, vom Anbieter aber auf ebenfalls 30 m resampled werden.

Die Identifizierung und Beschaffung geeigneter Satellitenszenen erfolgte nach den folgenden Kriterien

- Zeitraum: 2013–2017 (Landsat-8-Daten sind seit 2013 verfügbar)
- Pfad/Reihe: 194–196/24–26 (vgl. Abb. 10.1)
- Aufnahmedatum: Vegetationsphase von Mai (spät) bis Ende September
- max. 10% Wolkenbedeckung
- Collection category: Tier 1
- Data Type Level-1: Level 1 TP
- Sensor Identifier: OLI_TIRS (OLI - Bänder 1–9, TIRS - Bänder 10–11)

Nach diesen Kriterien wurden für das Untersuchungsgebiet (Bundesland Hessen, WGS 84, UTM 32N) 47 Szenen¹ als geeignet identifiziert (vgl. Abb. 10.1). Weitere elf Szenen mit max. 20% Wolken-

¹LC08_L1TP_194024_20140703_20170421_01_T1, _194024_20140719_20170421_, _194024_20150823_20170405_,
_194024_20160505_20170325_, _194024_20160606_20170324_, _194024_20160825_20170322_,
_194024_20160910_20170321_, _194025_20130801_20170503_, _194025_20140719_20170421_,
_194025_20150604_20170408_, _194025_20150823_20170405_, _194025_20160505_20170325_,
_194025_20160825_20170322_, _194026_20130716_20170503_, _194026_20130801_20170503_,
_194026_20140719_20170421_, _194026_20150604_20170408_, _194026_20150807_20170406_,
_194026_20160606_20170324_, _194026_20160825_20170322_, _194026_20160910_20170321_,
_195024_20130707_20170503_, _195024_20130723_20170503_, _195024_20151001_20170403_,
_195024_20151102_20170402_, _195025_20130707_20170503_, _195025_20140608_20170422_,
_195025_20150830_20170405_, _195025_20151001_20170403_, _195025_20160816_20170322_,
_195026_20140608_20170422_, _195026_20150830_20170405_, _195026_20151001_20170403_,
_195026_20160816_20170322_, _196024_20150704_20170407_, _196024_20150805_20170406_,
_196024_20150821_20170406_, _196024_20160908_20170321_, _196024_20160924_20170320_,
_196025_20130714_20170503_, _196025_20150704_20170407_, _196025_20150805_20170406_,
_196025_20150821_20170406_, _196025_20160807_20170322_, _196025_20160823_20170322_,
_196025_20160908_20170321_, _196025_20160924_20170320_.

bedeckung wurden zur Schließung von Datenlücken resp. Datenverdichtung nachgeladen.

Nach einer visuellen Qualitätsprüfung erfolgte eine rechnerische Bildkorrektur, notwendig zur Entfernung von Wolken und Wolkenschatten, mithilfe einer Maske, erstellt mit dem zum jeweiligen Szenen-Bundle gehörigen BQA-Qualitätsband und dem vom USGS (U.S. Geological Survey) bereitgestellten Landsat-QA-Tools (landsat.usgs.gov/landsat-qa-tools). Die Ableitung von Wolken, Cirren und Wolkenschatten erfolgte nach den folgenden Vorgaben:

-- cloud_shadow = med -- cirrus = med -- cloud_confidence = med -- combine.

Anschließend wurde die somit erstellte Rohmaske in GRASS GIS (`r.neighbors`) in zwei Schritten gefiltert

1. *Medianfilter* (3x3): Entfernen von einzelnen, nicht klassifizierten Zellen und Deklassifizierung (d. h. »nicht Wolke«) von linienhaften Elementen auf der Erdoberfläche (z. B. Bahnschienen); Kondensstreifen wurden hierbei nicht deklassifiziert, da sie für das gewählte Berechnungsfenster zu breit sind.
2. *Meanfilter* (5x5): Füllen kleiner Lücken innerhalb maskierter Bereiche und Erweiterung maskierter Bereiche um einen Zwei-Zellen-Saum zur Entfernung von Randzellen mit hoher wahrscheinlicher Zugehörigkeit zur Klasse Wolke/-schatten.

Die Thermalbänder (10 und 11) wurden dann (i) mit der erstellten Wolkenmaske ausmaskiert und (ii) deren Zellwerte gemittelt. Das Produkt aus diesem Schritt wurde nach Perzentilen in 20 Klassen unterteilt (GRASS GIS, `r.quantile`) und jeder Zelle die entsprechende Klasse zugeordnet (GRASS GIS, `r.recode`). Die oberen und unteren Enden der Verteilung wurden hierbei gestreckt (Tabelle 10.1, um Extremwerte, d. h. gut gekühlte resp. stark überwärmte Landschaftsbereiche, besser identifizieren zu können.

Tabelle 10.1: Klassen (K) und Perzentile (P) zur verteilungsbasierten Klassifizierung der Landsat-8-Thermaldaten.

K	1	2	3	4	5	6	7	8	...	13	14	15	16	17	18	19	20
P	0,1	0,5	1	5	10	20	25	30	+10	70	75	80	90	95	99	99,5	99,9

In einem letzten Schritt wurde (GRASS GIS, `r.series, method = median`) durch das »Übereinanderlegen« der pixelbereinigten und perzentil-klassifizierten Rasterbilder ein lückenloses Raster-Komposit für Hessen erzeugt, das über die Vegetationsmonate der Jahre 2013–2017 integriert und das als Zellwerte den Medianwert aus mindestens drei, in der Regel aber mehr Input-Zellen zeigt (Abb. 10.1).

Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, wurde, um Höheneffekten auf die Verteilung von T_{Land} entgegenzuwirken, das Untersuchungsgebiet für alle analytischen Betrachtungen in 50-m-Höhenintervalle unterteilt. Für diese Höhenintervalle wurden, jeweils nach der in Abschnitt 10.1 beschriebenen Verfahrensweise, Verteilungen von T_{Land} abgeleitet, *nachdem* alle Satellitenbilder zuvor auf den entsprechenden Wertebereich resp. dessen Ausdehnung beschnitten wurden.

Tabelle 10.2: Temperatur der Landoberfläche (T_{Land}) – Potentielle Prädiktoren, Rasterdaten.

Parameter	Kürzel	Einheit	Ausprägung	Res. (m)	Zeitraum	Quelle
Temp. Landoberfläche	THERMAL	P_i	Median-Komposit JJAS	30	2013–2017	Landsat 8, USGS
Topographie & Relief						
Höhe (ü. NN)	DGM25	m	–	25	–	DGM25, HVBG
Hangneigung	SLP	$m\ km^{-1}$	–	25	–	DGM25, HVBG
Krümmung	CURV	–	–	25	–	DGM25, HVBG
Perspektive	ASPECT	deg.	–	25	–	DGM25, HVBG
Klima & Hydrologie						
Temp. Luft	TMEAN8110	°C	Ø Monatsmittel JJAS	1000	1981–2010	DWD CDC
Temp. Luft	TMAX8110	°C	Ø Monatsmittel JJAS	1000	1981–2010	DWD CDC
Temp. Luft	TMIN8110	°C	Ø Monatsmittel JJAS	1000	1981–2010	DWD CDC
Dürre-Index	DROUGHT8110	σ	Ø Monatsmittel JJAS	1000	1981–2010	DWD CDC
Sonnenscheindauer	SUN8110	h	∑ Monatsmittel JJAS	1000	1981–2010	DWD CDC
Niederschlag	PRECIP8110	mm	∑ Monatsmittel JJAS	1000	1981–2010	DWD CDC
Reale Verdunstung	EVAPOR9110	mm	∑ Monatsmittel JJAS	1000	1991–2010	DWD CDC
Bodenfeuchte	SOIL_9110	%nFK	Ø Monatsmittel JJAS	1000	1991–2010	DWD CDC
Feuchte-Wahrsch.-Index	WWPI2015	0–100%	Status	20	2015	CORINE Hi-Res.
Grundwasserneubildung	BGR_GWNeu	$mm\ a^{-1}$	Jahres-Ø	1000	1961–1990	GWN1k, BGR
Nutzbare Feldkapazität	BGR_NFK	mm	ist	250	hybrid	NFKWe1k_250, BGR
Sickerwasserrate	BGR_SickW	$mm\ a^{-1}$	Jahres-Ø	250	pre 2003	SWR1k_250, BGR
Wasserverfügbarkeit	BGR_WaVerf		Sommer-Ø (AMJJAS)	250	1991–2010	WVPFL1k_250, BGR
Landbedeckung & Vegetation						
Vegetationsindex	NDVImed	n. a., -1–1	Median-Komposit JJAS	30	2013–2017	Landsat 8, USGS
Versiegelungsgrad	IMD2015	0–100%	Status	20	2015	CORINE Hi-Res.
Kronendichte	TCD2015	0–100%	Status	20	2015	CORINE Hi-Res.
Grasland-Wahrsch.-Index	GRAVPI2015	0–100%	Status	20	2015	CORINE Hi-Res.

Tabelle 10.3: Temperatur der Landoberfläche (T_{Land}) – Potentielle Prädiktoren, Vektordaten.

