

Klimaschutz und Klimaanpassung im Landkreis Forchheim

Klimaanpassungsstrategie des Landkreises Forchheim

KLIMASCHUTZ &
KLIMAAANPASSUNG
im Landkreis Forchheim



LANDKREIS
FORCHHEIM



Impressum

Herausgeber und Redaktion

Landratsamt Forchheim

Büro Energie und Klima

Am Streckerplatz 3

91301 Forchheim

Autor der Textbeiträge

Sebastian Maier

Projektförderung

Das Klimaanpassungskonzept des Landkreises Forchheim ist im Rahmen des EU-Projektes „STRENCH“ mit Förderung des European Regional Development Fund der Europäischen Union vom 04/2020 bis 12/2021 entstanden.

Förderkennzeichen: CE1665



Grußwort



Die globale Erderwärmung gilt als eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Um ihre ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen so gering wie möglich zu halten, gilt es Maßnahmen zu ergreifen, die einerseits die klimatische Erwärmung eindämmen und andererseits die verschiedenen Lebensbereiche an die neuen Begebenheiten anpassen.

Der Landkreis Forchheim verfolgt schon seit 2007 aktiv Klimaschutzziele und hat in diesem Zusammenhang im Jahr 2011 ein integriertes Klimaschutzkonzept ausgearbeitet. Seit 2013 setzt das Klimaschutzmanagement die Maßnahmen des Konzeptes um und trägt somit nachhaltig zur Erreichung der Klimaziele bei. Die Maßnahmen erstrecken sich über die Säulen Öffentlichkeitsarbeit, kommunales Energiemanagement und die Beratung sowie Begleitung der Landkreiskommunen. So konnten die Treibhausgas-Emissionen im Landkreis von 1990 bis 2019 durch die Umsetzung diverser Maßnahmen um 25,6 % reduziert werden. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger stieg im Sektor Strom von 1990 bis 2019 von 0,8 auf 37,2 % und jener im Sektor Wärme von 4,4 auf 26,9 %.

Da die Folgen des Klimawandels aber dennoch bereits spürbar sind, ist es notwendig, künftig auch verstärkt Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel umzusetzen. Handlungsgrundlage hierfür ist für den Landkreis Forchheim das vorliegende Klimaanpassungskonzept. Das Klimaanpassungskonzept ist im Rahmen des EU-Projektes „STRENCH“ entstanden, welches sich mit den Risiken für Kulturgüter im Klimawandel beschäftigt hat.

Für die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen ist Engagement sowohl von Seiten politischer als auch gesellschaftlicher Akteurinnen und Akteure notwendig. Das vorliegende Konzept bietet entsprechend eine solide Handlungsgrundlage.

Ihr Landrat

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Ulm'. The signature is fluid and cursive.

Dr. Hermann Ulm

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Klimaänderung und Klimaanpassung im Landkreis Forchheim	1
1.2	Handlungsfelder	1
1.3	Vorgehen und Fragestellungen	2
2	Klimaveränderungen im Landkreis Forchheim	5
2.1	Temperatur	5
2.2	Hitzetage	7
2.3	Frosttage	7
2.4	Sonnenscheindauer	7
2.5	Niederschlag	8
2.5.1	Jahresniederschlag	8
2.5.2	Regenerosivität & Starkregen	8
2.6	Trockenheit	10
2.7	Fließgewässerabfluss und Grundwasser	11
2.8	Phänologie & Spätfrostgefahr	13
2.9	Sturm und Hagel	14
3	Betroffenheit	15
3.1	Zunahme von Temperatur und Trockenheit	16
3.1.1	Hitze	16
3.1.2	Biota	17
3.1.3	Trockenheit	18
3.1.4	Wasserqualität	20
3.2	Sonnenschein	21
3.3	Längere Vegetationsperiode und Frostereignisse	22
3.3.1	Biota und seltenere Frostereignisse	22
3.3.2	Spätfrost	23
3.4	Niederschlagsintensität	24

3.4.1 Schäden und Gewässerqualität	24
3.4.2 Trockenheit	25
3.5 Stürme.....	26
4 Maßnahmenkatalog.....	27
4.1 Wasserwirtschaftliche Maßnahmen	27
4.1.1 Starkregen.....	27
4.1.2 Hitze, Trockenheit und Niedrigwasser.....	30
4.2 Trinkwasserversorgung	35
4.2.1 Hitze und Trockenheit.....	35
4.2.2 Trinkwasserqualität.....	36
4.3 Obstbau.....	38
4.3.1 Trockenheit, Hitze & Strahlung	38
4.3.2 Spätfrost	40
4.3.3 Sturm.....	43
4.3.4 Schädlinge	43
4.4 Forstwirtschaft.....	45
4.4.1 Trocken- und Hitzeschäden	45
4.4.2 Sturmschäden.....	48
4.4.3 Schädlingsbefall	49
4.4.4 Spätfrostschäden.....	51
4.4.5 Bodenschutzmaßnahmen aufgrund milderer und feuchterer Winter	52
4.5 Landwirtschaft.....	53
4.5.1 Starkregen.....	53
4.5.2 Trockenheit & Hitze	56
4.5.3 Krankheiten & Schädlinge.....	62
4.5.4 Erhöhtes Risiko für Spätfrostschäden und Folgen milderer Winter	63
4.5.5 Weitere Aspekte.....	63
4.6 Stadt- und Kommunalplanung	65
4.6.1 Hitze	65

4.6.2 Starkregen.....	69
4.7 Menschliche Gesundheit	72
4.7.1 Gesundheitliche Vorsorge	72
4.7.2 Hitze	72
4.7.3 UV-Strahlung.....	73
4.7.4 Vektorvermittelte Infektionskrankheiten	73
4.7.5 Ausbreitung von Allergenen.....	74
4.8 Katastrophenschutz	75
4.8.1 Eigene Betroffenheit.....	76
4.8.2 Stärkung der Selbsthilfekapazität der Bevölkerung	77
4.9 Naturschutz und Landschaftspflege	79
4.10 Zusammenfassung	84
5 Kommunikation, Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzung.....	85
6 Monitoring und Evaluation	86
7 Literatur	87
8 Anhang	103
8.1 Datengrundlage der Analyse zu Klimaänderungen im Landkreis Forchheim.....	103
8.2 Ergänzungen zu Klimaanpassungsmaßnahmen	104
8.3 Zusammenfassende Darstellung der Klimaanpassungsmaßnahmen	105
8.3.1 Wasserwirtschaft und Trinkwasserversorgung.....	105
8.3.2 Obstbau	111
8.3.3 Forstwirtschaft.....	117
8.3.4 Landwirtschaft	121
8.3.5 Stadt- und Kommunalplanung.....	128
8.3.6 Menschliche Gesundheit.....	131
8.3.7 Katastrophenschutz	133
8.3.8 Naturschutz und Landschaftsplanung.....	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spätfrostempfindlichkeit verschiedener Baumarten.....	52
Tabelle 2: Untersuchte Parameter, Art der Daten, Datentyp und Datenquelle der Analyse zu Klimaänderungen im Landkreis Forchheim	103
Tabelle 3: Bauplanerische Instrumente (Auszug) zur Klimaanpassung in Siedlungs- und Kommunalflächen.....	104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vom Klimawandel betroffene Handlungsfelder.....	2
Abbildung 2: Das Vulnerabilitätskonzept.....	3
Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Jahresmitteltemperatur der Station „Möhrendorf-Kleinseebach“ des Deutschen Wetterdienstes.....	5
Abbildung 4: Klimaprojektionen (den Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 folgend) und beobachteter 30-jähriger gleitender Mittelwert der Jahresmitteltemperatur (dargestellt als Abweichung zur Referenzperiode 1971-2000) der Klimaregion "Forchheim-Fürth-Erlangen-Höchststadt-Nürnberg".....	6
Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der jährlichen Sonnenscheindauer an der Station „Möhrendorf-Kleinseebach“ des DWD.....	7
Abbildung 6: Karte des mittleren jährlichen R-Faktors ($N h^{-1} a^{-1}$) für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung.....	9
Abbildung 7: Niederschlagsmenge 20-jährlicher, einstündiger Niederschläge und 20-jährlicher, eintägiger Niederschläge für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung.....	10
Abbildung 8: Häufigkeitsverteilungen von SMI-Werten des Gesamtbodens im Sommerhalbjahr für die Klimaperioden 1971-2000 und 1990-2019 im Landkreis Forchheim.....	11
Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung des mittleren Abflusses der Wiesent an der Messstelle Muggendorf.....	12
Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung des Blühbeginns von Apfelbäumen an der phänologischen Station „Wiesental-Streitberg“ des DWD.....	13
Abbildung 11: Klimawirkungen, die sich aus i) steigenden Temperaturen und ii) zunehmender Trockenheit für den Landkreis Forchheim ergeben würden.....	16
Abbildung 12: Klimawirkungen, die sich aus einer zunehmenden Sonnenscheindauer für den Landkreis Forchheim ergeben würden.....	21
Abbildung 13: Klimawirkungen, die sich aus i) einer verlängerten Vegetationsperiode und ii) einem veränderten Auftreten von Frostereignissen für den Landkreis Forchheim ergeben würden.....	22
Abbildung 14: Klimawirkungen, die sich aus intensiveren Niederschlägen für den Landkreis Forchheim ergeben würden.....	24
Abbildung 15: Klimawirkungen, die sich aus häufigeren und intensiveren Stürmen für den Landkreis Forchheim ergeben würden.....	26
Abbildung 16: Grundlegende Zusammenhänge zwischen Anstiegszeit, Scheitelhöhe und Wellenvolumen nach einem Regenereignis, wenn keine weiteren Prozesse hinzukommen.....	28
Abbildung 17: Vorgehensweise vom ersten Auftreten bis zur erfolgreichen Bekämpfung eines neuen Schaderregers.....	44
Abbildung 18: Beeinflussung des Windfeldes in Abhängigkeit von verschiedenen Gehölzstrukturen.....	61
Abbildung 19: Wirkung einer streifenförmigen Gehölzpflanzung auf das Mikroklima.....	61
Abbildung 20: Maßnahmen zur Reduktion von Überhitzung im Gebäude.....	66

Abbildung 21: Extensive Dachbegrünung, Retentionsdach mit Intensivbegrünung und Dachterrasse mit Pflanztrögen	67
Abbildung 22: Tageszeitliche Entwicklung der Lufttemperatur an unterschiedlichen Messstellen in Bayreuth. Die grün gestrichelte Linie stellt den Temperaturverlauf im Hofgarten dar	68
Abbildung 23: Informationen zum Thema „baulicher Schutz“ stehen der Bevölkerung u.a. als Informationsflyer auf der Webseite des BKK zur Verfügung	78
Abbildung 24: Schema der differenzierten Landnutzung	82

Abkürzungen

DWD

Deutscher Wetterdienst 13

FO-Fü-ERH-N

Forchheim-Fürth-Erlangen-Höchststadt-Nürnberg 5

LfU

Bayerisches Landesamt für Umwelt 5

nFK

nutzbare Feldkapazität 45

PBSM

Pflanzenbehandlungs- und
Schädlingsbekämpfungsmittel 37

R-Faktor

Regenerositäts-Faktor 9

SMI

Soil Moisture Index 10

UFZ

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung 10

1 Einleitung

Im Folgenden wird zunächst die Bedeutung der Klimaänderung und der Klimaanpassung im Landkreis Forchheim erläutert. Im Anschluss werden die betrachteten Handlungsfelder sowie das Vorgehen und die Fragestellungen beschrieben.

1.1 Klimaänderung und Klimaanpassung im Landkreis Forchheim

Im Zuge des fortschreitenden anthropogenen Klimawandels und der damit einhergehenden Folgen für Deutschland, Bayern und den Landkreis Forchheim (Foken & Lüers, 2015; Gillett et al., 2021; LfU, 2007; Maier, 2020; UBA, 2019), hat die Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen (Haße & Kind, 2019; UBA, 2017, 2019). Der Dringlichkeit entsprechend, soll die Klimapolitik des Landkreises Forchheim nicht mehr nur den Klimaschutz berücksichtigen, sondern um das Themenfeld der Klimaanpassung erweitert werden. Denn Veränderungen von Wetterextremen wie z.B. Starkniederschläge, Hitze und Niedrigwasser der Wiesent treten im Landkreis Forchheim schon heute häufiger auf. Dementsprechend wichtig ist es, sich frühzeitig mit dem Themenfeld der Klimaanpassung zu beschäftigen und Klimaanpassungsmaßnahmen für den Landkreis Forchheim zu diskutieren.

Der Landkreis Forchheim ist ein sehr vielfältiger Landkreis. Er ist Teil der Metropolregion Nürnberg und liegt im Regierungsbezirk Oberfranken. Neben seiner Attraktivität als Wirtschaftsstandort, ist der Landkreis bekannt für seine einmalige Kulturlandschaft. Besonders die Bierkeller, der Obstanbau und die Fränkische Schweiz als Erholungs- und Aktivregion sind überregional bekannt und ziehen zahlreiche Besucherinnen und Besucher an (LfU & BLfD, 2004). Als eher ländlich geprägter Landkreis hat er einen hohen Anteil an Nebenerwerbslandwirtinnen und Nebenerwerbslandwirten sowie Privatwaldbesitzerinnen und Privatwaldbesitzern (AELF Bamberg, 2019). Dementsprechend wichtig und identitätsstiftend sind der Obstbau, die Landwirtschaft und auch die Forstwirtschaft für die Bevölkerung des Landkreises. Diese Vielfältigkeit des Landkreises Forchheim macht es notwendig, Klimaanpassungsmaßnahmen für ganz verschiedene Handlungsfelder im Landkreis Forchheim zu erarbeiten und bei der Klimaanpassungsstrategie zu berücksichtigen.

1.2 Handlungsfelder

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) definiert in der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS) primäre (Abbildung 1, Kreis) und sekundäre (Abbildung 1, Pfeile) Handlungsfelder (StMUV, 2016).