Parameter	Kürzel	S-Niveau	n Beobachtg.	n Var.	Stand	Quelle
DLM Objektart	OBJEKTART	nominal	~ 762000	25		ATKIS Basis-DLM, HVBG
DLM Funktionstyp	FKT_FUNKTI	nominal	~ 762000	80		ATKIS Basis-DLM, HVBG
DLM Vegetationstyp	VEG_VEGETA	nominal	~ 553000	17		ATKIS Basis-DLM, HVBG
Standort Stufe	SOIL_STUFE	ordinal	~ 91000		01/2003	Standorttyp. Biotop., HLNUG
Standort nFK-Stufe	SOIL_NFK	ordinal	~ 60000	6	01/2003	Standorttyp. Biotop., HLNUG
Standort Nässestufe	SOIL_WASPEICHER	ordinal	~ 78000	9	01/2003	Standorttyp. Biotop., HLNUG
Standort Wasserhaushalt	SOIL_WAHAUSHALT	ordinal	~ 78000	7	01/2003	Standorttyp. Biotop., HLNUG
Verschneidung	diverse	diverse	~ 1550000	98		

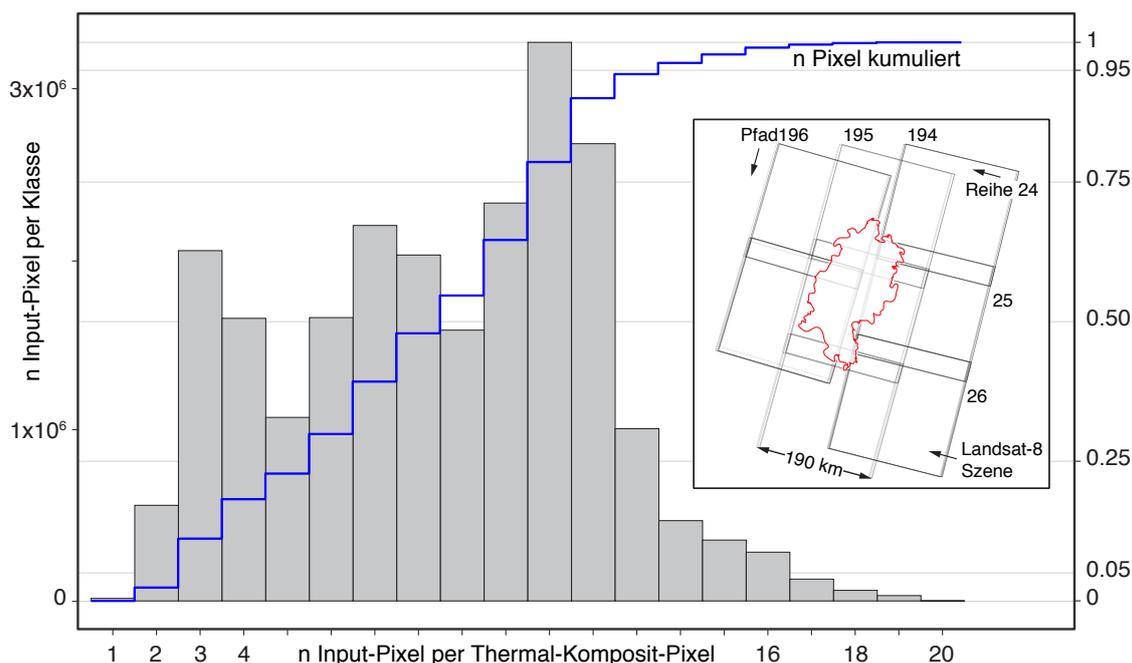


Abbildung 10.1: Landsat 8 Thermal-Komposit Hessen. Das Histogramm zeigt Klassen (x) aus Input-Pixeln per Thermal-Komposit-Pixel, d. h. Klasse 4 = vier Input-Pixel, und abs. Input-Pixel (y li). Die Summenkurve (y re) zeigt empirische kumulative Verteilung aller Input-Pixel; >97.5% aller Komposit-Pixel wurden aus mindestens 3 Input-Pixeln generiert. Einliegekarte: Fußabdrücke der verwendeten Landsat-8-Szenen mit Pfad- und Reihenummerierung und Landesgrenze Hessen in der Mitte.

10.2 Datenaggregation und -analyse

Die Ausprägung von T_{Land} ist, in unterschiedlichem Maße, von Umweltfaktoren wie Lufttemperatur, Niederschlag oder Sonneneinstrahlung abhängig. Weitere einflussnehmende Faktoren sind die Morphologie, aber auch die Textur, Albedo oder die Verdunstungsleistung der Landoberfläche, die oftmals durch die jeweilige *Landnutzung* determiniert werden. Vor diesem Hintergrund, und um Einflüsse auf T_{Land} bestmöglich quantifizieren zu können, wurden im Vektorformat vorliegende ATKIS-DLM-Daten für Gesamt-Hessen als räumlicher Bezug für alle weiteren Analysen gewählt.

In dem, von der HVBG zur Verfügung gestellten, ATKIS-DLM werden die Erscheinungen der Erdoberfläche in Form von Objekten beschrieben. Einzelne Objekte werden innerhalb von ATKIS bestimmten Objektarten zugeordnet und Relationen zu anderen Objekten werden definiert. Diese Studie bedient sich ausschließlich der in ATKIS enthaltenen *Flächen* (d. h. Polygone), Punkte und Linien finden keine Verwendung. Abbildung 10.2 zeigt die hierarchische Struktur der modifizierten, d. h. vor allem inhaltlich generalisierten, ATKIS-Daten, Tabelle 3.2 bietet eine tabellarische Übersicht incl. der im Hauptteil verwendeten Kürzel für die einzelnen Landnutzungs-klassen.

Basierend auf der Vorstellung, dass Verdunstung über Land vornehmlich eine Funktion der Vegetationsbedeckung ist – die wiederum in direkter Abhängigkeit zur Bodenqualität und zum pflanzenverfügbaren Wasser im Boden steht – wurden die ATKIS-DLM-Daten mit Vektordaten zur Standorttypisierung Biotopentwicklung (Tabelle 10.3) verschnitten (GRASS GIS, v.overlay). Für die hierdurch neu gebildeten Polygone sind nun auch Betrachtungen zum Wasserhaushalt,

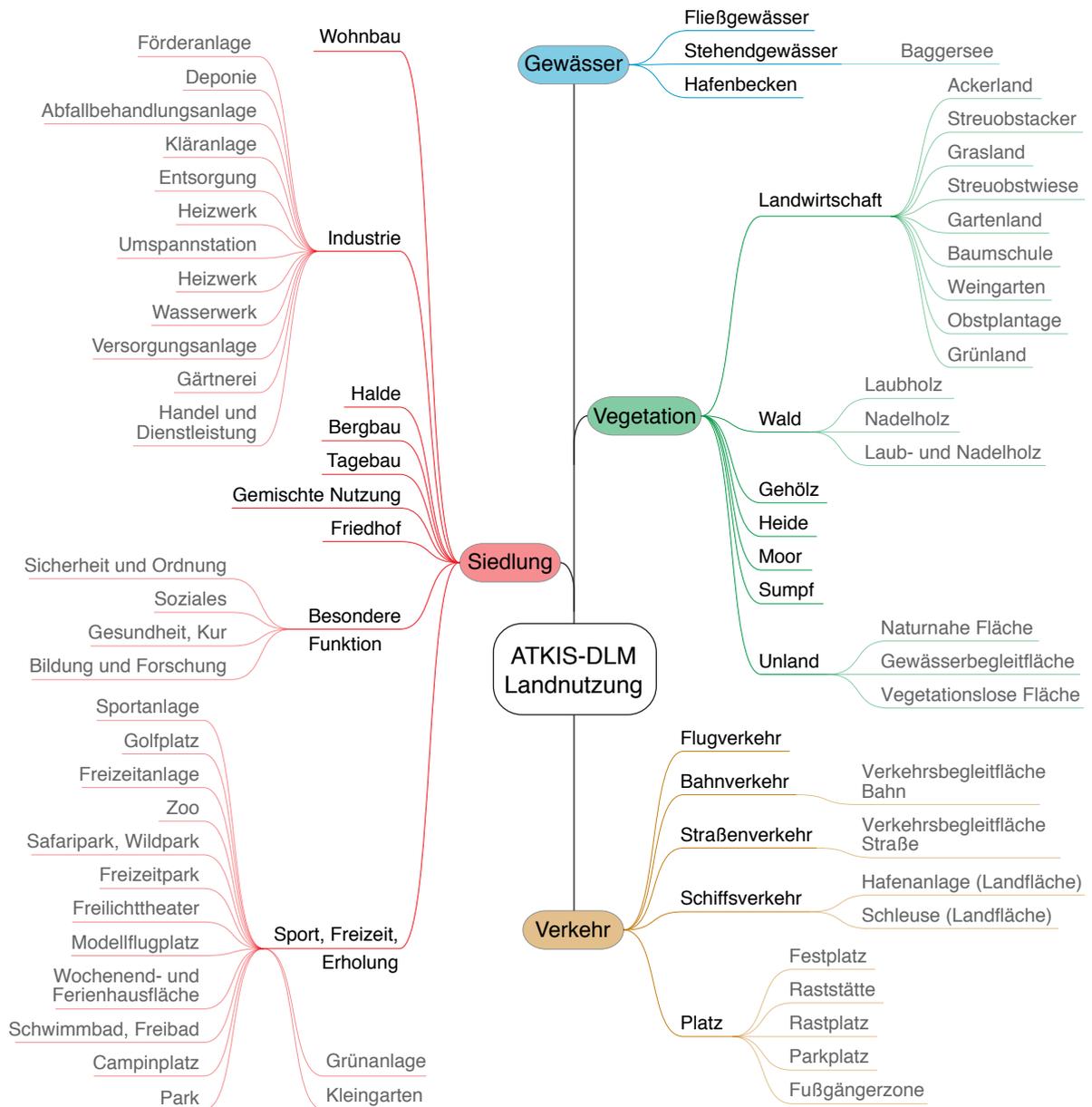


Abbildung 10.2: Visualisierte Datenstruktur der für diese Studie modifizierte ATKIS-DLM-Daten. Die vier übergeordneten Klassen Siedlung, Vegetation, Verkehr und Wasser, gliedern sich in zwei weitere Sub-Klassen. Verwendung finden nur Polygone.

-speicherkapazität und nutzbarer Feldkapazität möglich. Limitationen in der Anwendung der Standorttypisierungsdaten ergeben sich allerdings durch (i) deren räumliche Verfügbarkeit – Standorttypen werden nur für Grünland und Ackerflächen abgeleitet (vgl. Web-Dokumentation HLNUG) – und (ii) das dateninhärente Skalenniveau, das quantitative Analysen nicht ermöglicht.