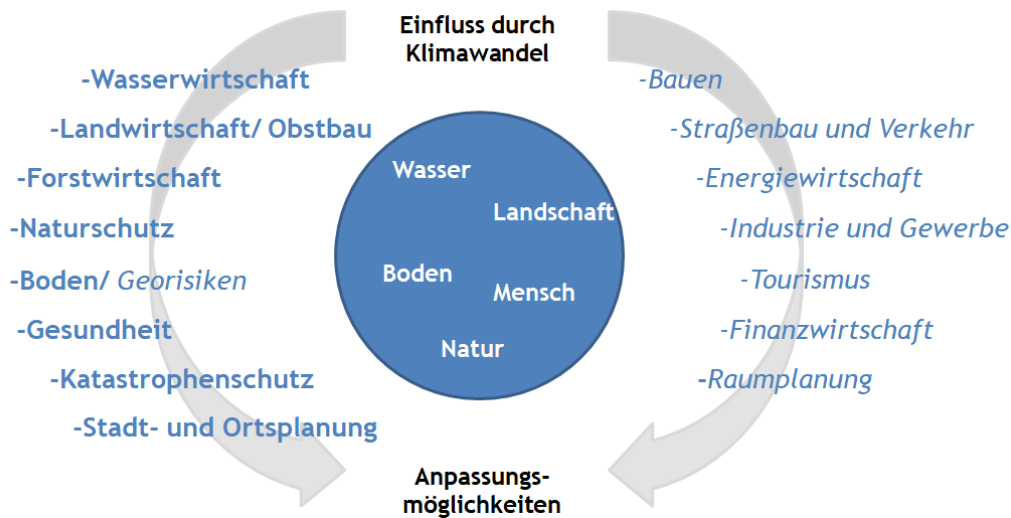


Abbildung 1: Vom Klimawandel betroffene Handlungsfelder (Verändert nach StMUV (2016, S. 26))

Die in dieser Anpassungsstrategie berücksichtigten Handlungsfelder orientieren sich an denen der BayKLAS (StMUV, 2016), umfassen allerdings nur folgende Bereiche: i) Wasserwirtschaft, ii) Landwirtschaft/ Obstbau, iii) Forstwirtschaft, iv) Naturschutz, v) Boden¹, vi) Gesundheit, vii) Katastrophenschutz und viii) Stadt- und Ortsplanung (Abbildung 1, linker Pfeil). Das Auswahlkriterium für diese Handlungsfelder war deren Bezug zum Begriff der *Kulturlandschaft*. Diese Begrifflichkeit war zentraler Bestandteil des Interreg-Projektes STRENCH (<https://www.interreg-central.eu/Content.Node/STRENCH.html>), in dessen Rahmen die Klimaanpassungsstrategie erarbeitet wurde. Die in Abbildung 1 auf dem rechten Pfeil und in kursiv dargestellten Handlungsfelder wurden bei der vorliegenden Klimaanpassungsstrategie nicht berücksichtigt.

1.3 Vorgehen und Fragestellungen

Vulnerabilitätsanalysen sind ein wichtiges Instrument der Anpassungsplanung. Solche Analysen identifizieren Anpassungsbedarfe und liefern die Grundlagen für die Entwicklung von Klimaanpassungsstrategien oder Aktionsplänen mit konkreten Maßnahmen (adelphi, PRC, EURAC, 2015; Parry et al., 2007).

Die Vulnerabilität einer Region gegenüber dem Klimawandel ist davon abhängig, i) wie sich das Klima in der Region ausprägt (*Klimasignal*²), ii) in welchem Maße die Region empfindlich auf definierte Klimasignale reagiert (*Sensitivität*³), iii) wie das Klima in einer Region wirkt (*Klimawirkung*⁴), wie stark betroffen die Region von den Auswirkungen des Klimawandels ist (*Betroffenheit*) und iv) wie groß die Fähigkeit der Region ist, sich dem

¹ Das Handlungsfeld „Boden und Georisiken“ wurde nicht als eigenständiges Handlungsfeld betrachtet. Der Aspekt „Boden und Georisiken“ wurde aber in all jenen Handlungsfeldern berücksichtigt, in denen die Bodenfunktionen von großer Bedeutung sind.

² Das Klimasignal beschreibt die Ausprägung des heutigen Klimas (t_0) bzw. des Klimas in der nahen (t_1) und fernen Zukunft (t_2). Die Differenz des Klimasignals zwischen t_0 und t_1 bzw. t_0 und t_2 ist die Klimaveränderung (adelphi, PRC, EURAC, 2015, S. 37).

³ Die Sensitivität beschreibt, in welchem Maße ein bestehendes nicht-klimatisches System (Sektor, Bevölkerungsgruppe, aber auch biophysikalische Faktoren wie Luftqualität) auf ein definiertes Klimasignal reagiert (adelphi, PRC, EURAC, 2015, S. 38).

⁴ Eine Klimawirkung beschreibt zum Zeitpunkt t_0 die Wirkung des heutigen Klimas auf das heutige System bzw. zum Zeitpunkt t_1 oder t_2 die Wirkung des zukünftigen Klimas auf ein zukünftiges System (adelphi, PRC, EURAC, 2015, S. 38).

Klimawandel anzupassen und potentiellen Schaden/Betroffenheiten zu mindern (*Anpassungskapazität*) (Abbildung 2) (adelphi, PRC, EURAC, 2015; Parry et al., 2007).

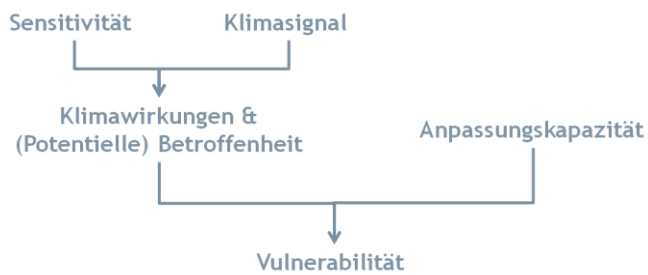


Abbildung 2: Das Vulnerabilitätskonzept (Verändert nach adelphi, PRC, EURAC (2015) und Parry et al. (2007))

Wie in Abbildung 2 einsehbar ist, hat der Landkreis Forchheim das Ziel, die Vulnerabilität des Landkreises gegenüber dem Klimawandel mittels sinnvoller Anpassungsmaßnahmen möglichst gering zu halten. Daher wurden folgende Fragestellungen für die Klimaanpassungsstrategie des Landkreis Forchheim behandelt:

- 1) Welche Klimaänderungen sind im Landkreis Forchheim bereits aufgetreten und welche Klimaänderungen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten?
- 2) Wie empfindlich reagieren verschiedene Handlungsfelder im Landkreis Forchheim gegenüber Klimaänderungen?
- 3) Wie betroffen sind die verschiedenen Handlungsfelder im Landkreis Forchheim gegenüber Klimaänderungen?
- 4) Wie können sich die betroffenen Handlungsfelder an den Klimawandel anpassen?

Die Ermittlung dieser Fragen war eine Querschnittsaufgabe und verlangte die Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen und -behörden sowie die Integration regionaler, praktischer und handlungsfeldspezifischer Expertise (adelphi, PRC, EURAC, 2015).

Zur Beantwortung der Frage 1) wurde eine Analyse zu Klimaänderungen im Landkreis Forchheim durchgeführt. Dabei wurde auf Basis langjähriger Beobachtungen der Vergangenheit untersucht, welche klimatischen Trends und welche Klimaveränderungen im Landkreis Forchheim bereits aufgetreten sind. Daraus sollte geschlussfolgert werden, welche Klimaänderungen wohl auch in Zukunft verstärkt auftreten werden. Die Datengrundlage für die Datenanalyse lieferten verschiedene Fachinstitutionen, wie z.B. der Deutsche Wetterdienst, das Bayerische Landesamt für Umwelt oder das Umweltforschungszentrum Leipzig (zur Übersicht vgl. Anhang Tabelle 2).

Für die Fragen 2) bis 4) wurden praktische und handlungsfeldspezifische Expertinnen und Experten herangezogen. Gemeinsam mit diesen wurden Expertinnen- und Experten-Interviews sowie zwei Workshops abgehalten. Die

Ergebnisse daraus wurden zur Konkretisierung um eine Literaturrecherche ergänzt und sind wesentlicher Bestandteil dieser Klimaanpassungsstrategie.

Das Vorgehen zur Erstellung dieser Klimaanpassungsstrategie orientierte sich am *Klimalotsen* des Umweltbundesamtes, einem Online-Leitfaden zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels für Kommunen. Der Leitfaden unterstützt dabei, die Risiken des Klimawandels abzuschätzen und Chancen gezielt zu verfolgen. Er richtet sich vor allem an Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in Städten und Gemeinden, etwa in Umweltämtern oder in der Stadtplanung. Spezielles Vorwissen zu den Folgen des Klimawandels ist zur Bearbeitung des Klimalotsen nicht notwendig (Haße & Kind, 2019; UBA, 2016). Zwar ist der Klimalotse auf die Stadt- und Kommunalplanung zugeschnitten, doch konnte die allgemeine Herangehensweise auf den Landkreis Forchheim übertragen werden. Im Vergleich zum Klimalotsen liegt der Schwerpunkt dieser Klimaanpassungsstrategie für den Landkreis Forchheim weniger in der Erstellung kommunaler Planungsgrundlagen zur Klimaanpassung, sondern in der Bereitstellung eines breiten Spektrums an zugeschnittenen Klimaanpassungsmaßnahmen für die in dieser Klimaanpassungsstrategie berücksichtigten Handlungsfelder.

2 Klimaveränderungen im Landkreis Forchheim

Aus langjährigen lokalen Wetterbeobachtungen der Vergangenheit lassen sich Trends und Veränderungen wichtiger Klimavariablen ableiten. Das Wissen über diese Trends und Veränderungen kann gemeinsam mit Erkenntnissen aus Klimaprojektionen wichtige Informationen über zukünftige Klimaänderungen liefern und stellt die Grundlage für eine Klimaanpassungsstrategie dar.

Bei der Analyse klimatischer Veränderungen im Landkreis Forchheim wurden 30-jährige Klimaperioden miteinander verglichen. Dabei wurden die Klimaperioden 1971-2000 und 1990-2019 einander gegenübergestellt (Maier, 2020). In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Analyse kurz dargestellt und diskutiert.

Zusammenfassend wird sich der Landkreis Forchheim in der nahen Zukunft vor allem stärkeren und häufigeren Hitzeereignissen, einem höheren Risiko für Frostschäden im Obstbau, häufigerer und stärkerer Trockenheit, häufigeren Niedrigwasserständen im Sommer und möglicherweise einer erhöhten Überflutungsgefahr kleiner Flüsse und Gräben stellen müssen.

2.1 Temperatur

Wie bereits für Europa (Lorenz et al., 2019), Deutschland (UBA, 2019), Bayern (LfU, 2007) und Oberfranken (Foken & Lüers, 2015), wurde auch für den Landkreis Forchheim eine signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperatur beobachtet. Konkret nahm die Jahresmitteltemperatur beim Vergleich der Klimaperioden 1971-2000 und 1990-2019 im Landkreis Forchheim um ca. + 0.7 °C zu (vgl. Abbildung 3), was in etwa mit den beobachteten +0.8 °C des Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) für die Klimaregion „Forchheim-Fürth-Erlangen-Höchstadt-Nürnberg“ (FO-Fü-ERH-N) übereinstimmt (LfU, 2020b).

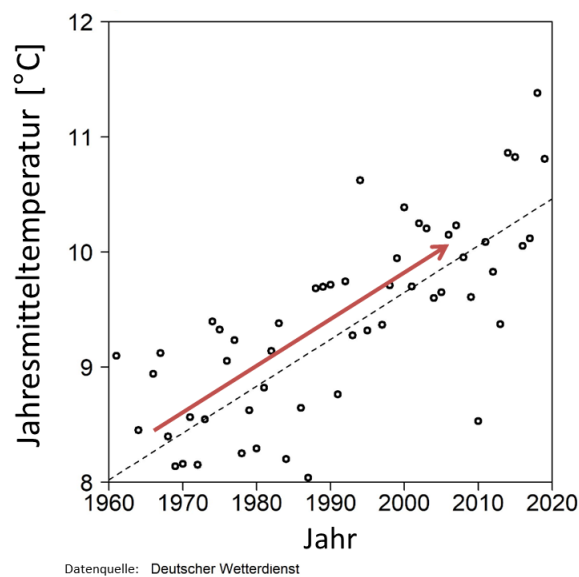


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Jahresmitteltemperatur der Station „Möhrendorf-Kleinseebach“ des Deutschen Wetterdienstes (Verändert nach Maier (2020))

Diese Trends werden sich für den Landkreis Forchheim bei fortschreitender Emission von Treibhausgasen fortsetzen, wie Abbildung 4 anschaulich darstellt.

Die zukünftige Temperaturentwicklung hängt jedoch stark davon ab, wie ambitioniert (globaler) Klimaschutz verfolgt wird. Während Klimaprojektionen, dem Szenario RCP2.6 („Klimaschutzszenario“) folgend, für die Klimaregion FO-Fü-ERH-N ab 2050 keinen weiteren Temperaturanstieg mehr annehmen (das mittlere Modell nimmt dabei einen Temperaturanstieg von ca. +1 °C im Vergleich zur Klimaperiode 1971-2000 an; vgl. *Median RCP2.6* in Abbildung 4, steigt im Szenario RCP8.5 („Szenario ohne Klimaschutz“) die Temperatur kontinuierlich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an. Das mittlere Modell geht beim Szenario RCP8.5 (vgl. *Median RCP8.5* in Abbildung 4 von einer Zunahme der Temperatur um +3.6 °C in der Klimaperiode 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000 für Forchheim aus (LfU, 2020b; Maier, 2020). Vergleicht man zudem die beobachtete Entwicklung des 30-jährigen gleitenden Mittelwerts der Jahresmitteltemperatur der Klimaregion FO-Fü-ERH-N mit den Klimaprognosen für diese Region, so zeigt sich, dass die beobachteten Werte aktuell dem oberen Wertebereich der Klimaprojektionen des Szenarios RCP8.5 („Szenario ohne Klimaschutz“) folgen (vgl. Abbildung 4). Für die Jahreszeiten Frühling und Sommer haben die beobachteten Werte die prognostizierten mittleren Werte des Szenarios RCP2.6 („Klimaschutzszenario“) für die Klimaperiode 2071-2100 bereits überschritten (Maier, 2020).

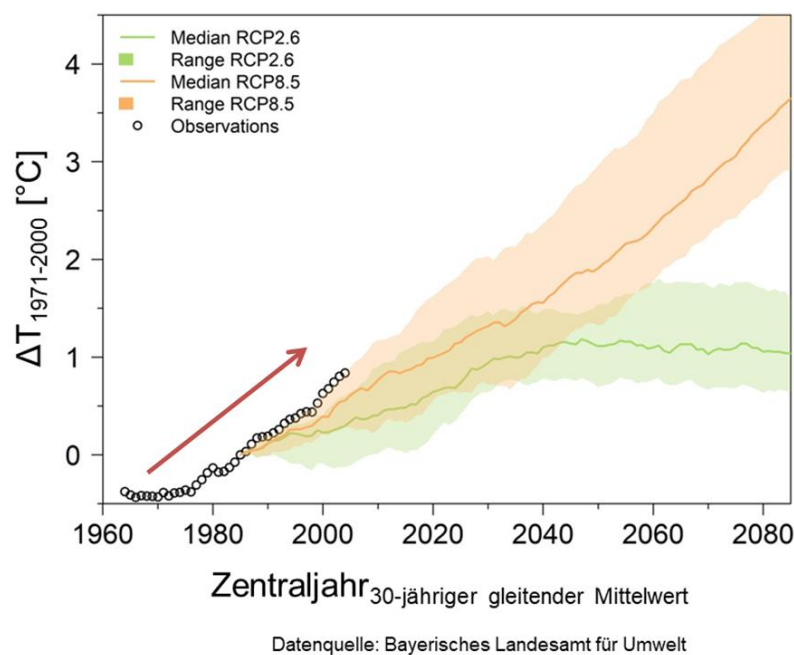


Abbildung 4: Klimaprojektionen (den Szenarien RCP2.6 (grün; „Klimaschutzszenario“) und RCP8.5 (rot; „Szenario ohne Klimaschutz“) folgend) und beobachteter 30-jähriger gleitender Mittelwert der Jahresmitteltemperatur (dargestellt als Abweichung zur Referenzperiode 1971-2000) der Klimaregion "Forchheim-Fürth-Erlangen-Höchststadt-Nürnberg"

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die regionalen Klimamodelle für die Klimaregion FO-Fü-ERH-N den beobachteten Temperaturanstieg aktuell tendenziell unterschätzen. Dieser Befund ist nicht verwunderlich, denn i) das Szenario RCP8.5 bildet die bisherigen globalen CO₂-Emissionen gut ab (Schwalm et al., 2020) und ii) auch andere Studien wie Lorenz et al. (2019) kamen zu dem Ergebnis, dass die regionalen Klimamodelle für Europa EURO-

CORDEX Temperatur-Trends in etwa wiedergeben, heiße Extrema allerdings eher unterschätzen und die Erwärmung kalter Extrema eher überschätzen.