Für den nun vorliegenden Vektordatensatz mit $n \sim 1.55$ Mio. Polygonen wurden jeweils der Mittelwert, der Median und die Standardabweichung aller als im Rasterformat vorliegenden potentiellen Prädiktoren (Tabelle 10.2) berechnet und in die Attributtabelle ausgelesen (GRASS GIS,

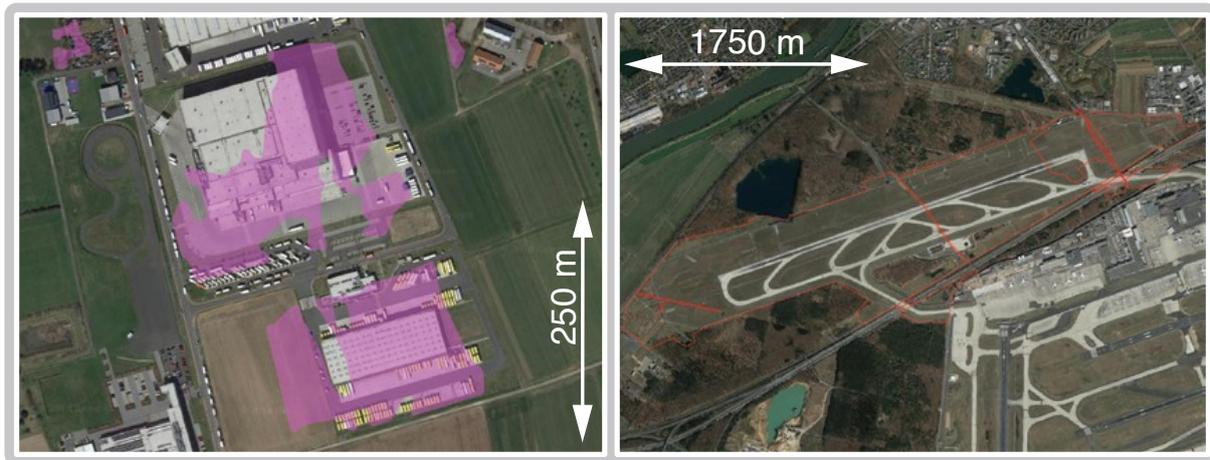


Abbildung 10.3: Qualitätsbeispiele aus dem »Urban Atlas«. Links: Polygone in pink sind fehlklassifizierte »Baum«-Bereiche des Street-Tree-Layers (STL). Rechts: Flughafen Frankfurt, Landebahn Nordwest. Für den rot umrandeten Bereich wurde ein Nutzungswandel (von »Wald« zu »Flughafen«) zwischen 2006 und 2012 abgeleitet, was sich mit der Bauzeit 2006–2011 deckt.

v.rast.stats). Hierfür wurden alle Rasterdaten auf 5 m Auflösung resampled, wodurch sich eine theoretisch adressierbare Mindest-Polygonfläche von 25 m² ergibt. Alle nachfolgenden statistischen Analysen erfolgten in der freien Softwareumgebung R (r-project.org).

Exkurs: Urban Atlas

Der »Urban Atlas« (UA), ein Service von COPERNICUS/European Environment Agency (EEA), beinhaltet europaweite räumliche Informationen zu Landnutzung- resp. Bedeckung in Ballungsgebieten. UA bietet 17 urbane und 10 rurale Klassen mit den Aufnahmezeitpunkten 2006 und 2012. Ein Change-Detection-Produkt, d.h. die Differenz beider Aufnahmezeitpunkte ist verfügbar. Weiterhin sind ein Layer mit Strassenbäumen und – jeweils aber nur für die Hauptstädte – Gebäudehöhen für Stadtkernbereiche verfügbar.

Hypsometrie und Höhenintervalle

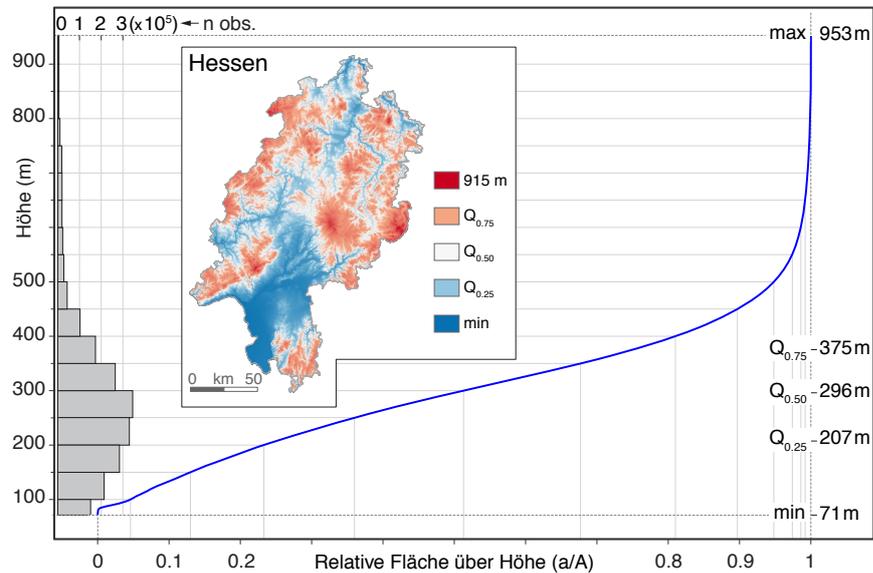


Abbildung 10.4: DGM25 Hessen, Hypsometrische Kurve. 95% aller Höhenwerte liegen unter 500 m, 90% liegen zwischen 100 und 500 m ü. NN. Histogramm (links): Anzahl Beobachtungen pro Höhenintervall.

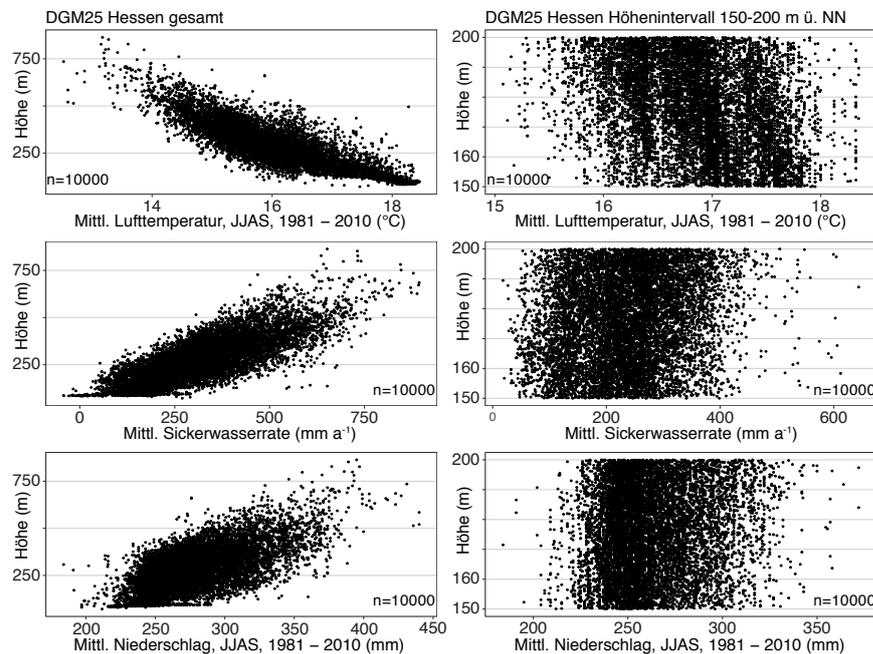


Abbildung 10.5: Auswahl von Prädiktoren (von oben: Lufttemperatur, Sickerwasserrate, Niederschlag) für die Ausprägung von T_{Land} . Links: gesamter Datensatz. Rechts: Höhenintervall 150–200 m. Links: Augenfällig ist die (negative wie positive) Höhenabhängigkeit der Prädiktoren, die vernachlässigbar wird, wenn ein Höhenintervall (rechts, in diesem Fall 50 m) betrachtet wird.

10.2.1 Statistische Analysen

Hauptkomponentenanalyse

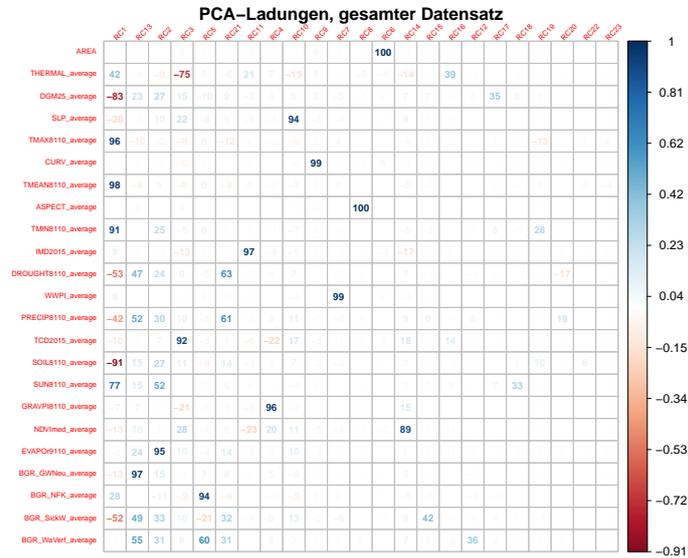


Abbildung 10.6: PCA-Ladungen, gesamter Datensatz.

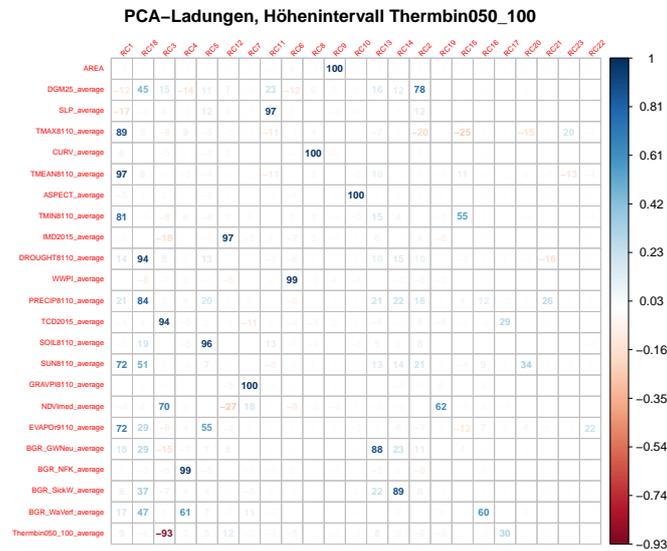


Abbildung 10.7: PCA-Ladungen, Höhenintervall 71–100 m.