2.2 Hitzetage

Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur hat u.a. zur Folge, dass Temperaturextrema stärker und häufiger auftreten. So hat sich die Anzahl der Hitzetage⁵ in der Klimaregion FO-Fü-ERH-N von 6 (Klimaperiode 1971-2000) auf 11 (Klimaperiode 1990-2019) bereits fast verdoppelt. Klimamodelle, die dem Szenario RCP8.5 folgen, sagen im Mittel eine Verdoppelung der Hitzetage erst für die nahe Zukunft (2021-2050) voraus und unterschätzen somit den tatsächlichen Anstieg der Hitzetage im Raum Forchheim. Für die mittlere (2041-2070) und die ferne Zukunft (2071-2100) prognostiziert das Klimamodell RCP8.5 im Mittel 18 bzw. 31 Hitzetage für die Klimaregion FO-Fü-ERH-N (LfU, 2020b).

2.3 Frosttage

Die Anzahl an Frosttagen nahm im Landkreis Forchheim tendenziell ab, ein früheres oder verringertes Einsetzen später Fröste im Frühjahr konnte allerdings nicht beobachtet werden (Maier, 2020).

2.4 Sonnenscheindauer

Es wurde eine signifikante Zunahme der jährlichen Sonnenscheindauer im Landkreis Forchheim festgestellt, mit besonders starken Zunahmen im Frühjahr und Sommer. Im Vergleich zur Klimaperiode 1971-2000 nahm die mittlere jährliche Sonnenscheindauer in der Klimaperiode 1990-2019 um +107 Stunden zu (vgl. Abbildung 5) (Maier, 2020).

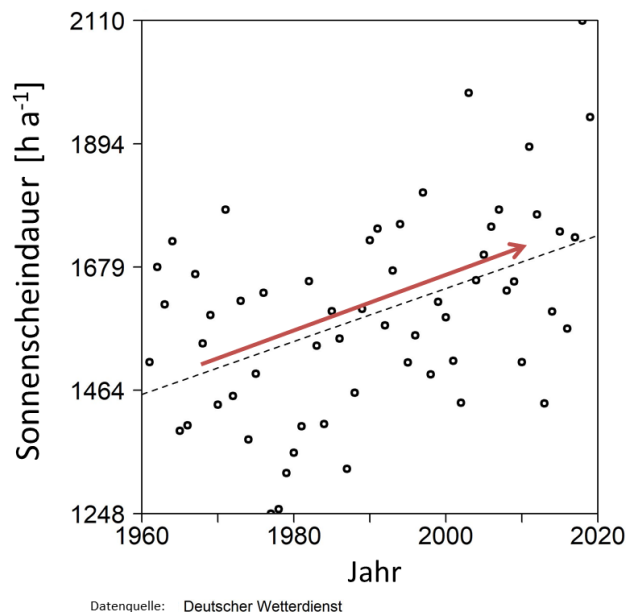


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der jährlichen Sonnenscheindauer an der Station „Möhrendorf-Kleinseebach“ des DWD (Verändert nach Maier (2020))

⁵ Tage, an denen das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C liegt.

Eine Zunahme der Sonnenscheindauer wurde auch europaweit seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts beobachtet und mit der Verstärkung von klimawandelbedingten Temperaturextremen im Sommer in Zusammenhang gebracht (Besselaar et al., 2015).

2.5 Niederschlag

Die Analyse des Niederschlags bedarf neben der Betrachtung des Jahresniederschlags ebenso der Untersuchung der Regenerosivität⁶ und des Starkregens.

2.5.1 Jahresniederschlag

Auch wegen der natürlich hohen Variabilität an Niederschlägen konnten aus den Niederschlagsdaten der Klimastation „Möhrendorf-Kleinseebach“ des DWD keine signifikanten Muster für die Indikatoren „Jahresniederschlag“, „Jahresniederschlag > 20 mm“, „Summe der Tage zwischen zwei Niederschlagsereignissen“ für den Landkreis Forchheim festgestellt werden. Auch Klimaprojektionen der Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 weisen für die Klimaregion FO-Fü-ERH-N keinen eindeutigen bzw. signifikanten Trend auf (Maier, 2020). Es sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass eine zunehmende Trockenheit im Landkreis Forchheim keinen Rückgang der Niederschläge bedarf, sondern auch durch eine verstärkte Evapotranspiration erklärt werden kann (vgl. Abschnitt 2.2). Ausführlichere Untersuchungen zu klimabedingten Veränderungen des Niederschlagsverhaltens in Oberfranken bestätigen, dass es bisher keinen eindeutigen Zu- oder Abnahmetrend in der Zeitreihe der Jahressumme des Niederschlags für die Region gibt (Foken & Lüers, 2015). Allerdings führen diese Untersuchungen eine veränderte jahreszeitliche Verteilung des Niederschlages und eine veränderte Charakteristik der Niederschläge an, mit z.T. signifikant häufig langen Trockenperioden im Frühjahr und Frühsommer, vermehrt kurzen intensiven Regenereignissen im Frühjahr und Sommer sowie einer Zunahme der Niederschläge in Herbst und Winter. Dies bedeutet, dass in Oberfranken trotz eines Anstiegs der monatlichen oder jahreszeitlichen Niederschlagsmenge, aber bei erheblich veränderter Charakteristik des Niederschlagsverhaltens, problematische Wasserverhältnisse während der Vegetationsperiode für Natur- und Kulturlandschaft auftreten können (Foken & Lüers, 2015).

2.5.2 Regenerosivität & Starkregen

Aktuelle Studien zur klimabedingten Veränderung der Regenerosivität in Bayern und Deutschland bestärken die Aussagen von Foken & Lüers (2015). So war die Regenerosivität des Untersuchungszeitraums 2001-2017 in Deutschland im Mittel um 66 % größer als noch in den 1960er bis 1980er Jahren (Auerswald et al., 2020). In Bayern wird sich die Regenerosivität der Klimaperiode 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000 flächendeckend etwa verdoppeln, gegenüber dem Zeitraum vor 1970 wird sie sich sogar verdreifachen, wodurch sich auch die Bodenabträge verdoppeln bzw. verdreifachen werden, sofern keine Gegenmaßnahmen freiwillig implementiert

⁶ Die Fähigkeit von Regenereignissen, Bodenabtrag auszulösen (Auerswald et al., 2020, S. 61).

werden (Auerswald et al., 2020). Von der flächenhaften Wirkung dieses Trends ist auch der Landkreis Forchheim betroffen.

Abbildung 6 stellt den mittleren jährlichen Regenerositäts-Faktor (R-Faktor) für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung dar und zeigt einen orographisch bedingten Gradienten der Erosivität vom westlichen Teil zum östlichen Teil des Landkreises. Die Werte reichen von $\sim 75 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Westen des Landkreises bis $\sim 115 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im östlichen Landkreis (Maier, 2020).

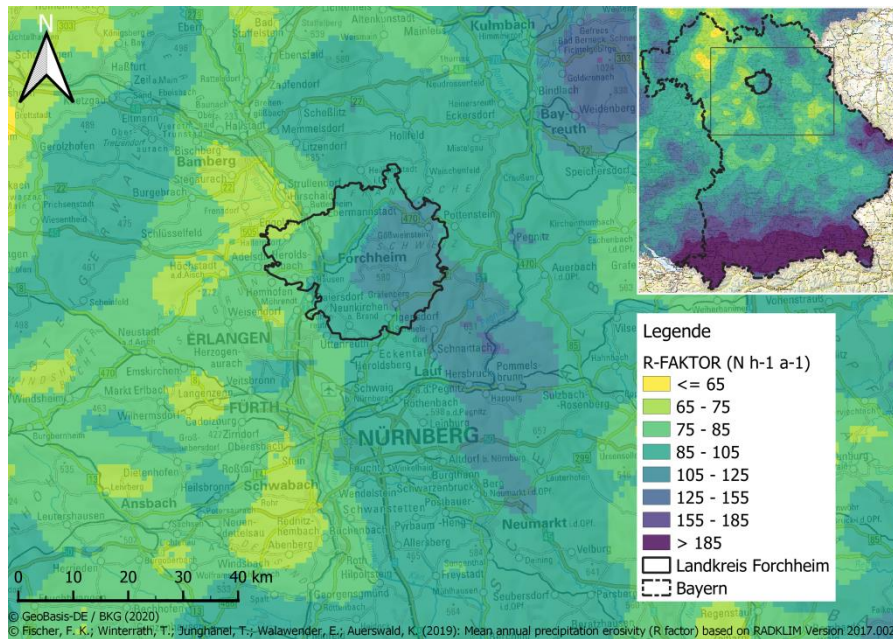


Abbildung 6: Karte des mittleren jährlichen R-Faktors ($\text{N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$) für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung

Die flächenhafte Verdoppelung der Regenerosität seit 1960 zeigt eindrucksvoll, dass der Trend zu stärkeren Extremen im Niederschlagsverhalten klimawandelbedingt zunimmt und auch den Landkreis Forchheim betrifft. Diese Befunde lassen sich auch auf Starkregen übertragen. Starkregenereignisse sind selten, aber natürlich. Es wird davon ausgegangen, dass im Zuge des Klimawandels Starkregenereignisse an Häufigkeit und Intensität zunehmen werden. Starkregen entstehen über lokalen Wolkenbrüchen, weisen kein typisches räumliches Muster auf und sind nirgendwo vermeidbar. Starkregen und daraus folgende Sturzfluten können also nicht nur plötzlich, sondern auch unabhängig von der Topographie auftreten. Es gilt: „Nach der (Sturz-)Flut ist vor der (Sturz-)Flut“ (Seibert & Auerswald, 2020, S. 22 f.).

Für den Landkreis Forchheim werden anhand des KOSTRA-Datensatzes des DWD aktuell Niederschläge mit einer Dauer von einer Stunde und einem Wiederkehrintervall von 20 Jahren mit 36 bis 45 mm/h (vgl. Abbildung 7 links) sowie Niederschläge mit einer Dauer von 24 Stunden bei gleichem Wiederkehrintervall mit 60 bis 80 mm/Tag (vgl. Abbildung 7 rechts) bemessen. Niederschläge von über 100 mm/Tag treten aktuell alle 100 Jahre im Landkreis Forchheim auf (DWD, 2020a; Maier, 2020).

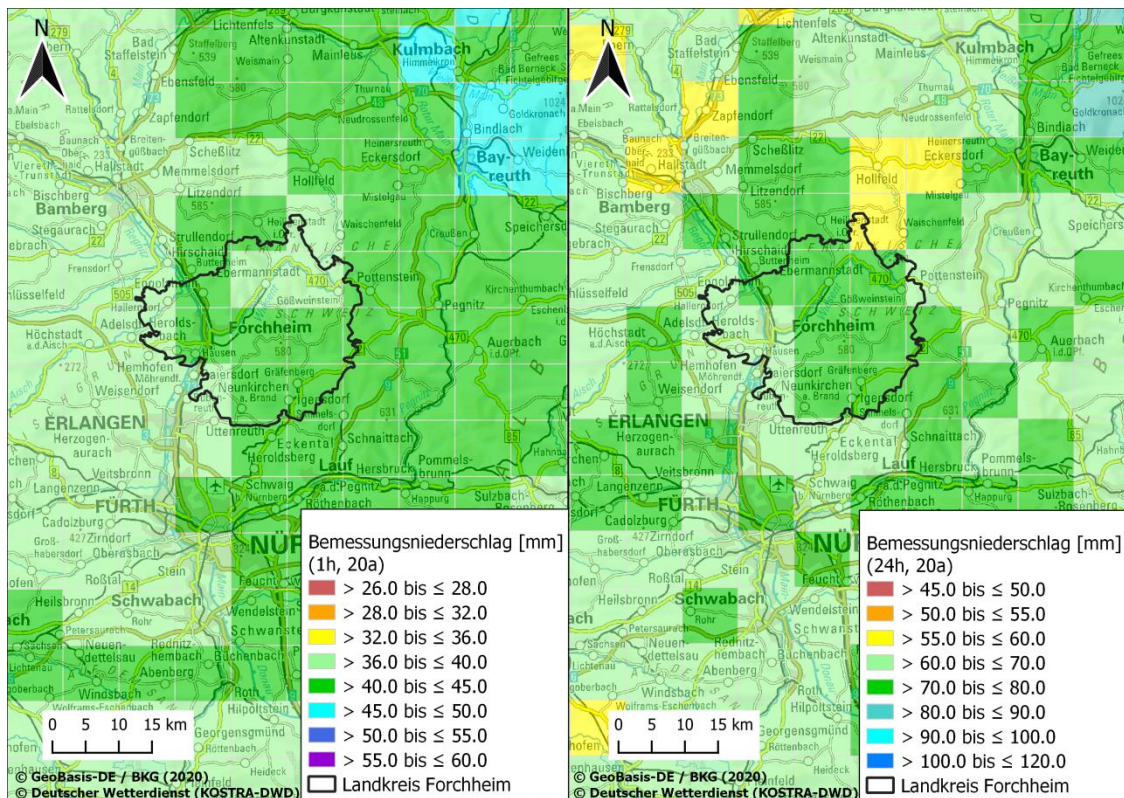


Abbildung 7: Niederschlagsmenge 20-jährlicher, einstündiger Niederschläge (links) und 20-jährlicher, eintägiger Niederschläge (rechts) für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung

2.6 Trockenheit

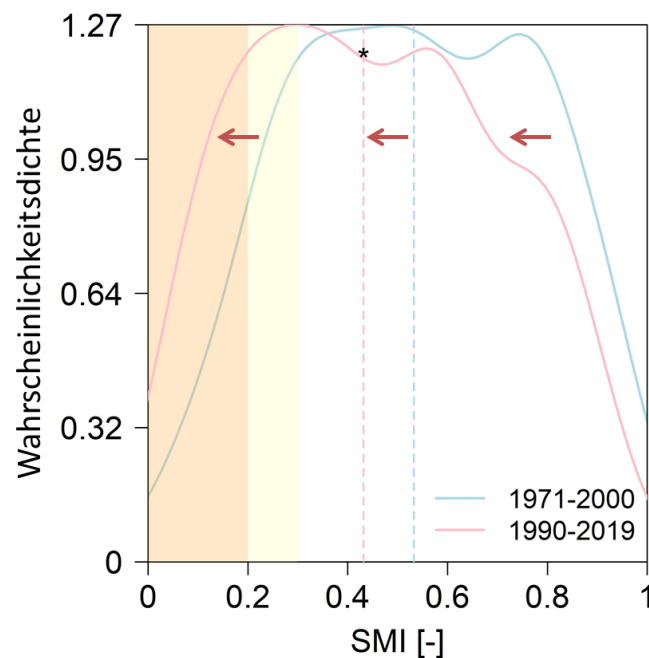
Anhand der Daten des Dürremonitors vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) wurde untersucht, ob sich der Bodenfeuchtezustand im Landkreis Forchheim in der Klimaperiode 1991-2019 im Vergleich zur Periode 1971-2000 verändert hat.

Die Werte des Dürremonitors wurden vom UFZ als dimensionsloser Soil Moisture Index (SMI) zur Verfügung gestellt. Sie geben für einen Standort einen relativen Wert der Bodenfeuchte an, bezogen auf rekonstruierte historische Bodenfeuchtwerte von 1954-2013, und können Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei es umso trockener ist je niedriger der SMI-Wert ist (UFZ, 2020; Zink et al., 2016). So zeigen SMI-Werte des Wertebereichs $0.3 \leq \text{SMI} < 0.2$ „ungewöhnlich trockene Bedingungen“ an, die typischerweise nach oder unmittelbar vor einer „Dürre“ auftreten. Der Wertebereich $0.2 \leq \text{SMI}$ hingegen zeigt eine „Dürre“ an, die je nach Intensität zu Pflanzenschäden und/ oder Ernteausfällen führen kann (Zink et al., 2016).

Die Auswertung der Daten des Dürremonitors für den Landkreis Forchheim zeigte für das meteorologische Sommerhalbjahr⁷ der Klimaperiode 1990-2019 signifikant trockenere Bedingungen im Vergleich zu 1971-2000. Der mittlere SMI-Wert für das Sommerhalbjahr im Landkreis Forchheim verringerte sich von ca. 0.5 (Klimaperiode 1971-2000) auf ca. 0.4 (1990-2019), sowohl für den Gesamt- als auch für den Oberboden (vgl. Abbildung 8). Trockenheit und „Dürre“ nahmen damit im Landkreis Forchheim – einer ohnehin schon trockenen Region – während der

⁷ März bis August.

Vegetationsperiode an Häufigkeit und Intensität zu. Für das Winterhalbjahr wurden keine Veränderungen der Bodenfeuchte festgestellt (Maier, 2020). Gründe für die zunehmende Trockenheit während des Sommerhalbjahres im Landkreis Forchheim und anderen Regionen in Deutschland sind eine erhöhte Evapotranspiration, die sich physikalisch aus dem Anstieg der Sommertemperaturen ergibt, ein z.T. sehr geringer Jahresniederschlag und eine veränderte Niederschlagscharakteristik (Maier, 2020; Thober et al., 2020). Modellierungen zu Trockenheit und Dürre – basierend auf der Methodik des Dürremonitors – geben an, dass Dürren in den kontinentalen Klimaten Europas zukünftig häufiger und auf größerer Fläche auftreten werden, wobei das Ausmaß der Dürre stark vom Grad der globalen Erwärmung abhängt (Samaniego et al., 2018).



Datenquelle: UFZ-Dürremonitor/Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

Abbildung 8: Häufigkeitsverteilungen von SMI-Werten des Gesamtbodens im Sommerhalbjahr für die Klimaperioden 1971-2000 (blau) und 1990-2019 (pink) im Landkreis Forchheim. Das gelbliche Feld bildet den Wertebereich „ungewöhnlich trockener Bedingungen“ ab, während das orange Feld den Wertebereich von „Dürre“ angibt. Das *-Symbol deutet einen signifikanten Unterschied der SMI-Werte der beiden untersuchten Klimaperioden an.

2.7 Fließgewässerabfluss und Grundwasser

Kontinuierliche und zuverlässige Abflussdaten lagen im Landkreis Forchheim für die Flüsse Wiesent, Trubach und Aisch vor. Für diese Flüsse konnten keine signifikanten Unterschiede im Abflussverhalten zwischen den Klimaperioden 1971-2000 und 1990-2019 festgestellt werden. Das gilt für niedrige, mittlere und hohe Abflüsse. Allerdings zeigte sich in den letzten 15 Jahren des Untersuchungszeitraums eine stetige Abnahme mittlerer und niedriger Abflüsse, bis hin zu ungewöhnlich niedrigen Abflüssen der Fließgewässer Wiesent, Aisch und Trubach in den letzten 5 Jahren. Diese Beobachtung wird exemplarisch für den mittleren Abfluss der Wiesent in Abbildung 9 dargestellt.

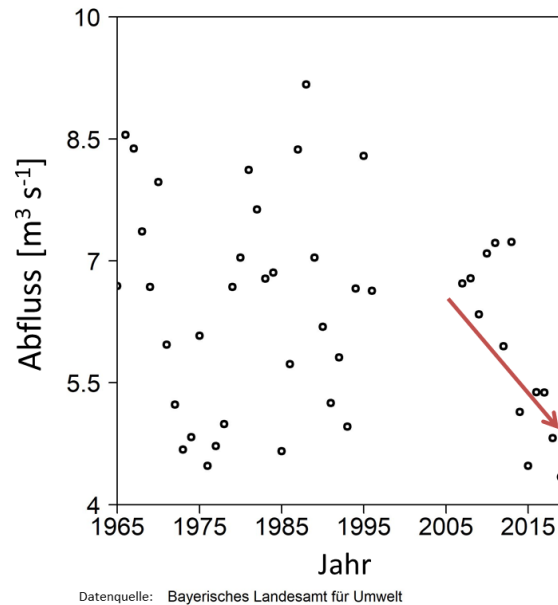


Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung des mittleren Abflusses der Wiesent an der Messstelle Muggendorf (Verändert nach Maier (2020))

Die gleiche Aussage lässt sich für die Grundwassermessstelle „Betzenstein“ treffen. Auch dort konnte kein Langzeit-Trend festgestellt werden, aber hier nahm der Grundwasserstand in den letzten 15 Jahren des Untersuchungszeitraums ebenso stetig ab und erreichte – analog zu den geringen Abflussmengen der Fließgewässer – ungewöhnlich niedrige Stände. Leider lagen für keine weiteren Grundwassermessstellen im Landkreis Forchheim Langzeitdaten zur Analyse vor, weswegen von allgemeinen Aussagen zu Veränderungen der variablen Grundwasserstände im Landkreis Forchheim abgesehen werden muss.

Die Abnahme des mittleren und niedrigen Fließgewässerabflusses sowie der Grundwassermessstände im Landkreis Forchheim kann zu neuen Niedrigwasser-Extremen führen, wenn sich der in den letzten 15 Jahren beobachtete Trend fortsetzt. Modellierungen für Deutschland (Thober et al., 2020) und Europa (Marx et al., 2018) gehen von einer Fortsetzung des Trends aus, wobei der Grad der Erwärmung das Ausmaß des Trends entscheidend beeinflusst.

Eine signifikante Zunahme des Maximalabflusses seit 1960 wurde für die Trubach, nicht aber für die Aisch und die Wiesent festgestellt (Maier, 2020). Die Gründe hierfür können sehr vielfältig sein und reichen von einer veränderten Charakteristik des Niederschlags bis hin zur Ausdehnung von Siedlungsflächen. Die durchgeführte Analyse erlaubt es allerdings nicht, einen konkreten Grund für die Zunahme des Maximalabflusses der Trubach zu benennen. Möglicherweise sind aber kleine Fließgewässer wie die Trubach von intensiveren und erosiveren Niederschlägen stärker betroffen als größere Fließgewässer wie die Wiesent oder Aisch, die aufgrund ihrer großen Einzugsgebiete lokale Starkregenereignisse besser abpuffern können als kleine Fließgewässer oder Gräben (Seibert & Auerswald, 2020, S. 22 f.).

Allgemein wird aber von einer zunehmenden Hochwassergefahr in Süddeutschland ausgegangen. Eine Untersuchung beobachteter Hochwasserdaten naturnaher Gewässer in Europa zeigte für Süddeutschland und West-Tschechien eine signifikante Zunahme des Hochwasserabflusses von 1960 bis 2010, was in Verbindung mit

einer Zunahme der Niederschläge im Herbst und Winter gebracht wird (Blöschl et al., 2019). Modellierungen des Einflusses des zukünftigen Klimawandels auf Hochwasserereignisse konnten für Deutschland und Zentral-Europa allerdings keine signifikanten und robusten Trends feststellen (Thober et al., 2018, 2020). Foken & Lüers (2015, S. 40) gehen für Oberfranken – neben einer weiterhin großen Hochwassergefahr – von unbeständigen, rasch veränderlichen und unter Umständen nicht bis in die Region berechenbaren Wetterabfolgen aus, „die sowohl Trockenheit und Niedrigwasser als auch Hochwasserfluten vermehrt in Richtung Extremereignisse verschieben werden“.

2.8 Phänologie & Spätfrostgefahr

Die Phänologische Station „Wiesenttal-Streitberg“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) stellt seit 1970 Daten zum Blühbeginn von Apfel- und Kirschbäumen zur Verfügung. Die Analyse dieser Daten ergab, dass sich der Blühbeginn dieser Obstkulturen im Landkreis Forchheim in der Klimaperiode 1971-2000 im Vergleich zur Klimaperiode 1990-2019 durch den Klimawandel im Mittel signifikant um 10 Tage (Apfel; vgl. Abbildung 10) und 6 Tage (Kirsche) verfrühte (Maier, 2020). Die Ergebnisse für den Landkreis Forchheim stimmen gut mit den Trends umfangreicher Analysen europaweiter phänologischer Daten überein, die besonders signifikant für früh im Frühjahr blühende Pflanzenarten sind (Menzel et al., 2020).

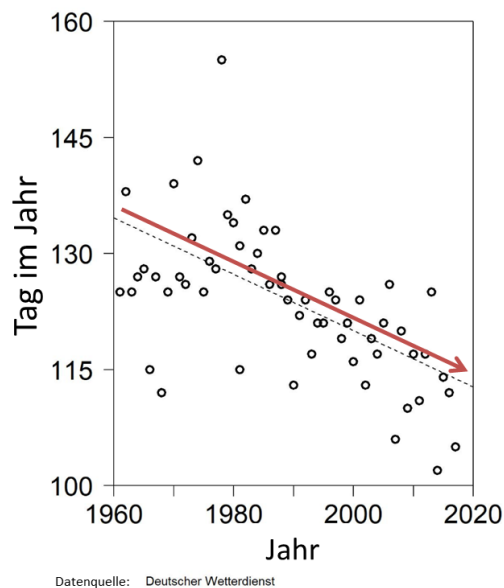


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung des Blühbeginns von Apfelbäumen an der phänologischen Station „Wiesenttal-Streitberg“ des DWD (Verändert nach Maier (2020))

Wegen der erkennbar früher einsetzenden Vegetation bei gleichzeitig nur kaum bzw. lediglich geringfügig früher auftretenden Spätfrösten (vgl. Abschnitt 2.3), kann das Schadpotential von Spätfrösten im Landkreis Forchheim klimawandelbedingt zunehmen. Auch wenn aus den in den Abschnitten 2.3 und 2.6 aufgeführten Ergebnissen an sich keine unmittelbaren Rückschlüsse auf eine Zu- oder Abnahme der Spätfrostgefahr im Landkreis Forchheim geschlossen werden können, so gehen einige Untersuchungen trotz Klimaerwärmung von einer gleichbleibenden

bzw. zunehmenden Spätfrostgefahr in Deutschland und Europa aus (Ma et al., 2019; Pfeleiderer et al., 2019; Unterberger et al., 2018; Zohner et al., 2020).

2.9 Sturm und Hagel

Die Datenlage zu Sturm- und Hagelereignissen im Landkreis Forchheim war ungenügend und ließ keine aussagekräftige Analyse zu. Es wird davon ausgegangen, dass die Häufigkeit und Schwere von Sturm- und Hagelereignissen, die meist sehr regional auftreten, durch den Klimawandel in Deutschland mindestens gleich bleibt, für manche Regionen jedoch signifikant zunehmen wird (Donat et al., 2011; Hoeppe, 2016; Mohr et al., 2015). Seit 1979 haben sich in Süddeutschland – der Alpenraum bleibt hier unberücksichtigt – die Anzahl von Sturm- ($\geq 25 \text{ m s}^{-1}$) und Hagelereignissen ($\geq 2 \text{ cm}$) nicht gehäuft (Rädler et al., 2018).

3 Betroffenheit

Zur Ermittlung der Betroffenheit wurde ein standardisierter Fragebogen mit offenen Fragen für persönliche Interviews mit Akteurinnen und Akteuren aus den verschiedenen Handlungsfeldern erstellt. Die Fragen des Fragebogens bauten auf den Ergebnissen der Analyse zu Klimaänderungen im Landkreis Forchheim (Maier, 2020) auf. Die Interviews wurden nach Schlagworten analysiert, die mittels Diagrammen visualisiert wurden. Zur Qualitätskontrolle wurde im Anschluss an die Schlagwortanalyse eine Literaturrecherche durchgeführt, welche die Aussagen der Befragten auf deren Wahrheitsgehalt überprüfte.

Die Aussagen aller Befragten wurden als fundiert und wahrheitsgemäß eingestuft. Die Literaturrecherche zur Qualitätskontrolle konnte alle Aussagen bestätigen und bekräftigen. Die folgenden Abbildungen und Texte basieren überwiegend auf den Aussagen der Interviews (H. Greif et al., persönliche Kommunikation, 2020). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde bei der Quellenangabe nur jene Literatur gelistet, welche die Aussagen der Befragten unterstützt.

Genauso wie klimatische Systeme, unterliegen *Sensitivität* und *Betroffenheit* gegenüber Klimaänderungen einer zeitlichen Dynamik und können für die Gegenwart, die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) betrachtet werden (adelphi, PRC, EURAC, 2015). Unter der Annahme, dass sich die im Landkreis Forchheim aufgetretenen Klimaänderungen (Maier, 2020) in den nächsten Jahrzehnten fortsetzen werden, sind die Ergebnisse der Studie zur Sensitivität und Betroffenheit auf die Gegenwart und die nahe Zukunft übertragbar.

3.1 Zunahme von Temperatur und Trockenheit

Abbildung 11 zeigt welche Klimawirkungen sich im Landkreis Forchheim durch die Klimasignale „steigende Temperaturen“ und „stärkere Trockenheit“ in den Handlungsfeldern der Befragten bereits ergeben haben und sich womöglich in der nahen Zukunft entwickeln werden.