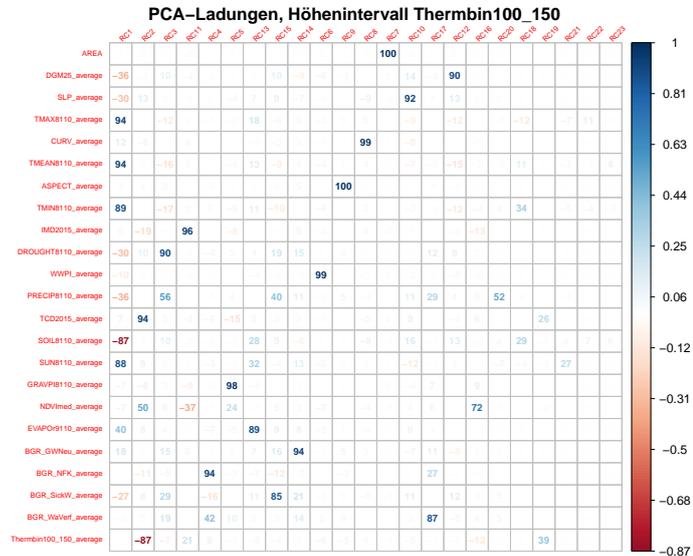


Abbildung 10.8: PCA-Ladungen, Höhenintervall 100–150 m.

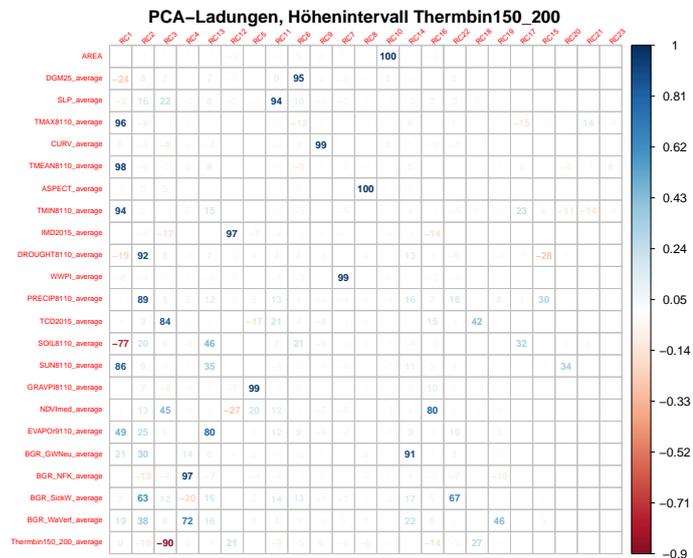


Abbildung 10.9: PCA-Ladungen, Höhenintervall 150–200 m.

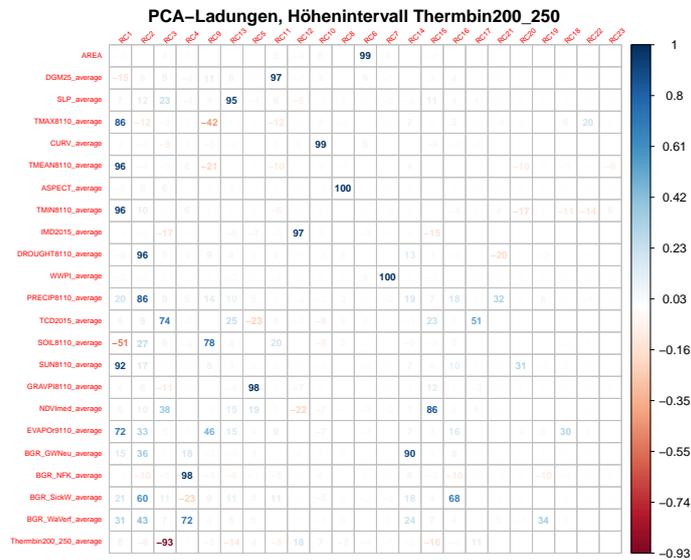


Abbildung 10.10: PCA-Ladungen, Höhenintervall 200–250 m.

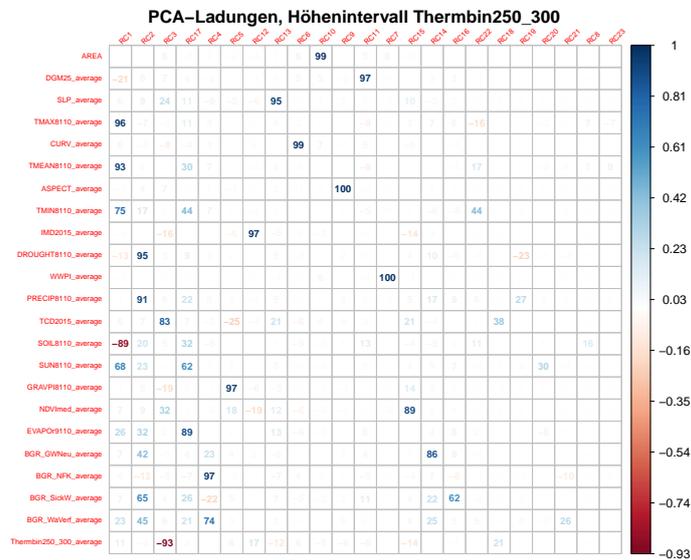


Abbildung 10.11: PCA-Ladungen, Höhenintervall 250–300 m.

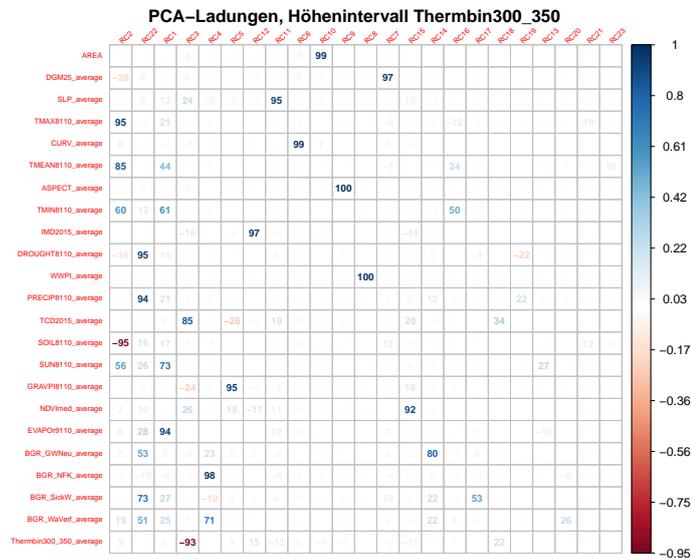


Abbildung 10.12: PCA-Ladungen, Höhenintervall 300–350 m.

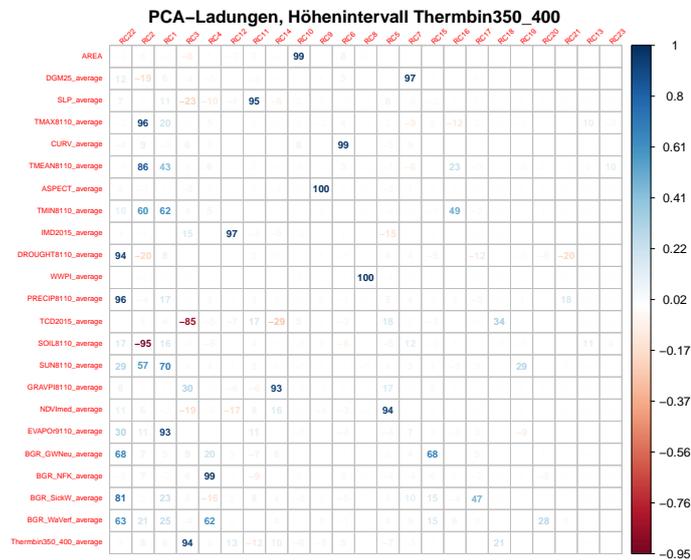


Abbildung 10.13: PCA-Ladungen, Höhenintervall 350–400 m.

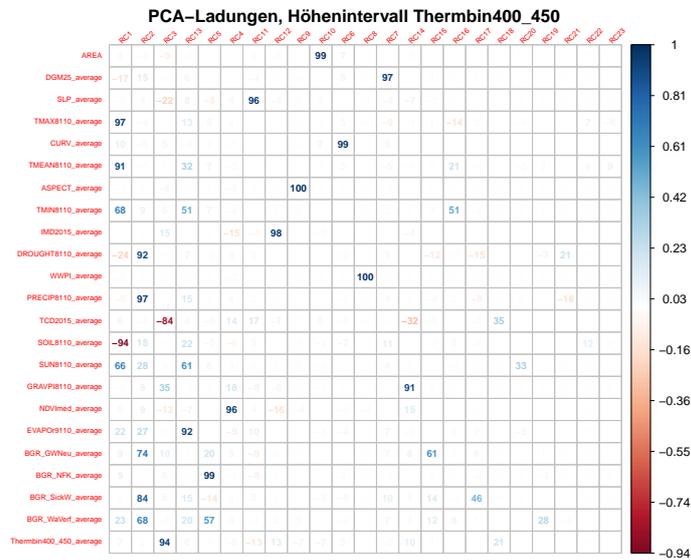


Abbildung 10.14: PCA-Ladungen, Höhenintervall 400–450 m.

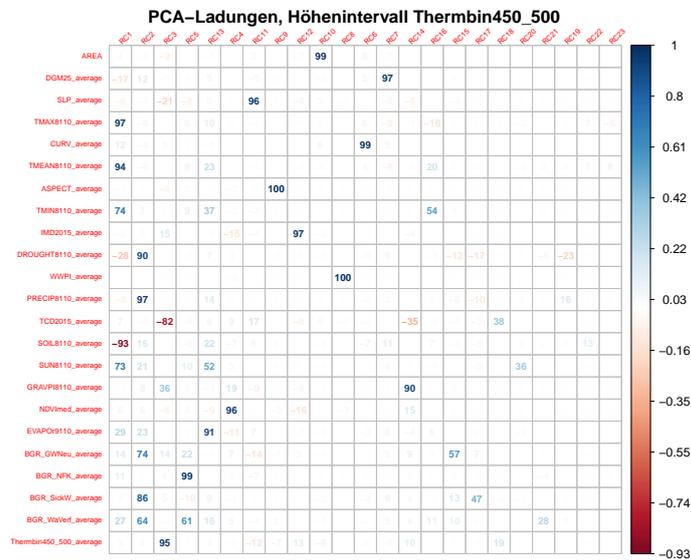


Abbildung 10.15: PCA-Ladungen, Höhenintervall 450–500 m.