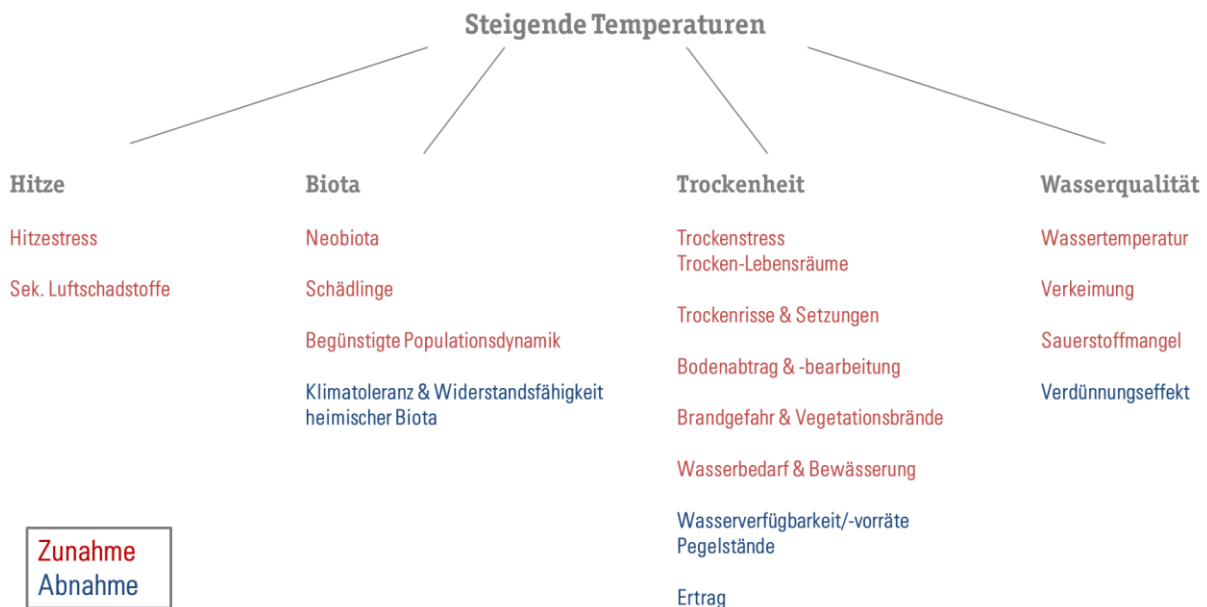


Abbildung 11: Klimawirkungen, die sich aus i) steigenden Temperaturen und ii) zunehmender Trockenheit für den Landkreis Forchheim ergeben würden. In **grau** dargestellt sind die Hauptkategorien der Schlagwortanalyse, während in **rot** (\triangleq Zunahme durch Klimaänderungen) und **blau** (\triangleq Abnahme durch Klimaänderungen) die Unterkategorien dargestellt sind.

3.1.1 Hitze

Hitzeereignisse und -perioden stellen für nicht-angepasste Organismen ein Klimarisiko dar, da deren Temperaturoptimum überschritten wird und so z.B. das körperliche Wohlbefinden von Säugetieren oder die Photosyntheserate von Pflanzen vermindert werden können (Onyekachi et al., 2019; UBA, 2019, S. 30 ff.; Weigel, 2011). Außerdem fördern Hitzeperioden die Bildung sekundärer Luftschadstoffe wie bodennahes Ozon (UBA, 2019, S. 30 ff.) und erhöhen die Brandgefahr (Holsten et al., 2013; Seager et al., 2015).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders von Hitze betroffene Handlungsfelder:

- **Obstbau**
 - Hitzestress von wenig hitzetoleranten Kulturen
 - Einstellung der Photosynthese, Abwerfen von Früchten und Blättern
- **Landwirtschaft**
 - Hitzestress, Einstellung der Photosynthese (v.a. bei C3-Pflanzen⁸)

⁸ „C3-Pflanzen betreiben unter normalen Temperatur- und Lichtverhältnissen Photosynthese. Bei heißem und trockenem Wetter schließen sich die Spaltöffnungen, wodurch die Photosyntheseleistung sinkt. [...] Der überwiegende Teil höherer Pflanzen gehört zu den C3-Pflanzen“ (BMBF o.J.).

- Tierhaltung
- **Forstwirtschaft**
 - Hitzestress
 - Schädigung von wenig hitzetoleranten Baumarten (z.B. Kiefer, Lärche)
- **Gesundheit**
 - gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Flüssigkeits- und Elektrolytverluste und Belastung des Herz-Kreislaufsystems, was z.B. zu Hitzeschlag führen kann
 - zusätzliche Beeinträchtigungen durch sekundäre Luftschadstoffe
- **Katastrophenschutz**
 - Dehydrierung von Einsatzkräften, Hitzeschlag
 - erhöhte Brandgefahr

3.1.2 Biota

Die Klimatoleranz vieler heimischer Biota und angebaute Kulturen ist auf das aktuelle Klima im Landkreis Forchheim zugeschnitten. Nehmen nun Temperaturen und Trockenheit durch die Klimaveränderung zu, verschiebt sich das Klima für viele dieser heimischen Lebewesen hin zu ungünstigeren Bedingungen (Forster et al., 2019). Das kann die Widerstandsfähigkeit gegen abiotische und biotische Stressfaktoren, wie z.B. Parasitismus oder Hitzestress, verringern (Onyekachi et al., 2019; Petercord et al., 2009). So zeichnet sich beispielsweise ab, dass nicht nur bei der besonders stark vom Klimawandel betroffenen Fichte, sondern auch bei der Rotbuche mit gravierenden Schäden durch die Klimaänderung zu rechnen ist (adelphi, PRC, EURAC, 2015, S. 263 f.; UBA, 2019, S. 111 f.). Hitze- und trockenheitstolerante Arten werden jedoch profitieren.

Durch die neuen klimatischen Bedingungen können sich nun auch Arten im Landkreis Forchheim etablieren, denen es bisher zu kühl oder zu nass war (Ceglar et al., 2019). Unter diesen Neobiota können auch Schädlinge oder invasive Arten sein, die den Menschen und/ oder seine Aktivitäten beeinträchtigen. Außerdem kann der Temperaturanstieg die Populationsdynamik einiger Artengruppen begünstigen, indem er nun häufigere Reproduktionszyklen dieser Artengruppen im Vergleich zum vorherigen Klima ermöglicht (Goodsman et al., 2018; UBA, 2019; VLK, 2019; Weigel, 2011).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

- **Wasserwirtschaft**
 - verstärkte Vermehrung von Keimen/ Mikroorganismen im Trinkwasser/ im Gewässer
 - Beeinträchtigung (heimischer) aquatischer Organismen durch geringeres Wasserdargebot und verringerte Gewässerqualität
- **Obstbau**
 - neues und verstärktes Auftreten von Schädlingen

- **Landwirtschaft**
 - neues und verstärktes Auftreten von Schädlingen
- **Forstwirtschaft**
 - neues und verstärktes Auftreten von Schädlingen
 - erhöhtes Schadpotential durch reduzierte Widerstandsfähigkeit der Bäume wegen zusätzlichen Stressfaktoren wie Hitze und Trockenheit
- **Naturschutz**
 - geringe Klimatoleranz bestimmter heimischer Arten, v.a. an Feuchtbiootope angepasste Arten wie Amphibien
 - Auftreten invasiver Arten
- **Gesundheit**
 - Neobiota als potentielle Überträger vektorgestützter Krankheiten
 - (Neo-)Biota mit (hoch-)allergenen Pollen

3.1.3 Trockenheit

Stärkere Trockenheit wirkt sich u.a. auf die Hydrosphäre, die Biosphäre und die Pedosphäre aus. Die Trockenheit reduziert v.a. die Wasserverfügbarkeit in den Böden und führt zu niedrigeren Pegelständen sowie geringeren Wasservorräten (LfU, 2020c; Thober et al., 2020). Dies begünstigt zwar Trockenlebensräume und trockenheitstolerante Arten, erhöht jedoch auch den Trockenstress vieler etablierter und kultivierter Arten (Onyekachi et al., 2019; Zimmermann et al., 2020). Für viele landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzte Kulturen ist die Wasserverfügbarkeit bzw. die Trockenheit der ertragslimitierende Faktor, weswegen in Trockenjahren Erträge in der Landwirtschaft zurückgingen und Kalamitäten, verfrühter Laubfall sowie Mortalität von Einzelbäumen in der Forstwirtschaft zunahm (Thober et al., 2020; Zimmermann et al., 2020). So verzeichnete beispielsweise der Forstbetrieb Forchheim im sehr trockenen Jahr vom 01.07.2019 bis 30.06.2020 über 146.000 m³ kalamitätsbedingtes Schadholz, davon allein über 100.000 m³ Fichten-, 34.000 m³ Kiefer- und 11.000 m³ Buchenholz (Forstbetrieb Forchheim, 2020).

Wegen der verringerten Wasseraufnahmefähigkeit trockener Böden führen Niederschläge, die nach einer Trockenperiode fallen, zu einem erhöhten Risiko für Bodenabtrag und Oberflächenabfluss (LfU, 2020c; Seibert & Auerswald, 2020). Des Weiteren erschweren trockene Böden die Bodenbearbeitung und erhöhen die Abnutzung von Bodenbearbeitungsgeräten in der Landwirtschaft. Außerdem setzen Spannungen und Senkungen im Boden ein, die z.B. Gebäude, Bodendenkmäler und Rohrleitungen beschädigen können (Rohn & Mälzer, 2010; Wuest et al., 2011). Zudem erhöht der geringere Wassergehalt der Vegetation während Trocken- und Hitzeperioden die Brandgefahr (Holsten et al., 2013; Seager et al., 2015; UBA, 2019, S. 122 f.; Wang et al., 2015).

Wegen der heißeren Sommer mit häufiger auftretenden Hitzewellen und Trockenheit im Landkreis Forchheim wird zudem ein erhöhter Wasserbedarf für verschiedene Handlungsfelder angenommen. Ein erhöhter

Trinkwasserverbrauch als Reaktion auf Hitze und verstärkte Bewässerung in der Landwirtschaft, im Obstbau, aber auch in den privaten Gärten wird vermutet (UBA, 2019, S. 67, 83). Trotz der zunehmenden Trockenheit im Landkreis Forchheim wurde in den Interviews aber betont, dass es sehr unwahrscheinlich sei, dass es in der nahen Zukunft zu Engpässen in der Trinkwasserversorgung kommen würde. Nichtsdestotrotz können die zunehmende Trockenheit und die geringeren Wasservorräte zu Nutzungskonflikten um die Ressource Wasser führen.

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders von Trockenheit betroffene Handlungsfelder:

- **Wasserwirtschaft**
 - Niedrigwasser kann die Gewässernutzung, wie z.B. die Entnahme von Wasser zur Bewässerung oder den Betrieb von Wasserkraftanlagen, aber auch die (Mischwasser-)Kanalisation, beispielsweise durch Kanalablagerungen, beeinträchtigen.
 - geringere Wasservorräte zur Gewährleistung der Wasserversorgung
 - Rohrbrüche durch Senkungen bzw. Spannungen im Boden
- **Obstbau**
 - Trockenstress für Obstkulturen, Vertrocknung
 - Ertragseinbußen
 - erhöhter Wasserbedarf während Trockenperioden
- **Landwirtschaft**
 - Trockenstress für die angebauten Kulturen, reduzierte Widerstandsfähigkeit
 - Hauptursache für Ertragseinbußen/ Ertragsschwankungen
 - erschwerte Bodenbearbeitung
 - erhöhter Wasserbedarf, insbesondere für Spezialkulturen
- **Forstwirtschaft**
 - Trockenstress für viele Baumarten mit vielfältigen Konsequenzen wie Blattabwurf, geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber Stress, erhöhte Ausfälle von gepflanzten Kulturen, ...
 - Vertrocknung von Bäumen
- **Naturschutz**
 - Austrocknen von Feuchtbiotopen
 - Artenwandel: Verliererinnen sind an Feuchtstandorte angepasste Arten wie Amphibien
 - erhöhter Wasserbedarf zum Erhalt gefährdeter Feuchtbiotope
- **Katastrophenschutz**
 - erhöhte Brandgefahr
 - verminderte Löschwasservorräte
 - erhöhter Löschwasserbedarf

3.1.4 Wasserqualität

Steigende Temperaturen führen dazu, dass sich Gewässer und Wasser in Rohrleitungen erwärmen können. Dies begünstigt das Wachstum von unerwünschten (Mikro-)Organismen und reduziert den Sauerstoffgehalt im Wasser. Wärmere Gewässer mit weniger Sauerstoff können bei aquatischen Organismen, wie z.B. Fischen⁹, Stress erzeugen und die Flussökologie sowie die Ökologie von Seen und Teichen verändern (IGB, 2018; LfU, 2020c; Woolway et al., 2021)

Aufgrund von niedrigeren Pegelständen und geringeren Wasservorräten kann sich der Verdünnungseffekt in Gewässern reduzieren. Dies bedeutet, dass weniger Wasser für die gleiche Menge an Abwasser bzw. Stoffeinträgen zur Verfügung steht, sodass sich die Wasserqualität verschlechtern kann (LfU, 2020c; UBA, 2019, S. 54).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

- **Wasserwirtschaft**
 - Verschlechterung der Wasserqualität durch i) Zunahme der Wassertemperatur, ii) geringeren Sauerstoffgehalt, iii) erhöhtes Risiko für Verkeimung und iv) einen reduzierten Verdünnungseffekt von Fließgewässern aufgrund niedrigerer Abflüsse. Dadurch können Bewirtschaftungsziele für die Gewässerqualität nach der Wasserrahmenrichtlinie gefährdet bzw. nicht erreicht und die Fischerei beeinträchtigt werden.
 - Abwasser als potentielle Quelle für Gewässerverunreinigungen
 - Beeinträchtigung der Fischerei
- **Landwirtschaft**
 - wichtige Quelle für diffuse Stoffeinträge in Oberflächengewässern und Grundwasser
- **Naturschutz**
 - Verschieben von Flusszonen (Forellenregion → Äschenregion) durch Anstieg der Gewässertemperatur
 - Algenbildung/ Teppichbildung des flutenden Hahnenfuß

Bei den Interviews mit Akteurinnen und Akteuren der Handlungsfelder **Obstbau** und **Landwirtschaft** fielen keine Schlagworte zur Kategorie „Wasserqualität“, weswegen Belange der Wasserqualität für diese Handlungsfelder als *nicht/ gering vorhanden* angenommen werden. Nichtsdestotrotz ist bei der Bewässerung, insbesondere bei der Verwendung aufbereiteter Abwässer oder bei Wasser aus Fließgewässern, auf die Wasserqualität zu achten (Pfleger, 2009).

⁹ Lokales Beispiel: <https://www.nordbayern.de/region/hoechstadt/die-fische-schnappen-nach-luft-1.4586564?rssPage=SMO2Y2hzdGFkdA>.

3.2 Sonnenschein

Abbildung 12 stellt dar, welche Klimawirkungen sich für die berücksichtigten Handlungsfelder durch das Klimasignal „mehr Sonnenschein“ ergeben.