Korrelationskoeffizienten

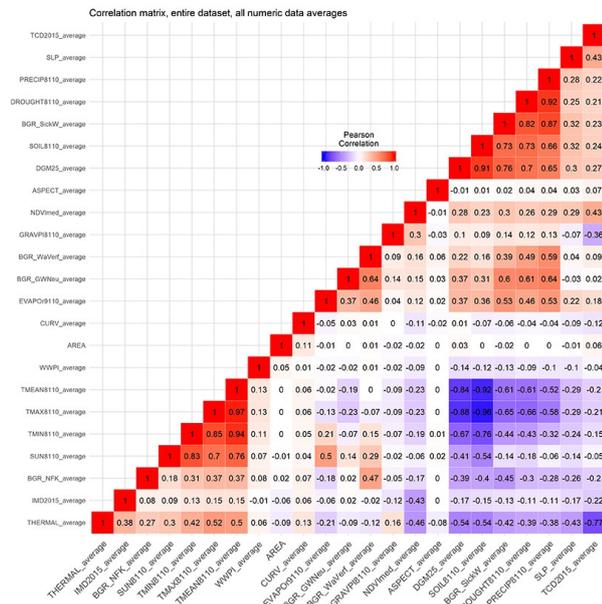


Abbildung 10.16: Korrelationsmatrix, gesamter Datensatz.

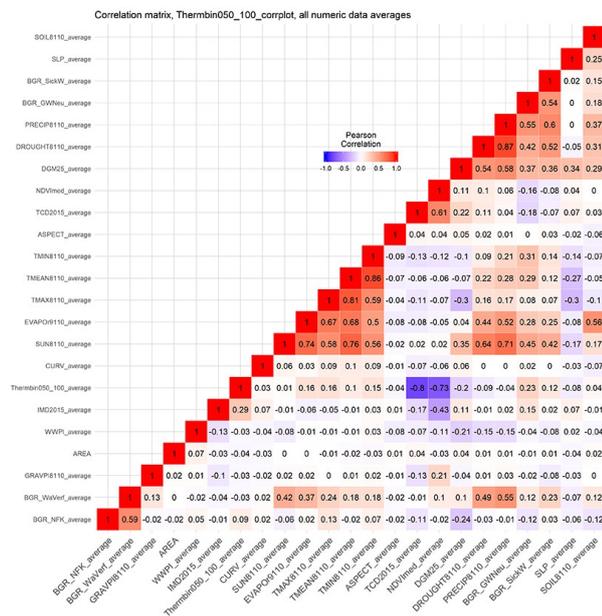


Abbildung 10.17: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 71–100 m.

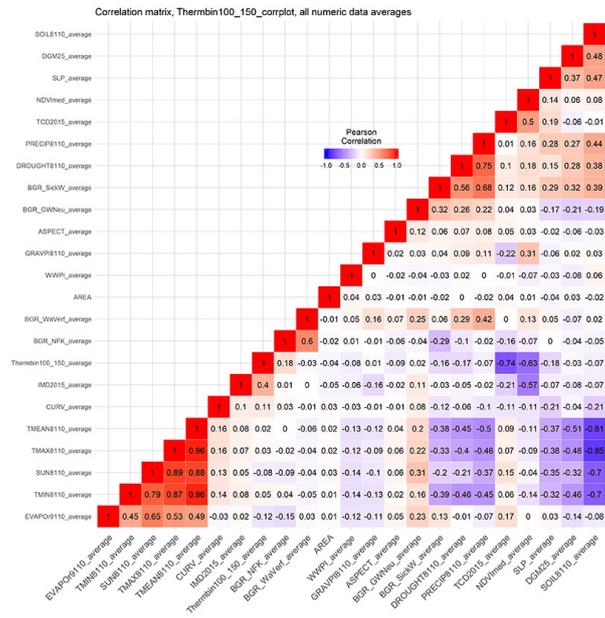


Abbildung 10.18: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 100–150 m.

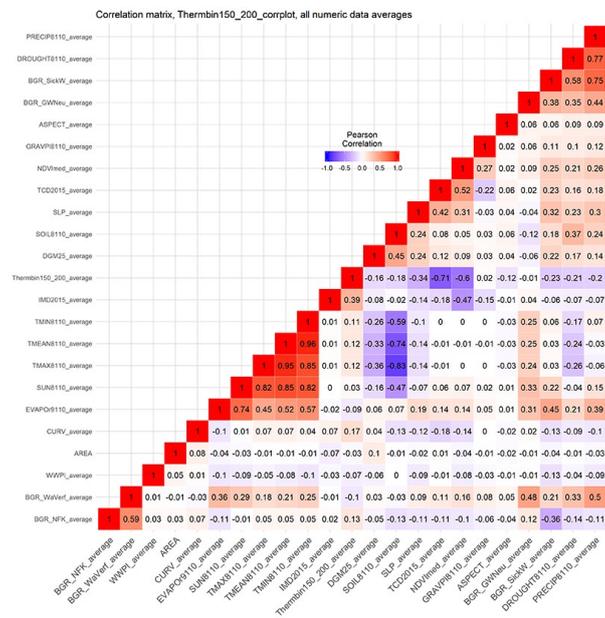


Abbildung 10.19: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 150–200 m.

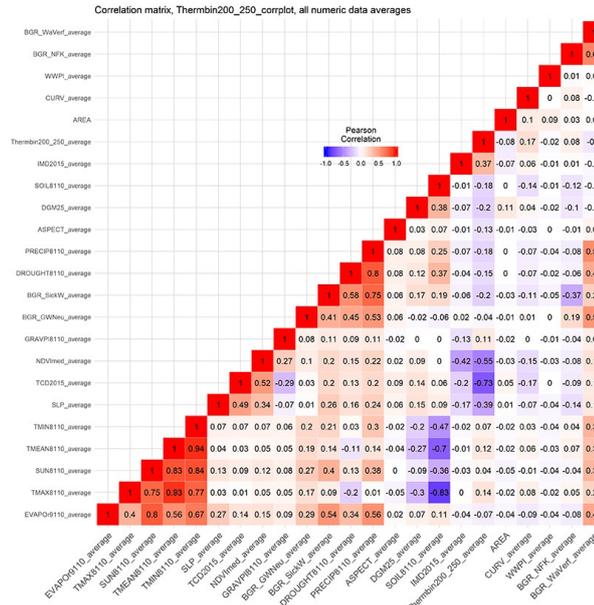


Abbildung 10.20: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 200–250 m.

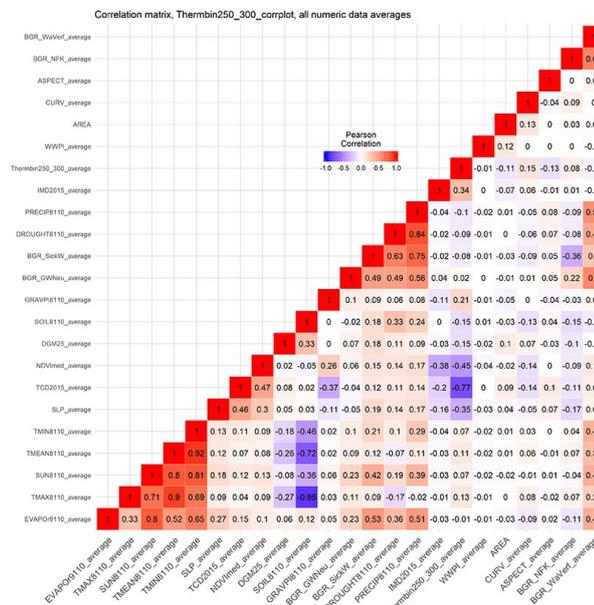


Abbildung 10.21: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 250–300 m.

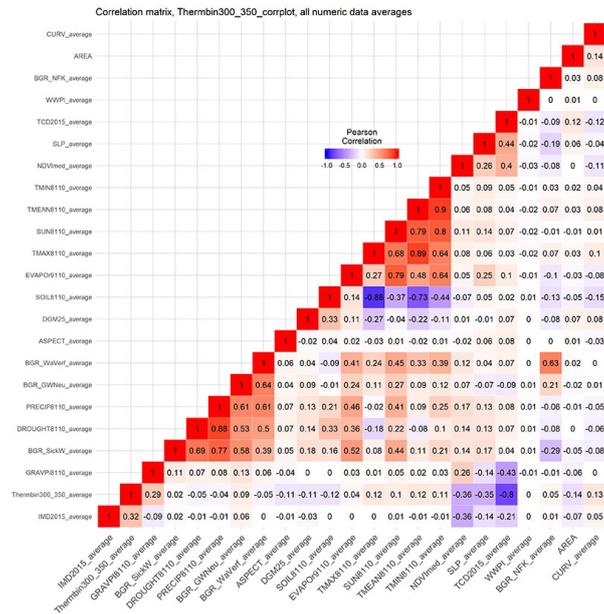


Abbildung 10.22: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 300–350 m.

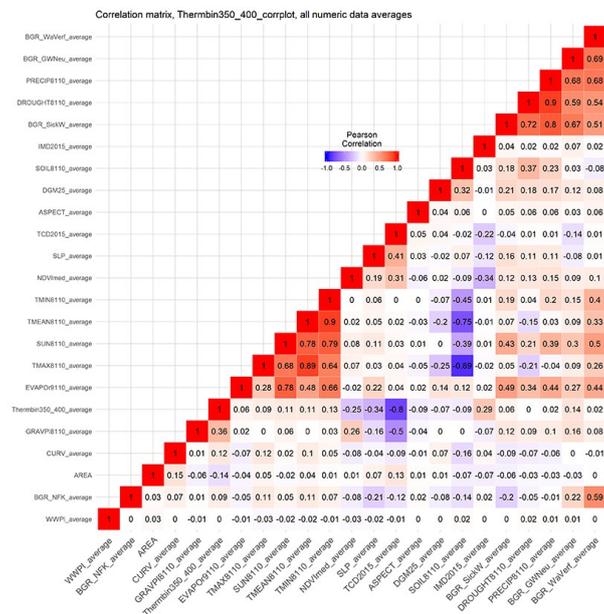


Abbildung 10.23: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 350–400 m.

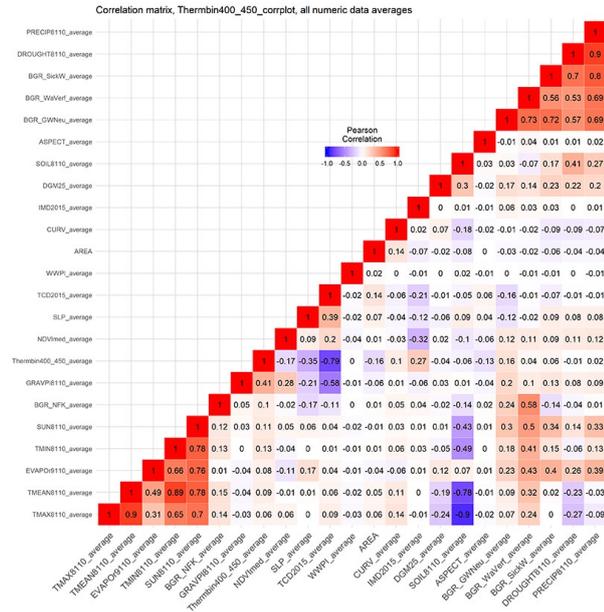


Abbildung 10.24: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 400–450 m.

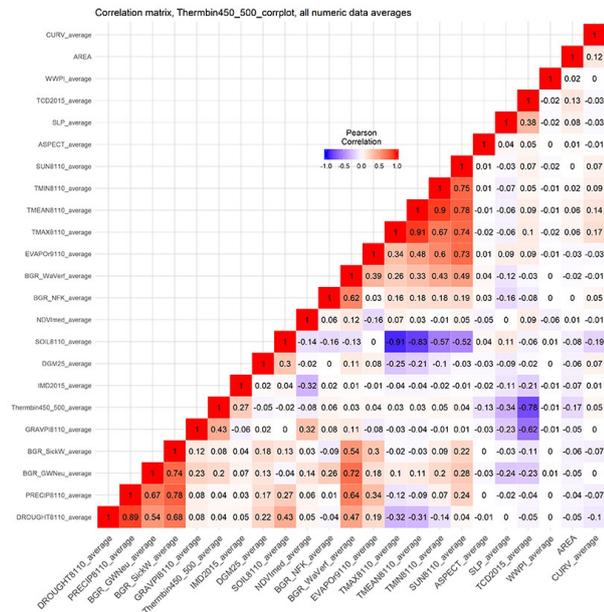


Abbildung 10.25: Korrelationsmatrix, Höhenintervall 450–500 m.

10.3 Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- ALLEN, M. F. (2007): *Mycorrhizal Funghi: Highways for Water and Nutrients in arid Soils*. In: *Vadose Zone Journal*, **6**, 2: 291–297.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. & MARTIN, S. (1998): *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Techn. Ber., FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- ANDA, A., SOOS, G., TEIXEIRA DA SILVA, J. & KOZMA-BOGNAR, V. (2015): *Regional evapotranspiration from wetland in Central Europe, in a 16-year period without human intervention*. In: *Agricultural and Forest Meteorology*, **205**: 60–72.
- BARRY, R. G. (2008): *Mountain Weather and Climate*. 3 Aufl. Cambridge Univ Press.
- BERNACCHI, C. J. & VANLOOCKE, A. (2015): *Terrestrial Ecosystems in a Changing Environment: A Dominant Role for Water*. In: *Annual Review of Plant Biology*, **66**, 1: 599–622.
- BESIR, A. & CUCE, E. (2018): *Green roofs and facades: A comprehensive review*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**: 915–939.
- BGR (2015): *Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland (NFKWe1000 250 V1.0)*. Techn. Ber., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BÖHM, C., KANZLER, M. & FREESE, D. (2014): *Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany*. In: *Agroforest Syst*, **88**: 579–591.
- BORMANN, F. H. & LIKENS, G. E. (1967): *Nutrient cycling*. In: *Science*, **155**, 3761: 424–429.
- BRONSTERT, A., FRISTSCH, U. & KATZENMAIER, D. (2001): *Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten*. Techn. Ber., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Umweltforschungsplan FKZ 297 24 508.
- BRUNEL-SALDIAS, N., SEGUEL, O., OVALLE, C., ACEVEDO, E. & MARTINES, I. (2018): *Tillage effects on the soil water balance and the use of water by oats and wheat in a Mediterranean climate*. In: *Soil and Tillage Research*, **184**: 68–77.
- CABORN, J. (1957): *Shelterbelts and Microclimate*, *Forestry Commission Bulletin*, Bd. 29. Her Majesty's stationary office, Edinburgh.
- CADE, B. S. & NOON, B. R. (2003): *A gentle introduction to quantile regression for ecologists*. In: *Frontiers in Ecology and the Environment*, **1**, 8: 412–420.
- CLEUGH, H. (1998): *Effects of windbreak on airflow, microclimates and crop yields*. In: *Agroforestry Systems*, **41**: 55–84.

- DAWSON, J. & SMITH, P. (2007): *Carbon losses from soil and its consequences for land-use management*. In: *Science of the Total Environment*, **382**: 165–190.
- DIMITRIOU, I. (2005): *Performance and Sustainability of Short-Rotation Energy Crops Treated with Municipal and Industrial Residues*. Dissertation, Uppsala.
- DRAPER, N. R. & SMITH, H. (1998): *Applied Regression Analysis*. Wiley Series in Probability and Statistics, 3 Aufl. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- DUPRAZ, C. & NEWMANN, S. M. (1997): *Temperate Agroforestry: The European Way*, 181–236. CABI, Cambridge.
- EEA (2008): *Impacts of Europe's changing climate – An indicator-based assessment*. Techn. Ber. 4, EEA.
- ELLENBERG, H. & LEUSCHNER, C. (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*, Bd. 8104. Utb.
- ELLISON, D., FUTTER, M. N. & BISHOP, K. (2012): *On the forest cover-water yield debate: From demand- to supply-side thinking*. In: *Global Change Biology*, **18**, 3: 806–820.
- ELMES, A., ROGAN, J., WILLIAMS, C., RATICK, S., NOWAK, D. & MARTIN, D. (2017): *Effects of urban tree canopy loss on land surface temperature magnitude and timing*. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **128**: 338–353.
- FERGUSON, B. K. (2005): *Porous Pavements*. CRC Press, Boca Raton.
- FISCHER, B., MANZONI, S., MORILLAS, L., CARCIA, M., JOHNSON, M. & LYON, S. (2019): *Improving agricultural water use efficiency with biochar - A synthesis of biochar effects on water storage and fluxes across scales*. In: *Science of the Total Environment*, **657**: 853–862.
- FISCHER, E. M., SENEVIRATNE, S. I., VIDALE, P. L., LÜTHI, D. & SCHÄR, C. (2007): *Soil Moisture-Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave*. In: *Journal of Climate*, **20**, 20: 5081–5099.
- FLECK, S., ALBERT, M., PLAŠIL, P., NAGEL, R., SUTMÖLLER, J., AHRENDTS, B., SCHMIDT, M., EVERS, J., HANSEN, J., OVERBECK, M., SCHMIDT, W., SPELLMANN, H. & MEESENBURG, H. (2015): *Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts*, Bd. 13.
- FLOHN, H. (1971): *Saharization: Natural causes or management*. In: *WMO Special Environmental Report*, **312**: 101–106.
- FOEREID, B., BRO, R., MOGENSEN, V. O. & PORTER, J. R. (2002): *Effects of windbreak strips of willow coppice – modelling and field experiment on barley in Denmark*. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **93**: 25–32.
- FRAZER, L. (2005): *Paving Paradise*. In: *Environmental Health Perspectives*, **113**, 7: A456–A463.

- FREILICHER, M., KANE, B. C., RYAN, III, H. D. P. & BLONIARZ, D. V. (2008): *A Report on the Status of Street Trees in Worcester, Massachusetts*. In: *Trees in peril: responding to the Asian longhorned beetle*. (http://eco.umass.edu/wpcontent/uploads/file/Worcester_Report_Final.pdf), , October.
- GAY, L. W. & STEWART, J. B. (1974): *Energy balance studies in coniferous forests*. Techn. Ber., Natural Environment Research Council, Institute of Hydrology, Wallingford, Berkshire.
- GIARDINO, J. & HOUSER, C. [Hrsg.] (2015): *Principles and Dynamics of the Critical Zone*. Developments in Earth Surface Processes. Elsevier.
- GOOD, S. P., NOONE, D. & BOWEN, G. (2015): *Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes*. In: *Science*, **349**, 6244: 175–177.
- GORDON, A. M., NEWMAN, S. M. & WILLIAMS, P. A. (1997): *Temperate Agroforestry: An Overview*, 1–8. CABI, Cambridge.
- GUIDI NISSIM, W., VOICU, A. & LABRECQUE, M. (2014): *Willow short-rotation coppice for treatment of polluted groundwater*. In: *Ecological Engineering*, **62**: 102–114.
- HARGITA, Y., GERBER, K., OEHMICHEN, K., DUNGER, K. & RÜTER, S. (2016): *Die Umweltauswirkungen der Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) in einem zukünftigen Klimaschutzabkommen, Climate Change*, Bd. 32. Umweltbundesamt. Forschungskennzahl 3712 41 105, UBA-FB 002377.
- HEINKEN, T. (1995): *Naturnahe Laub- und Nadelwälder grundwasserferner Standorte im niedersächsischen Tiefland: Gliederung, Standortbedingungen, Dynamik*. (Dissertationes botanicae, Bd. 239). Cramer in der Gebr.-Borntraeger-Verl.-Buchh., Berlin, Stuttgart.
- HERZOG, F. (1997): *Konzeptionelle Überlegungen zu Agroforstwirtschaft als Landnutzungsalternative in Europa*. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 32–35.
- HERZOG, F. (1998): *Streuobst: a traditional agroforestry system as model for agroforestry development in temperate Europe*. In: *Agroforestry Systems*, **42**: 61–80.
- HERZOG, F., HORSCH, H. & STEINHARDT, U. (1997): *Quantifying the impact of agroforestry on the landscape water balance*. In: *Book of Abstracts of the International Workshop "Agroforestry for Sustainable Land-use"*, 23-28 June 1997, 143–148. Montpellier.
- HILDMANN, C. (1999): *Temperaturen in Zönosen als Indikatoren zur Prozeßanalyse und zur Bestimmung des Wirkungsgrades*, Inhalt Dissertation TU Berlin, Fachbereich 7, Umwelt und Gesellschaft. Mensch und Buch Verlag, Berlin.
- HILL, S. B. (2003): *Yeomans' Keyline design for sustainable soil, water, agroecosystem and biodiversity conservation: a personal social ecology analysis*. In: *Agriculture for the Australian Environment. Proceedings of the 2002 Fenner Conference*. Albury, NSW: Johnstone Centre, Charles Sturt University, 34–48.
- HLNUG (2017): *Artensteckbrief Europäischer Biber (Castor fiber), Stand 2017*. Techn. Ber., Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Gießen.