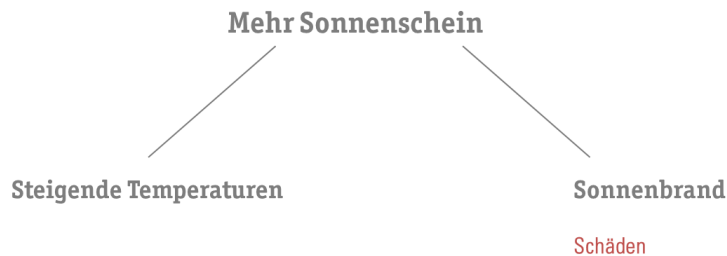


Abbildung 12: Klimawirkungen, die sich aus einer zunehmenden Sonnenscheindauer für den Landkreis Forchheim ergeben würden. In **grau** dargestellt sind die Hauptkategorien der Schlagwortanalyse, während in **rot** ($\hat{=}$ Zunahme durch Klimaänderungen) und **blau** ($\hat{=}$ Abnahme durch Klimaänderungen) die Unterkategorien dargestellt sind.

Eine Zunahme der jährlichen Sonnenscheindauer kann den klimawandelbedingten Temperaturanstieg verstärken und ein häufigeres Auftreten von Sonnenbränden bei Menschen und Pflanzen bewirken. Die Auswirkungen von steigenden Temperaturen werden im vorherigen Kapitel 3.1 detailliert beschrieben.

Sonnenbrand beeinträchtigt sowohl die menschliche Gesundheit als auch die Ernte und Vermarktbarkeit von Getreide und Obst sowie das Wachstum v.a. junger Bäume (BMEL, 2020; LfL, 2018; Wiebusch, 2019; Zimmermann et al., 2020). Die Aktualität von Sonnenbränden im Obstbau wird im aktuellen (Stand 2020) Erntebericht des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) verdeutlicht, der erhebliche Ernteeinbußen im Obstbau durch Sonnenbrand aufzeigt (BMEL, 2020).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

- **Obstbau**
 - Schäden am Obst und an den Obstkulturen
 - Verringerung der Erntequalität
- **Landwirtschaft**
 - Schäden an angebauten Kulturen
- **Forstwirtschaft**
 - Schäden an jungen und dünnborkigen Bäumen
- **Gesundheit**
 - Hautschäden, die zu Hautkrebs führen können

3.3 Längere Vegetationsperiode und Frostereignisse

Wärmere Temperaturen und seltenere Frostereignisse bewirken eine Verlängerung der Vegetationsperiode, nehmen aber Spätfrostereignisse nicht aus (Abbildung 13).

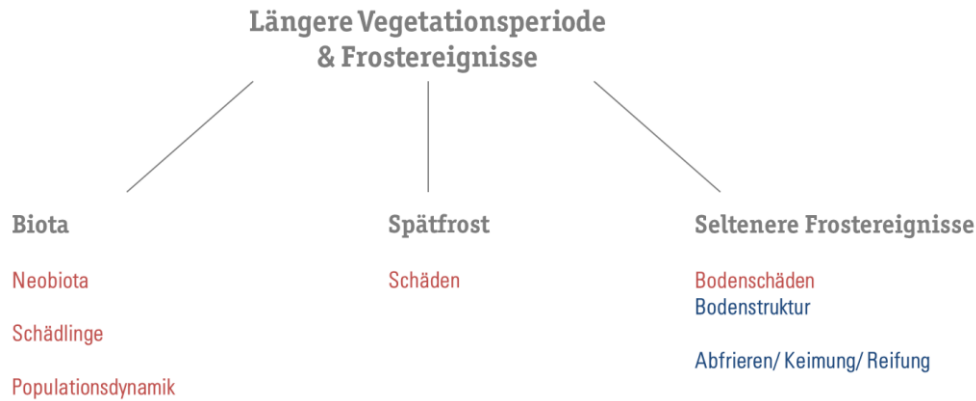


Abbildung 13: Klimawirkungen, die sich aus i) einer verlängerten Vegetationsperiode und ii) einem veränderten Auftreten von Frostereignissen für den Landkreis Forchheim ergeben würden. In **grau** dargestellt sind die Hauptkategorien der Schlagwortanalyse, während in **rot** ($\hat{=}$ Zunahme durch Klimaänderungen) und **blau** ($\hat{=}$ Abnahme durch Klimaänderungen) die Unterkategorien dargestellt sind.

3.3.1 Biota und seltenerere Frostereignisse

Von den Klimasignalen „verlängerte Vegetationsperiode“ sowie „seltenerere Frostereignisse“ können einige Neobiota und Schädlinge, welche die längere Vegetationsphase besonders gut ausnutzen können, profitieren. Beispiele sind die hochallergene Pflanze Ambrosia, aber auch Unkräuter und Schadinsekten (Inouye, 2000; Petercord et al., 2009; UBA, 2019; VLK, 2019). Weitere Auswirkungen von Biota auf die berücksichtigten Handlungsfelder werden im Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

Außerdem prägt sich durch seltenerere Frostereignisse die Frostgare¹⁰ von Böden möglicherweise nicht (so stark) aus, was bei einer unvorsichtigen Bodenbearbeitung im Frühjahr zu negativen Einflüssen auf die Bodenstruktur bzw. zu Bodenschäden führen kann (Inouye, 2000; VLK, 2019).

Ein weiteres Problem seltenerer Frostereignisse kann sein, dass in der Landwirtschaft Zwischenfrüchte und z.B. Kartoffeln nicht mehr abfrieren und im Frühjahr mittels Pestiziden oder aufwändigem Maschineneinsatz bearbeitet werden müssen. Auch die Keimung und Vernalisation¹¹ heimischer Pflanzen bzw. angebauter Kulturen können durch milde Winter beeinträchtigt werden (Henke & Trieschmann, 2020; Weigel, 2011).

¹⁰ „Als Frostgare wird ein poröser, auf die gefügelockernde Ausdehnungskraft des Eises zurückzuführender Bodenzustand bezeichnet. [...] Eine Frostgare bleibt nach dem Tauen nur dann erhalten, wenn Auftau- und Regenwasser rasch abfließen können. Auch ein zu frühes Befahren mit landwirtschaftlichem Gerät kann die Frostgare schädigen. Die Frostgare verbessert gerade bei schweren Böden die Sauerstoff- und Wasserversorgung. Da Kulturpflanzen positiv auf die zusätzliche Bodendurchlüftung [aufgrund der Frostgare] reagieren, ist eine Ertragssteigerung nach intensiver Frostgarebildung anzunehmen“ (DWD o.J.).

¹¹ Unter Vernalisation versteht man die „spezifische Förderung der Blütenbildung einer Pflanze durch eine mehr oder minder lange Kälteperiode [...] im Temperaturbereich von ca. -2 bis + 5 °C“ (Spektrum 1999).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

- **Landwirtschaft**
 - Schädlinge (→ Biota)
 - Beeinträchtigung der Bodenstruktur durch eine fehlende bzw. weniger stark ausgeprägte Frostgare
 - erschwerter Pflanzenbau
- **Forstwirtschaft**
 - Schädlinge (→ Biota)
 - Beeinträchtigung der Bodenstruktur durch Befahren der Waldböden bei fehlendem Frost
 - erschwerte Holzernte im Winter aufgrund wassergesättigter Böden
- **Naturschutz**
 - Unterbrechen der Winterruhe von z.B. Amphibien, dann aber kein Nahrungsangebot
 - Neobiota (→ Biota)
- **Gesundheit**
 - Übertragung vektorgebundener Krankheiten (→ Biota)
 - Beeinträchtigung von Allergikern durch ein erhöhtes und verfrühtes Pollenangebot

3.3.2 Spätfrost

Trotz der abnehmenden Anzahl an jährlichen Frostereignissen, nimmt das Schadpotential von Spätfrösten nicht ab, es steigt sogar eher an. Während die Vegetation immer früher einsetzt, treten Spätfröste im Landkreis Forchheim nicht früher auf (Maier, 2020). Im Obstbau, beim Getreideanbau und in der Forstwirtschaft wurden in den letzten Jahren heftige Spätfrostschäden beobachtet, wie z.B. an der Wintergerste, an Kirschen oder an Baumtrieben (BMEL, 2020; Dimke, 2015; UBA, 2019, S. 93; Weigel, 2011).

Außerdem treten bei (Stadt-)Bäumen Schäden an Holz und Rinde auf, welche vor allem durch extreme Temperaturamplituden innerhalb eines Tages entstehen (Dimke, 2015; Hinrichs-Berger, 2004).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

- **Obstbau**
 - Spätfrostschäden
 - Ertragseinbußen
- **Landwirtschaft**
 - Spätfrostschäden
 - Ertragseinbußen
- **Forstwirtschaft**
 - Spätfrostschäden, v.a. an der Verjüngung

3.4 Niederschlagsintensität

Die Klimasignale „Intensität und Erosivität von Niederschlägen“ werden durch den Klimawandel zunehmen (Auerswald et al., 2019, 2020), was Sach- und Personenschäden, die Beeinträchtigung der Gewässerqualität und verstärkte Trockenheit bewirken kann (Abbildung 14).

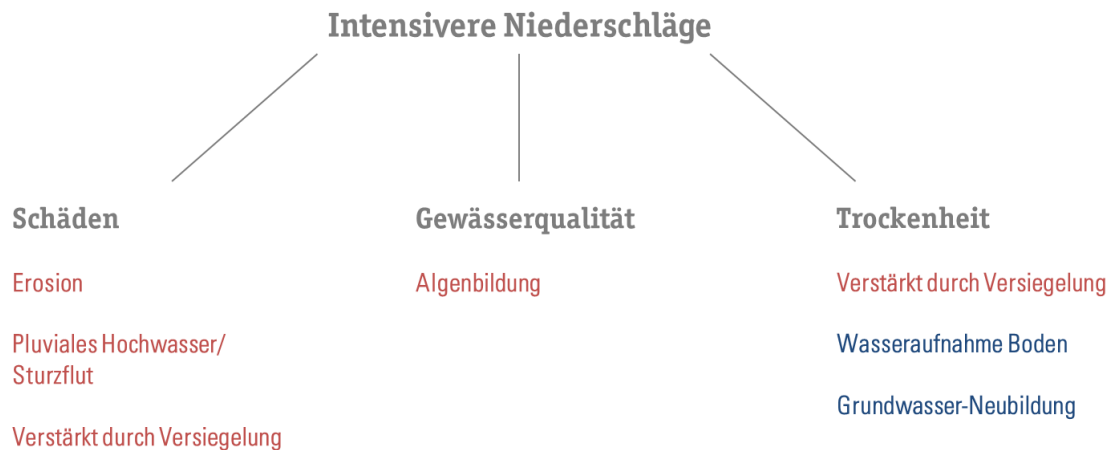


Abbildung 14: Klimawirkungen, die sich aus intensiveren Niederschlägen für den Landkreis Forchheim ergeben würden. In **grau** dargestellt sind die Hauptkategorien der Schlagwortanalyse, während in **rot** (\triangleq Zunahme durch Klimaänderungen) und **blau** (\triangleq Abnahme durch Klimaänderungen) die Unterkategorien dargestellt sind.

3.4.1 Schäden und Gewässerqualität

Durch das Auftreten intensiverer und erosiverer Niederschläge nimmt weniger die Anzahl und Magnitude von Flusshochwässern zu, sondern viel mehr das Auftreten von lokalen Sturzfluten, die lokal große Schäden, wie z.B. überflutete und verschlammte Keller, verursachen können. Dabei fließt das Niederschlagswasser häufig oberflächlich dem Gefälle folgend über den Landweg ab. Es entstehen somit Schäden vor allem aus der Zerstörung von wichtiger Infrastruktur und Siedlungsbereichen, die sich in oder entlang der Abflusspfade befinden. Verstärkt wird dieser Schadeffekt durch einen hohen Versiegelungsgrad, da dieser den Oberflächenabfluss sowie die Abflussgeschwindigkeit erhöht (Seibert & Auerswald, 2020).

Neben dem hohen Schadpotential für wichtige Infrastruktur, erhöhen intensivere und erosivere Niederschläge das Risiko für Erosion und Verschlammung der Bodenoberfläche. Durch die Verlagerung nährstoffreicher Bodenpartikel in Gewässern kann zudem die Gewässerqualität und die Gewässerstruktur stark beeinträchtigt werden, wie im Landkreis Forchheim am Beispiel der Wiesent beobachtet werden kann¹² (Auerswald et al., 2020; Seibert & Auerswald, 2020).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

¹² Lokales Beispiel: <https://www.nordbayern.de/region/forchheim/wiesent-und-co-wie-lassen-sich-flusse-besser-schutzen-1.8147337>.

- **Wasserwirtschaft**
 - Rolle Gewässer \geq 3. Ordnung bei Sturzfluten
 - Hochwasserschutz
- **Landwirtschaft**
 - Bodenerosion
 - Ernteschäden bzw. Schäden an angebauten Kulturen
- **Naturschutz**
 - Verschlammung und Nährstoffeintrag in Gewässer
- **Katastrophenschutz**
 - erhöhtes Schadpotential
 - häufigere Einsätze

3.4.2 Trockenheit

Aufgrund der intensiveren Niederschläge nimmt die Aufnahme des Niederschlagswassers durch den Boden ab. Dies vermindert die Grundwasserneubildung (Seibert & Auerwald, 2020).

Auswirkungen zunehmender Trockenheit auf die berücksichtigten Handlungsfelder werden in Abschnitt 3.1.3 ausführlicher beschrieben.

3.5 Stürme

Ein häufigeres Auftreten des Klimasignals „Stürme“ kann zu mehr Sturmschäden führen (Abbildung 15).

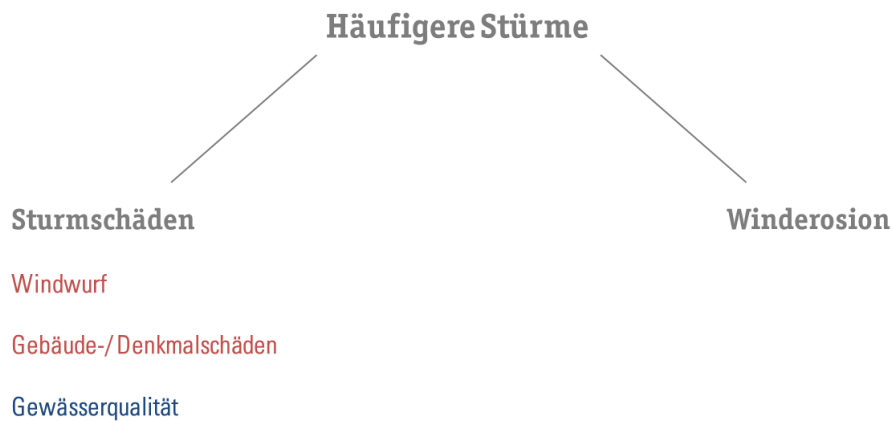


Abbildung 15: Klimawirkungen, die sich aus häufigeren und intensiveren Stürmen für den Landkreis Forchheim ergeben würden. In **grau** dargestellt sind die Hauptkategorien der Schlagwortanalyse, während in **rot** ($\hat{=}$ Zunahme durch Klimaänderungen) und **blau** ($\hat{=}$ Abnahme durch Klimaänderungen) die Unterkategorien dargestellt sind.

In der Forstwirtschaft wird neben einem erhöhten Risiko für Windwurf, ein durch den Windwurf erhöhtes Brutplatzangebot für Käfer als kritisch gesehen (UBA, 2019, S. 120).