- HLNUG (2019): *BFD50-2, nutzbare Feldkapazität im durchwurzelbaren Bodenraum [mm] und durchwurzelbarer Bodenraum [dm] für das Gebiet von Hessen*. Unpublizierter Datensatz.
- HLUG (2015): *Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen: Maßnahmenprogramm 2015-2021*. Techn. Ber., Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- HMUKLV (2016): *Gutachten für ein Landschaftsprogramm als Bestandteil des Landesentwicklungsplanes Hessen 2025, Entwurf (Stand 12.09.2016)*. Techn. Ber., Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- HOFFMANN, R., BRÄUNIG, A., BENNING, R., KNOCH, D., HEINKELE, T., JACOB, F., ANDREAE, H. & FRIELINGHAUS, G., MONIKA ANS MILBERT (2019): *Boden des Jahres 2019 – Kippenboden (Kipp-Regosol, Kipp-Pararendzina): Fünfzehnter Boden des Jahres in Deutschland*. In: *Bodenschutz*, **1**: 4–15.
- HOFMANN, G., ANDERS, S. & UNGER, S. (1985): *Quantifizierung der Leistungspotenz natürlicher Standortproduktivkräfte für die Rohholzerzeugung anhand ökologischer Ertragsmodelle - dargestellt am Beispiel natürlicher Buchenwälder des unteren Berglandes*. In: *Beiträge für die Forstwirtschaft*, **3**: 97–109.
- HOLSTEN, B., OCHSNER, S., SCHÄFER, A. & TREPPEL, M. (2012): *Praxisleitfaden für Maßnahmen zur Reduzierung von Nährstoffausträgen aus dränierten landwirtschaftlichen Flächen*. Techn. Ber., Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- JASECHKO, S., SHARP, Z. D., GIBSON, J. J., BIRKS, S. J., YI, Y. & FAWCETT, P. J. (2013): *Terrestrial water fluxes dominated by transpiration*. In: *Nature*, **496**, 7445: 347–350.
- JOLLIFFE, I. T. (2002): *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics, 2 Aufl. Springer.
- JONES, C. (2008): *Liquid carbon pathway unrecognised*. In: *Australian Farm Journal*, 15–17.
- JØRGENSEN, U. & SCHELDE, K. (2001): *Energy crop water and nutrient use efficiency: Prepared for The International Energy Agency IEA Bioenergy Task 17, Short Rotation Crops*. Techn. Ber., Danish Institute of Agricultural Sciences (DIAS), Tjele, Denmark.
- KAISER, H. F. (1958): *The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis*. In: *Psychometrika*, **23**, 3: 187–200.
- KANZLER, M., BÖHM, C., MIRCK, J. & FREESE, D. (2015): *Variabilität des Mikroklimas im Einflussbereich der gehölzstreifen eines Agroforstsystems*. In: *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.*, **27**: 77–78.
- KANZLER, M., BÖHM, C., MIRCK, J., SCHMITT, D. & VESTE, M. (2017): *Einfluss agroforstlicher Nutzung auf das Mikroklima, den Ackerfruchtertrag und die potentielle Evaporation*. In: *Bäume in der land(wirt)schaft – von der Theorie in die Praxis: Tagungsband*, 127–131. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus.
- KARAVIĆ, A. (2005): *Production and Ecological Aspects of Short Rotation Poplars in Sweden*. Dissertation, Uppsala.

- KASTLER, M., MOLT, C., KAUFMANN-BOLL, C. & STEINRÜCKE, M. (2015): *Kühlleistung von Böden: Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW*. Techn. Ber. LANUV-Arbeitsblatt 29, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen.
- KLAUSING, O. (1988): *Die Naturräume Hessens*. Hessische Landesanstalt für Umwelt.
- KOENKER, R. (2005): *Quantile Regression*. Econometric Society Monographs. Cambridge University Press Cambridge.
- KULLIK, N. (2016): *Scenario for agricultural land-use based on a Keyline cultivation pattern: The Schloss Tempelhof community in Germany*. Bachelor-thesis, Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg. Studiengang Umweltwissenschaften.
- KÜRSTEN, E. (2000): *Fuelwood production in agroforestry systems for sustainable land use and CO₂-mitigation*. In: Ecological Engineering, **16**, S1: 69–72.
- LANDSBERG, H. E. (1981): *The Urban Climate*. Academic Press.
- LARCHER, W. (1994): *Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt*. 6. neubarb. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- LICHTENTHALER, H. K. (1996): *Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants*. In: Journal of Plant Physiology, **148**, 1-2: 4–14.
- LIKENS, G., BORMANN, F. H., PIERCE, R. & REINERS, W. (1978): *Recovery of a deforested ecosystem*. In: Science, **199**, 4328: 492–496.
- LIN, B.-S. & LIN, C.-T. (2016): *Preliminary study of the influence of the spatial arrangement of urban parks on local temperature reduction*. In: Urban Forestry and Urban Greening, **20**: 348–357.
- LINDNER, M. (1998): *Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern*. Techn. Ber. 46, PIK, Potsdam.
- LISIECKI, L. E. & RAYMO, M. E. (2005): *A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records*. In: Paleoclimatology, **20**, 1: PA1003, 17 p.
- LÜDERITZ, V. & JÜPNER, R. (2009): *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa*, Kap. Renaturierung von Fließgewässern, 95–124. Spektrum - Akademischer Verlag, Heidelberg.
- LUICK, R. & VONHOFF, W. (2009): *Wertholzpflanzungen - das Thema Agroforstsysteme in moderner Inszenierung*. In: Naturschutz und Landschaftsplanung, **41**, 2: 47–52.
- MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P. & PÖRTNER, H. O. (2018): *Global warming of 1.5 C°. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to threat of climate change*. Techn. Ber., IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change.
- McNAUGHTON, K. G. & BLACK, T. A. (1973): *A study of evapotranspiration from a Douglas fir forest using the energy balance approach*. In: Water Resources Research, **9**, 6: 1579–1590.

- MENGEL, K. & KIRKBY, E. A. (2001): *Principles of Plant Nutrition*. 5 Aufl. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- MEYER, P. & SCHMIDT, M. (2008): *Aspekte der Biodiversität von Buchenwäldern - Konsequenzen für eine naturnahe Bewirtschaftung. Aspects of the biodiversity of beech forests – consequences for near to nature management*. In: Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 3, 3: 192.
- MILLION, A., BÜRGOW, G. & STEGLICH, A. [Hrsg.] (2018): *Roof Water-Farm: Urbanes Wasser für urbane Landwirtschaft*. Institut für Stadt- und Regionalplanung der Technischen Universität Berlin, Berlin.
- MONTEIRO, M. V., DOICK, K. J., HANDLEY, P. & PEACE, A. (2016): *The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London*. In: Urban Forestry & Urban Greening, **16**: 160–169.
- MORAKINYO, T., DAHANAYAKE, K. & NG, E. (2017): *Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study*. In: Energy and Buildings, **145**: 226–237.
- MORRIS, C. E., CONEN, F., ALEX, H. J., PHILLIPS, V., PÖSCHL, U. & SANDS, D. C. (2013): *Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere*. In: Global Change Biology, **20**, 2: 341–351.
- MÜTTRICH, A. (1890): *Jahresbericht über die Beobachtungsergebnisse der im Königreich Preußen, des Königreichs Württemberg, des Herzogthum Braunschweig, der thüringischen Staaten, der Reichslande und dem Landesdirectorium der Provinz Hannover eingerichteten forstlich-meteorologischen Stationen*. Techn. Ber., Berlin.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (2012): *Challenges and Opportunities in the Hydrologic Sciences*. The National Academies Press, Washington DC.
- NEITSCH, S., ARNOLD, J., KINIRY, J., WILLIAMS, J. & KING, K. (2002): *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2000*. Temple, Texas.
- NUBERG, I. (1998): *Effect of shelter on temperate crops: a review to define research for Australian conditions*. In: Agroforestry Systems, **41**, 1: 3–34.
- ODUM, E. P. (1983): *Grundlagen der Ökologie, Band I: Grundlagen, Übersetzt und bearb. von Jürgen und Ena Overbeck*. 2. unveränderte Aufl. Georg Thieme, Stuttgart, New York.
- OKE, T. R. (1988): *The urban energy balance*. In: Progress in Physical Geography, **12**, 4: 471–508.
- OKE, T. R. (2002): *Boundary Layer Climates*. 2 Aufl. Routledge.
- OKI, T. & KANAE, S. (2006): *Global Hydrological Cycles and World Water Resources*. In: Science, **313**, 5790: 1068–1072.
- ORESKE, N. (2004): *The Scientific Consensus on Climate Change*. In: Science, **306**, 5702: 1686–1686.

- PAAR, U., DAMMANN, I., WEYMAR, J., SPIELMANN, M. & EICHHORN, J. (2018): *Waldzustandsbericht 2018*. Techn. Ber., Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen.
- PATT, H. (2016): *Fließgewässer- und Auenentwicklung - Grundlagen und Erfahrungen*. 2. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg.
- PROCHÁZKA, J., POKORNÝ, J., VÁCHA, A., NOVOTNÁ, K. & KOBESOVÁ, M. (2019): *Land cover effect on water discharge, matter losses and surface temperature: Results of 20 years monitoring in the Šumava Mts*. In: *Ecological Engineering*, **127**: 220–234.
- QUAST, J., EHLERT, V., MESSAL, H., KNIERIM, A., SZERENCSEITS, M., SCHMIDT, S. A., W., SAWICKA, M., VON TÜMPLING, W., BÖHME, M., JAECKEL, A., GOTTSCHICK, M. & ETTE, J. (2010): *Anlage A1 zum Ergebnisbericht des BMBF-Forschungsprojektes MinHorLam - Minderung von Hochwasserrisiken durch nicht-strukturelle Landnutzungsmaßnahmen in Abflussbildungs- und Überschwemmungsgebieten*. Techn. Ber., Leibnitz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH; Universität Hamburg; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- QUINKENSTEIN, A., BÖHM, C., FREESE, D., WÖLLECKE, J., GRÜNEWALD, H., SCHNEIDER, B. U. & HÜTTL, R. F. (2008): *Alley-Cropping - Ein klima-adaptiertes Landnutzungssystem zur nachhaltigen Biomasseproduktion*. In: *Forum der Forschung*, **21**: 1–8.
- RIEK, W. (2009): *Erste Ergebnisse der Bodenzustandserhebung (BZE-2) in Brandenburg*. In: *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe / Wissenstransfer in die Praxis*, **40**: 6–13.
- RIPL, W. & HILDMANN, C. (2000): *Dissolved load transported by rivers as an indicator of landscape sustainability*. In: *Ecological Engineering*, **14**: 373–387.
- ROGAN, J., ZIEMER, M., MARTIN, D., RATICK, S., CUBA, N. & DELAUER, V. (2013): *The impact of tree cover loss on land surface temperature: A case study of central Massachusetts using Landsat Thematic Mapper thermal data*. In: *Applied Geography*, **45**: 49–57.
- RÖHRICHT, C. & KUSCHER, K. (2004): *Anbauempfehlungen für schnellwachsende Baumarten: Kurzumtriebsplantagen mit Pappel und Weide*. Techn. Ber., Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.
- SCHMIDT, M. (2008): *Gebäudebegrünung und Verdunstung*. In: *Garten+Landschaft*, **1**: 15–18.
- SCHMIDT, M. (2009): *Rainwater harvesting for mitigating local and global warming*. In: *Fifth Urban Research Symposium*, Bd. 26, 09.
- SCHMIDT, M. (2010): *A New Paradigm in Sustainable Land Use*. In: *TOPOS*, **70**: 99–104.
- SCHULLA, J. & JASPER, K. (2000): *Model Description WaSiM-ETH (Water balance Simulation Model ETH)*. Zürich.
- SENEVIRATNE, S. I., CORTI, T., DAVIN, E. L., HIRSCHI, M., JAEGER, E. B., LEHNER, I., ORLOWSKY, B. & TEULING, A. J. (2010): *Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review*. In: *Earth-Science Reviews*, **99**, 3-4: 125–161.

- SHEIL, D. (2014): *How plants water our planet: Advances and imperatives*. In: Trends in Plant Science, **19**, 4: 209–211.
- SHEIL, D. (2018): *Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle*. In: Forest Ecosystems, **5**, 19: 22 p.
- SIMSEK, C. K. & ÖDÜL, H. (2018): *Investigation of the effects of wetlands on micro-climate*. In: Applied Geography, **97**: 48–60.
- STERLING, S. M., DUCHARNE, A. & POLCHER, J. (2013): *The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle*. In: Nature Climate Change, **3**, 4: 385–390.
- STEBING, L. (1952): *Experimentelle Untersuchungen über die Veränderung der Standortsfaktoren durch Windschutzanlagen*. In: Oikos, **4**, II: 118–147.
- STEBING, L. (1955): *Studien über den Taufall als Vegetationsfaktor*. In: Berichte deutsche botanische Gesellschaft, **68**, 6: 55–70.
- STEBING, L. (1962): *Untersuchungen zum Wasserhaushalt windgeschützter und windexponierter Pflanzen am natürlichen Standort*. In: Biologisches Zentralblatt, **81**, 5: 585–596.
- STEBING, L. & BÄTJER, D. (1963): *Pflanzenökologische Untersuchungen hinter Windschutzzäunen in der Wesermarsch*. In: Meteorologische Rundschau, **16**, 6: 161–165.
- SUTER, I., MAKSIMOVIC, C. & VAN REEUWIJK, M. (2017): *A neighbourhood-scale estimate for the cooling potential of green roofs*. In: Urban Climate, **20**: 33–45.
- SVOMA, B. M., FOX, N. I., PALLARDY, Q. & UDAWATTA, R. P. (2016): *Evapotranspiration differences between agroforestry and grass buffer systems*. In: Agricultural Water Management, **176**: 214–221.
- SWANN, A. L., LAGUË, M. M., GARCIA, E. S., FIELD, J. P., BRESHEARS, D. D., MOORE, D. J., SALESKA, S. R., STARK, S. C., VILLEGAS, J. C., LAW, D. J. & MINOR, D. M. (2018): *Continental-scale consequences of tree die-offs in North America: Identifying where forest loss matters most*. In: Environmental Research Letters, **13**, 5.
- TIMMERMANN, T., JOOSTEN, H. & SUCCOW, M. (2009): *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa*, Kap. Restaurierung von Mooren, 55–94. Spektrum - Akademischer Verlag, Heidelberg.
- VAZ MONTEIRO, M., DOICK, K. J., HANDLEY, P. & PEACE, A. (2016): *The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London*. In: Urban Forestry and Urban Greening, **16**: 160–169.
- WAGENER, F. (2009): *Wald – Flächennutzungsalternativen: Landschaft wieder mehr in Nutzung nehmen und Vielfalt durch Landbau steigern*. In: Landbauforschung, **Sonderheft 327 „Waldstrategie 2020“**: 111–122.
- WARD, P. R., MICIN, S. F. & FILLERY, I. R. P. (2012): *Application of eddy covariance to determine ecosystem-scale carbon balance and evapotranspiration in an agroforestry system*. In: Agricultural and Forst Meteorology, **152**: 178–188.

WATTS, N., AMANN, M., AYEB-KARLSSON, S., BELESOVA, K., BOULEY, T., BOYKOFF, M., BYASS, P., CAI, W., CAMPBELL-LENDRUM, D., CHAMBERS, J., COX, P. M., DALY, M., DASANDI, N., DAVIES, M., DEPLEDGE, M., DEPOUX, A., DOMINGUEZ-SALAS, P., DRUMMOND, P., EKINS, P., FLAHAULT, A., FRUMKIN, H., GEORGESON, L., GHANEI, M., GRACE, D., GRAHAM, H., GROJSMAN, R., HAINES, A., HAMILTON, I., HARTINGER, S., JOHNSON, A., KELMAN, I., KIESEWETTER, G., KNIVETON, D., LIANG, L., LOTT, M., LOWE, R., MACE, G., ODHIAMBO SEWE, M., MASLIN, M., MIKHAYLOV, S., MILNER, J., LATIFI, A. M., MORADI-LAKEH, M., MORRISSEY, K., MURRAY, K., NEVILLE, T., NILSSON, M., ORESZCZYN, T., OWFI, F., PENCHEON, D., PYE, S., RABBANIHA, M., ROBINSON, E., ROCKLÖV, J., SCHÜTTE, S., SHUMAKE-GUILLEMOT, J., STEINBACH, R., TABATABAEI, M., WHEELER, N., WILKINSON, P., GONG, P., MONTGOMERY, H. & COSTELLO, A. (2018): *The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health*. In: *The Lancet*, **391**, 10120: 581–630.

WECKESSER, M. (2003): *Die Bodenvegetation von Buchen-Fichten-Mischbeständen im Solling – Struktur, Diversität und Stoffhaushalt*. Cuvillier Verlag, Göttingen.

WERNER, A., VETTER, A. & REINHOLD, G. (2006): *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Energieholz*. Techn. Ber., Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

WU, C.-L., SHUKLA, S. & SHRESTHA, N. (2016): *Evapotranspiration from drained wetlands with different hydrologic regimes: Drivers, modeling, and storage functions*. In: *Journal of Hydrology*, **538**: 416–428.

ZERBE, S. & WIEGLEB, G. [Hrsg.] (2009): *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa*. Spektrum - Akademischer Verlag, Heidelberg.

ZHANG, R., XU, X., LIU, M., ZHANG, Y., XU, C., YI, R. & LUO, W. (2018): *Comparing evapotranspiration characteristics and environmental controls for three agroforestry ecosystems in a subtropical humid karst area*. In: *Journal of Hydrology*, **563**: 1042–1050.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Charakterkurven der Holzarten	14
2.2	Exemplarische Abschätzung der Aufteilung der Globalstrahlung	16
3.1	Hessen im Thermalbild	25
3.2	Schema Datenaggregation	27
3.3	Korrelationsmatrix, gesamter Datensatz	30
3.4	Korrelationskoeffizienten nach Höhenintervallen	32
3.5	T _{Land} für Hessen in Temperaturklassen	35
3.6	Landschaftsausschnitt bei Rüdesheim am Rhein	40
3.7	Vergleich Thermaldaten: Multitemporaldaten und Momentaufnahme	41
3.8	T _{Land} für Hessen im Höhenintervall 150–200 m	43
6.1	Schema Ableitung von Suchräumen	94
6.2	Beispiele zur Ableitung von Suchräumen, Teil 1	95

6.3	Beispiele zur Ableitung von Suchräumen, Teil 2	96
6.4	Beispiele zur Ableitung von Suchräumen, Teil 3	97
6.5	Beispiele Ableitung von Suchräumen	98
6.6	Potentielle Biosphärenregion Rheingau-Taunus	100
10.1	Aggregation Thermal-Komposit	119
10.2	Datenstruktur ATKIS-DLM	120
10.3	Qualitätsbeispiele Urban Atlas	121
10.4	DGM25 Hessen, Hypsometrische Kurve	122
10.5	Höhenabhängigkeit Prädiktoren	122
10.6	PCA-Ladungen, gesamter Datensatz	123
10.7	PCA-Ladungen, Höhenintervall 71–100 m	123
10.8	PCA-Ladungen, Höhenintervall 100–150 m	124
10.9	PCA-Ladungen, Höhenintervall 150–200 m	124
10.10	PCA-Ladungen, Höhenintervall 200–250 m	125
10.11	PCA-Ladungen, Höhenintervall 250–300 m	125
10.12	PCA-Ladungen, Höhenintervall 300–350 m	126
10.13	PCA-Ladungen, Höhenintervall 350–400 m	126
10.14	PCA-Ladungen, Höhenintervall 400–450 m	127
10.15	PCA-Ladungen, Höhenintervall 450–500 m	127
10.16	Korrelationsmatrix, gesamter Datensatz	128
10.17	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 71–100 m	128
10.18	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 100–150 m	129
10.19	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 150–200 m	129
10.20	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 200–250 m	130
10.21	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 250–300 m	130
10.22	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 300–350 m	131
10.23	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 350–400 m	131
10.24	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 400–450 m	132
10.25	Korrelationsmatrix, Höhenintervall 450–500 m	132

Tabellenverzeichnis

3.1	Resultate der Hauptkomponentenanalysen	28
3.2	Verwendete ATKIS-DLM Landnutzungsklassen	36
10.1	Verteilung von T_{Land} – Klassen und Perzentile	116
10.2	Prädiktoren für T_{Land} , Rasterdaten	117
10.3	Prädiktoren für T_{Land} , Vektordaten	118