Ebenso besteht ein erhöhtes Potential für Sachschäden, wie z.B. Gebäude oder Denkmalschäden. Durch Schäden an Verrohrungen kann unter Umständen lokal die Gewässerqualität beeinträchtigt werden (UBA, 2019, S. 190).

Die Expertinnen- und Experten-Interviews ergaben folgende, besonders betroffene Handlungsfelder:

- **Obstbau**
 - Schäden an jungen, nicht standfesten Obstbäumen
- **Wasserwirtschaft**
 - Sachschäden, z.B. an Wasserhäusern oder an Rohrleitungen
- **Forstwirtschaft**
 - Kalamitäten
 - erhöhtes Brutplatzangebot für Schädlinge
- **Katastrophenschutz**
 - Sachschäden
 - erhöhte Windbruchgefahr

4 Maßnahmenkatalog

In den folgenden Kapiteln sind Maßnahmen zur Klimaanpassung für den Landkreis Forchheim beschrieben, die im Rahmen eines Workshops erarbeitet und um eine Literaturrecherche ergänzt wurden. Die beschriebenen Klimaanpassungsmaßnahmen sind auf die im Kapitel 0 genannten und auf die in den Expertinnen- und Experten-Interviews basierenden Betroffenheiten zugeschnitten. Der zweifelsohne wichtige Klimaschutz, der bei ernsthafter Umsetzung Klimaanpassungsmaßnahmen sogar hinfällig machen kann, wurde dabei nicht berücksichtigt, da für den Landkreis Forchheim ein Klimaschutzkonzept vorliegt, das diesen Aspekt bereits umfassend berücksichtigt.

4.1 Wasserwirtschaftliche Maßnahmen

Die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen untergliedern sich einerseits in den Bereich des Starkregens und andererseits in den Bereich der Hitze, Trockenheit und des Niedrigwassers.

4.1.1 Starkregen

Zentrale Anpassungsmaßnahmen an den Starkregen sind im Landkreis Forchheim insbesondere die Erhöhung des Wasserrückhalts durch Hochwasserminderung sowie eine adäquate Siedlungswasserwirtschaft und bauliche Maßnahmen.

4.1.1.1 Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft durch Maßnahmen zur Hochwasserminderung im ländlichen Raum

Infolge von Starkniederschlägen können sowohl von überlasteten (urbanen) Fließgewässern, als auch von Bereichen fernab von Gewässern oder von normalerweise trockenen Abflussbahnen in Geländetiefpunkten, die jedoch bei starken Niederschlägen plötzlich Wasser führen können, große Gefahren im Landkreis Forchheim ausgehen (LAWA, 2017, S. 68; Seibert & Auerswald, 2020, S. 22 ff.).

Durch viele kleine, dezentrale Hochwasserminderungsmaßnahmen kann im Landkreis Forchheim sowohl den Folgen von Starkniederschlägen als auch von verstärkter Trockenheit entgegengewirkt werden. Dezentrale Hochwasserminderungsmaßnahmen zielen darauf ab, *Wasser in der Landschaft zurückzuhalten und dort zu speichern*, um letztlich den Hochwasserscheitel zu vermindern¹³ (vgl. Abbildung 16). Dies wird insbesondere durch i) Maßnahmen zur *Reduktion des Abflussvolumens* eines (Stark-)Niederschlagsereignisses und ii) durch *abflussverzögernde Maßnahmen* erreicht (Seibert & Auerswald, 2020, S. 26 ff.).

¹³ Es sei betont, dass durch dezentrale Hochwasserminderungsmaßnahmen der Hochwasserscheitel "lediglich" gemindert, nicht aber ein Hochwasser vermieden wird. "Niemand sollte sich der Illusion hingeben, mit Hilfe von Entsiegelung, Flussrückbau und Auenrenaturierung oder gar Einschränkung der Landwirtschaft wären künftige [...] Katastrophen absolut zu vermeiden" (Haber, 2003, S. 7).

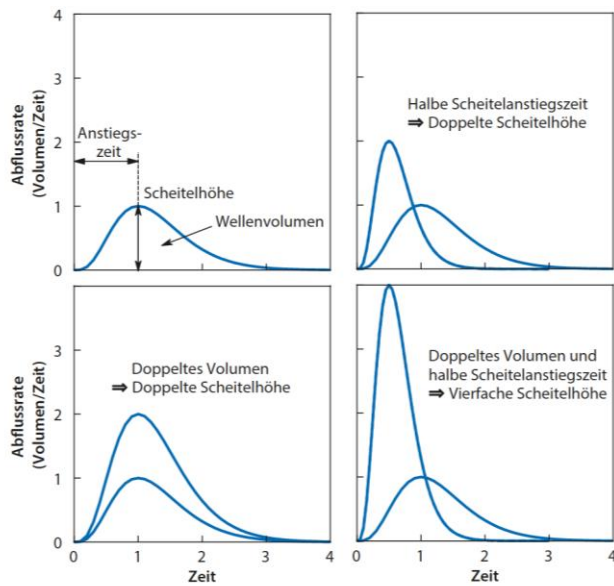


Abbildung 16: Grundlegende Zusammenhänge zwischen Anstiegszeit, Scheitelhöhe und Wellenvolumen nach einem Regenereignis, wenn keine weiteren Prozesse hinzukommen (Seibert & Auerswald, 2020, S. 37)

Die weitaus wichtigste Maßnahme der dezentralen Hochwasserminderung ist es jedoch, *auf Maßnahmen zu verzichten*, die den Abfluss erhöhen sowie beschleunigen und somit das Niederschlagswasser eines Regenereignisses sehr schnell oberflächlich abführen. Zu solchen Maßnahmen zählen vor allem die folgenden (Seibert & Auerswald, 2020, S. 26):

- Versiegelungen (Überbauung, Pflasterung)
- Verrohrungen und Gräben wie Wegseitengräben oder Drainagegräben¹⁴
- Hangeinschnitte, besonders im steilen Gelände (Waldbau)
- Verlust an landschaftlicher Vielfalt (Flächengliederung, Strukturelemente, Landnutzungen)

So wurde beispielsweise für ein ~2,6 km² großes Einzugsgebiet gezeigt, dass – insbesondere durch die Ausdehnung von Siedlungs- und Verkehrsflächen – das Abflussvolumen eines 40 mm Niederschlags um ca. 20 % zunahm. Dieses schnell abgeführte Wasser steht der Vegetation, der Grundwasserneubildung und aquatischen Ökosystemen in möglichen, dem Niederschlagsereignis nachfolgenden, Trockenperioden nicht mehr zur Verfügung (Seibert & Auerswald, 2020, S. 79 ff.).

Eine *Reduktion des Abflussvolumens* sowie eine *Abflussverzögerung* werden insbesondere durch folgende Maßnahmen erreicht (Seibert & Auerswald, 2020):

¹⁴ Der Vergleich verschiedener Gerinnetypen legt nahe, dass sich die Fließgeschwindigkeiten auf etwa der Hälfte aller Fließpfade in der landwirtschaftlichen Flur um rund 60 % beschleunigt haben. Grund hierfür ist, dass die Entwässerung, die früher weitgehend über Grünlandzüge in Hangmulden (breite, begrünte Mulde) erfolgte, heute durch geräumte und dadurch effektive Wegseitengräben mit Regelprofil ersetzt wurde (Seibert & Auerswald, 2020, S. 146).

- *Bodenbedeckung von mindestens 30 %*, die insbesondere durch i) konservierende Bodenbearbeitung – wobei dabei die Mulchdirektsaat¹⁵ die größten Vorteile bietet –, ii) Streifenbearbeitung¹⁶ (“Strip Tillage”), iii) Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung, iv) Anbau mehrjähriger Kulturen, wie z.B. leguminosenbasiertes mehrjähriges Ackerfutter, v) konsequenten Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaat, oder vi) Anlage von Grünland erreicht werden kann.
- *begrünte Abflussmulden* entlang aller topographisch bedingten, erosionsanfälligen Entwässerungswege
- *viele (multifunktionale) Kleinstrückhaltebecken* mit spezifischen Rückhaltevolumen von mindestens 5 mm, bevorzugt an (Acker-)Flächen mit sehr gutem Erosionsschutz, da sonst ein häufiges Ausbaggern des Erosionssediments notwendig ist
- hochwassermindernde Flurgliederung, Flächenparzellierung und Flurneueordnung, z.B. durch *längliche, hangparallele Flurstücksformen*
- hochwassermindernder Wegebau
- *Streifenanbau, Terrassierung und Bearbeitung quer zum Hang*
- *Anlegen breiter, flacher, langer und hydraulisch rauher Gräben*, idealerweise quer zum Hauptgefälle (z.B. begrünte Abflussmulden quer zum Hang) und *Vermeiden von Rohren*
- 3 bis 5 % *Grünland* in Form von schmalen Streifen entlang der Hangmulden in ackerbaudominierten Gebieten bzw. Grünland entlang von Gewässern

Außerdem ist die *heterogene Landnutzung* eine sehr effiziente Form, eine hohe Abflussminderung in der Fläche zu erreichen. Denn je heterogener die Landnutzung ist, umso geringer wird die Gefahr, dass bei einem Regenereignis alle Flächen gleichzeitig zum Abflussgeschehen beitragen (Seibert & Auerswald, 2020, S. 72). In der Praxis bedeutet eine heterogene Landnutzung eine sorgfältig überlegte *Nutzungsmischung* mit *Fruchtfolgen* und *Nutzungswechsel*, die primär von den naturgegebenen Standorten und ihrer Nutzungseignung ausgehen muss (Haber et al., 2010, S. 380). Eine vielfältige Landnutzung ist vor allem dann zu erreichen, wenn die einzelnen Landnutzungsparzellen bzw. Schläge nicht zu groß werden und benachbarte Schläge unterschiedliche Kulturen in zeitlichem Wechsel tragen (Haber et al., 2010, S. 380; Seibert & Auerswald, 2020, S. 82). Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass betriebswirtschaftlich die größten Einsparungspotentiale bei Schlaglängen von bis zu 400 m und Schlaggrößen von

¹⁵ Dabei wird nach der Ernte der Hauptfrucht (z.B. Getreide) eine abfrierende Winterzwischenfrucht (z.B. Senf) angebaut und die Hauptfrucht im nächsten Jahr (z.B. Mais) ohne Bodenbearbeitung in den abgefrorenen Senfbestand eingesät. Daraus ergeben sich zwei Vorteile, nämlich dass i) insbesondere die Lücke der Bodenbedeckung im Winter durch einen dichten, wüchsigen Zwischenfruchtbestand bis in den Dezember hinein geschlossen wird und ii) durch die Direktsaat auch unmittelbar nach der Saat noch mindestens 30 % Bodenbedeckung gegeben sind (Seibert & Auerswald, 2020, S. 87).

¹⁶ Streifenbearbeitung kann die Vorteile von intensiver Bodenbearbeitung und von Direktsaat verbinden. 50–70 % der Oberfläche werden dabei nicht bearbeitet, wodurch die Infiltrationsfähigkeit steigt und der Abfluss stark gebremst wird (Seibert & Auerswald, 2020, S. 120).

5 ha erreicht werden (DWA, 2016, nach Seibert & Auerswald 2020, S. 144)). An diesen Werten sollten sich Schlaglängen und -größen im Landkreis Forchheim orientieren, die – wie bereits beschrieben – länglich und hangparallel ausgerichtet sein sollten. Die aktuellen landwirtschaftlichen Betriebsstrukturen und Betriebsgrößenstrukturen im Landkreis Forchheim entsprechen im Wesentlichen den oben genannten Forderungen: Mit 85 % nebenerwerblichen landwirtschaftlichen Betrieben und einer durchschnittlichen landwirtschaftlichen Fläche von 18,29 ha/Betrieb liegt im Landkreis Forchheim nach wie vor eine relativ kleinstrukturierte Landwirtschaft mit relativ großem Grünlandanteil vor (AELF Bamberg, 2019). Trotzdem ist zu erwähnen, dass in den letzten 20 Jahren insbesondere die Zahl der Betriebe mit einer landwirtschaftlichen genutzten Fläche von < 10 ha abnahm (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2020) und punktuell erhebliche Mengen an Bodenmaterial im Einzugsgebiet der Wiesent abgetragen werden (Strohmeier & Bruckner, 2013).

Neben den oben genannten Maßnahmen sollte im Sinne der Hochwasserminderung und der -vorsorge den Fließgewässern wieder *mehr Raum in Form von renaturierten Auen* oder *multifunktionaler Retentionsbecken* gegeben, zudem *Fließstrecken ggf. wieder verlängert* und die *Bebauung hochwassersensibler Flächen* vermieden werden (Haber, 2003, S. 6).

4.1.1.2 Siedlungswasserwirtschaft und bauliche Maßnahmen

An dieser Stelle ist auf den Abschnitt 4.6 Stadt- und Kommunalplanung zu verweisen.

4.1.2 Hitze, Trockenheit und Niedrigwasser

Um sich an Hitze, Trockenheit und Niedrigwasser anzupassen, sind für den Landkreis Forchheim vor allem die Reduktion des Wasserverbrauchs und die Nutzungsbeschränkung von Gewässern sinnvolle Maßnahmen.

4.1.2.1 Reduktion des Wasserverbrauchs

Zur Entspannung der Nutzungskonflikte um Grundwasservorkommen und Trinkwasserressourcen sollte für die Bewässerung in der Landwirtschaft, aber auch in privaten Gärten, nach Möglichkeit *Grundwasser durch Niederschlagswasser substituiert* werden. Die *Speicherung von Niederschlagswasser in Rückhaltebecken, Teichen, Zisternen* oder Ähnlichem bietet hier im Winter viel Potential, wofür allerdings Speichersysteme vorhanden sein oder gebaut werden müssen (LAWA, 2017, S. Anhang II-101).

Ganz allgemein kann die *Nutzung von gesammeltem bzw. gespeichertem Regenwasser* in Privathaushalten, Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und Industrie dazu beitragen, die Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung zu senken. Je nach Qualität des gesammelten Regenwassers kann es als Brauchwasser zur Bewässerung, für die Toilettenspülung, zur Kühlung von Gebäuden oder als Prozesswasser in der Industrie genutzt werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-76).

Anpassungsmaßnahmen für wasserintensive Unternehmen können in die Bereiche i) *Anlagen und Prozessoptimierung in der Produktion*, ii) *Kreislaufführung und Abwasserrecycling*, iii) *Reduzierung von Reinigungswasser* und iv) *Rohwasseraufbereitung* aufgeteilt werden. Dort gilt es, finanzielle Anreize zu schaffen,

denn Maßnahmen zur Einsparung von Wasser sowie Energie oder zur Senkung von Emissionen werden in erster Linie aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten und weniger aufgrund von Klimawandelaspekten durchgeführt (Staben et al., 2014, S. 62).

4.1.2.2 Nutzungsbeschränkungen

Um zusätzliche Belastungen der Gewässer und des Grundwassers im Niedrigwasserfall während Trockenperioden zu reduzieren und um einen Mindestabfluss zu gewährleisten, können in diesen Situationen *Gewässernutzungen eingeschränkt* und/ oder *Verbote* ausgesprochen werden. Um Nutzungskonflikte abzuschwächen, sollten über die Beschränkungen von Nutzungen im Vorhinein Vereinbarungen getroffen und Prioritäten festgelegt werden, die ab bestimmten Schwellenwerten gelten. Wasserrechtliche Bescheide und bestehende Festlegungen der Gewässernutzungen müssen für den Niedrigwasserfall möglicherweise angepasst werden. Die Einschränkungen sollten gezielt kommuniziert, verstärkt überwacht und auf deren Einhaltung gedrungen werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-112). Dies betrifft im Landkreis Forchheim insbesondere die Gartenbewässerung, die Bewässerung in der Landwirtschaft, Wasserkraftanlagen und den Paddelboot-Tourismus auf der Wiesent.

4.1.2.3 Gewährleistung der Gewässerqualität durch Reduktion von Stoffeinträgen und Niedrigwassermanagement

Damit die Gewässerqualität gewährleistet werden kann, ist es notwendig, ggf. den Stoffeintrag zu reduzieren und das Niedrigwassermanagement adäquat anzupassen. Maßnahmen für den Landkreis Forchheim sind hier das Einhalten von Grenzwerten für das Abwasser, die Wasserentnahme und die Wassereinleitung, eine naturnahe Gewässerstruktur bei Fließgewässern sowie der angepasste Einsatz von Wasserkraft.

4.1.2.3.1 Grenzwerte für Abwasser, Entnahme und Einleitungen

Im Zuge von Immissionsbetrachtungen können bei häufigeren Niedrigwasserabflüssen erhöhte *Anforderungen an die Abwasserbehandlung* in Misch- und Trennsystemen sowie bei häufigeren Starkregenereignissen weitere *Maßnahmen zur Rückhaltung und Aufbereitung von (belasteten) Niederschlagsabflüssen* erforderlich werden (DWA, 2010; LAWA, 2017, S. Anhang II-28). Beispielsweise wird am Neckar ein Sauerstoffmanagement mittels Belüftung durchgeführt, wobei bei Gehalten von unter 4 mg Sauerstoff/l eine Warnmeldung ausgelöst wird und an den Kraftwerken und Kläranlagen in Stuttgart daraufhin Belüftungsmaßnahmen ergriffen werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-114). Kläranlagenabflüsse können dabei aber auch bei entsprechender Qualität zu einer kontinuierlichen Stützung des Gewässerabflusses beitragen (LAWA, 2017, S. 141).

Außerdem können diffuse Stoffeinträge aus der Landbewirtschaftung die Gewässerqualität negativ beeinflussen. Gegenmaßnahmen dazu werden ausführlich in Abschnitt 4.5.1.2 beschrieben.

Neben der Wasserqualität sollten bestehende *Grenzwerte zu Wasserentnahmen aus und Wassereinleitungen in Gewässer* hinsichtlich Menge und Temperatur unter Berücksichtigung der Klimawandeleinflüsse überprüft und ggf. angepasst werden. Wichtige Maßnahmen sind die *Festlegung von Mindestwasserabflüssen* bei

Kraftwerkausleitungen und die *Erstellung von Wärmelastplänen*, beides unter Berücksichtigung zukünftiger klimatischer Entwicklungen (LAWA, 2017, S. Anhang II-61).

Sowohl hinsichtlich des Einleitens von Abwasser als auch hinsichtlich diffuser Einträge, kann die *Förderung des natürlichen Wasserrückhalts bzw. des Wasserrückhalts in der Landschaft* (siehe Abschnitt 4.1.1.1) von großer Bedeutung sein. Denn während Niedrigwasserphasen macht der (grundwasserbürtige) Basisabfluss einen großen Anteil des Gewässerabflusses aus und eine Erhöhung des Basisabflusses durch vermehrte natürliche Retention reduziert letztlich die Stoffkonzentrationen im Gewässer (LAWA, 2017, S. Anhang II-117).

4.1.2.3.2 Gewässerstruktur bei Fließgewässern

Es ist zu erwarten, dass ein Gewässerökosystem den Auswirkungen der Klimaänderungen stabiler begegnen kann, wenn die Gewässerstruktur und -dynamik dem natürlichen bzw. einem naturnahen Zustand entspricht (LAWA, 2017, S. Anhang II-55):

Gewässerrandstreifen mit autotypischen Gehölzsäumen am Gewässerrand wirken zum einen – **allerdings nur geringfügig**¹⁷ (!) – als Sedimentationsbarrieren und können dementsprechend den Sedimenteintrag in ein Gewässer reduzieren, zum anderen beschatten sie die Gewässer (DWA, 2010; LAWA, 2017, S. Anhang II-56). Die *Beschattung* von Gewässern durch Ufergehölzbestände wirkt während Hitze- und Niedrigwasserperioden einer Aufheizung der Wasserkörper entgegen, wobei vor allem an (kleinen) Fließgewässern außerhalb von Waldgebieten eine große Wirkung zu erwarten ist. Niedrigere Wassertemperaturen gehen mit einem höheren Sauerstoffgehalt des Wassers einher, was für viele aquatische Lebensorganismen lebensnotwendig ist (LAWA, 2017). So zeigten Untersuchungen, dass die Ufervegetation durch ihre beschattende Wirkung, besonders in Hitzephasen und unter Niedrigwasserbedingungen, die Erwärmung der Wassertemperatur um 2 bis 4 °C verringern und so die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf das thermische Regime aquatischer Ökosysteme abpuffern kann (Kalny et al., 2017). Außerdem kann die Beschattung eine Reduktion der Verdunstung bewirken, indem sie die Temperaturmaxima abdämpft. Die Gehölzpflanzung in Uferbereichen ist eine relativ einfach plan- und umsetzbare Maßnahme, die keiner Zustimmung der Eigentümerin/ des Eigentümers bedarf, da Gehölzpflanzen nach §39 WHG im Uferbereich zur Gewässerunterhaltung zählen (LAWA, 2017, S. Anhang II-56).

Außerdem bietet eine *reichhaltige, morphologische Gewässerstruktur und -dynamik* vielfältige Habitate, Strömungsverhältnisse (inkl. turbulenter Elemente zur Lösung von Sauerstoff) und bei verschiedenen Abflussverhältnissen immer eine Vielzahl an unterschiedlichen Fließgeschwindigkeitsbereichen. Je nach

¹⁷ Bei den meisten permanenten Fließgewässern werden Gewässerrandstreifen den Sedimenteintrag kaum reduzieren, da der direkt zufließende Anteil des Oberflächenabflusses sehr gering ist. Der direkt zufließende Oberflächenabfluss kommt nur aus dem unmittelbaren Talbereich mit meist geringer Hangneigung und dementsprechend geringem Bodenabtrag. Der Bodenabtrag geschieht vor allem entlang eines sekundären Gewässernetzes (Drainagen, Entwässerungsgräben des Wege- und Straßenbaus), über das der Großteil des erodierten Bodens in Fließgewässer eingetragen wird. *Gewässerrandstreifen entlang des sekundären Gewässernetzes und die Wiederbegrünung von Hangmulden, in denen der Abfluss sich konzentriert*, wären daher bedeutsam wichtiger für den Sedimentrückhalt als solche entlang des primären Gewässernetzes (Geist & Auerswald, 2019, S. 14).

Gewässerordnung und -typ können selbst bei Niedrigwasserperioden noch Bereiche mit ausreichenden Wassertiefen vorhanden sein, um aquatischen Lebewesen zumindest temporär das Überleben zu sichern (LAWA, 2017, S. Anhang II-55). Durch Maßnahmen wie der *Gestaltung von Niedrigwasserrinnen* zur Strukturaufwertung können auch naturferne Gewässer so umgestaltet werden, dass sie selbst in Trockenperioden noch ausreichend Wasser für aquatische Organismen führen (UBA, 2020, S. 20 f.).

Daneben ist es mindestens ebenso wichtig, eine *natürliche Überflutungsdynamik in den Auen zu erhalten* bzw. wiederherzustellen. Denn während in naturnahen Fließgewässern der größte Teil des bei Starkregen eingetragenen Feinsediments durch die Überflutung der Aue hinter den Uferwällen abgelagert wird, verhindern Flusseintiefung und -eindeichung diese Entlastung, wodurch ein Fließgewässer seiner Selbstreinigungskraft "beraubt" wird (Geist & Auerswald, 2019, S. 14). So wurde z.B. an einem Fließgewässer mit Verschlammungsproblemen in der Nähe von Freising festgestellt, dass nur ~1 % des eingetragenen Materials im Flussbett sedimentiert und der Rest abtransportiert wird. Deswegen ist es aus Sicht der Fließgewässerqualität nicht nur wichtig, die Sedimenteinträge zu minimieren, sondern auch insbesondere eine naturnahe Fließgewässerdynamik zuzulassen (Auerswald & Geist, 2018).

Höchste Priorität sollten hierbei Maßnahmen haben, die eine weitere Schädigung des hydrologisch-ökologischen Systems verhindern (v.a. Schutz der wenig verbliebenen Flussauen, Erhalt undrainierter Flächen), gefolgt von Schutz- und Restaurierungsmaßnahmen, die auch zum unmittelbaren Schutz von Menschen und Gütern notwendig sind (v.a. hydraulische Verlangsamung des sekundären Gewässernetzes durch Aufweitung und Begrünung enger Grabenprofile). Schließlich sind auch Maßnahmen relevant, welche die Lebensumwelt des Menschen und der Arten erhalten, stabilisieren und – wo notwendig – restaurieren (z.B. Wiederanbindung und Restaurierung von Auensystemen in Gebieten mit guten Umsetzungschancen) (Geist & Auerswald, 2019, S. 14 ff.).

4.1.2.3 Wasserkraft

Bei Niedrigwasser werden Laufwasserkraftwerke mit Abflüssen deutlich unter dem Ausbaubfluss beschickt. Wenn eine Turbine im Teillastbetrieb läuft, weist sie in der Regel einen schlechten Wirkungsgrad auf und führt in Kombination mit dem ohnehin niedrigen Zufluss zu einer geringen Stromproduktion. Weitere, v.a. ökologische Ansprüche an das Gewässer, wie z.B. *Mindestabflüsse*, können zu Nutzungskonflikten und einer verstärkten Reduzierung der Stromproduktion führen.

Es ist eine *Effizienzsteigerung* der Anlagen durch den Einsatz von Turbinen mit gestaffeltem Ausbaugrad und verbessertem Wirkungsgrad anzustreben, um die Schwankungen im Abfluss (mehr Hoch- und Niedrigwasserabflüsse) für die Stromerzeugung besser nutzen zu können. Bestehende Wasserkraftanlagen sollten auf Grundlage *regionalisierter Mittel- und Niedrigwasserkennwerte* optimiert werden, welche die Folgen des Klimawandels bereits – soweit möglich – berücksichtigen (LAWA, 2017, S. 115).

Um das Gewässerökosystem durch die bestehende Wasserkraftnutzung nicht mehr als nötig zu belasten, ist es wichtig, durch Nutzungsbeschränkungen (siehe Abschnitt 4.1.2.2) einen ökologischen *Mindestwasserabfluss* in der Ausleitungsstrecke festzulegen und einzuhalten.

4.2 Trinkwasserversorgung

Die Trinkwasserversorgung bedarf in erster Linie angesichts der Hitze und Trockenheit sowie der Trinkwasserqualität besonderer Aufmerksamkeit hinsichtlich der Anpassungsmaßnahmen.

4.2.1 Hitze und Trockenheit

In Anbetracht zunehmender Hitze und Trockenheit stellen sich die folgenden Maßnahmen im Landkreis Forchheim heraus.

4.2.1.1 Förderung der Grundwasserneubildung

Zur Sicherung des Wasserdargebots während Trockenperioden sollten Maßnahmen eine hohe Priorität erfahren, welche der *Förderung und dem Erhalt der Grundwasserneubildung* und dem *Hochwasserschutz* dienen (LAWA, 2017, S. Anhang II-69; Rohn & Mälzer, 2010). Solche Maßnahmen sind im Abschnitt 4.1.1.1 bereits zusammenfassend dargestellt.

4.2.1.2 Trinkwasserverbundsysteme

Außerdem sind *Trinkwasserverbundsysteme* ein bereits weit verbreitetes Instrument, um einen Ausgleich zwischen lokalem Wassermangel und lokalen Wasserüberschussgebieten zu schaffen und um die lokale Trinkwasserversorgung während Trockenperioden zu gewährleisten. „Versorgunginseln“, die nur an die lokalen Wasservorkommen angeschlossen sind, sollen vermieden werden (Rohn & Mälzer, 2010). Auf Initiative der Stadtwerke Forchheim gibt es im Landkreis Forchheim Bestrebungen, ein flächendeckendes Verbundsystem zwischen Trinkwasserversorgerinnen und Trinkwasserversorgern aufzubauen, um so im Extremfall Versorgungsengpässe abfangen zu können (Stadtwerke Forchheim, 2020). Diese Initiative sollte aus den oben genannten Gründen weiter umgesetzt und ggf. politisch unterstützt werden.

4.2.1.3 Reduktion von Wasserverlusten

Daneben gilt es für die Wasserversorgerinnen und Wasserversorger, den *Wasserverlust in Trinkwasserversorgungsanlagen möglichst gering zu halten*, um Ressourcen nicht unnötig zu beanspruchen und um keine unnötigen Kosten anfallen zu lassen. Für Bayern weisen ca. 27 % der Wasserversorgungsunternehmen Wasserverluste von 10 bis 20 % auf, rund 15 % der Wasserversorgerinnen und Wasserversorger über 20 %. Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Reserven für zunehmende Extremsituationen durch den Klimawandel sind solche Verluste unbedingt zu vermeiden (LfU, 2018, S. 3 f.). Auch wenn für den Landkreis Forchheim keine Daten vorlagen, so ist doch mit mindestens vergleichbaren Wasserverlusten bei Wasserversorgungsunternehmen zu rechnen.

4.2.1.4 Ökologisches Grundwassermanagement

Ein *ökologisches Grundwassermanagement* ist ebenfalls unabdinglich für eine sichere Wasserversorgung. Dazu gehören die gezielte Verteilung der Grundwasserförderung innerhalb eines Einzugsgebietes, die Einhaltung zulässiger Fördermengen sowie ggf. die Mindestdurchflussmengen in Oberflächengewässern (Flussökologie,

Uferfiltration). Dies könnte durch die Aufstellung eines *Grundwasserbewirtschaftungsplans* mit Festlegung wasserrechtlich zulässiger Fördermengen, die an Richt- und Grenzwerte von Grundwasserständen ausgewählter Messstellen gekoppelt sind, geschafft und um *Prognosen zur Dargebotsabschätzung* ergänzt werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-72; Rohn & Mälzer, 2010). Dies setzt ein umfassendes Monitoring der Grundwasserstände und der Grundwasserqualität voraus, sodass die aktuellen Messstellennetze fortgeführt und ggf. ausgebaut werden sollten (LAWA, 2017, S. 96).

4.2.1.5 Höhere Belastung der Trinkwassergewinnung

Eine Zunahme des maximalen Wassertagesbedarfs erfordert ggf. *größere Fassungs-, Aufbereitungs-, Transport- und Speicherkapazitäten*. Geeignete Anpassungsmaßnahmen sind insbesondere i) die *Optimierung bestehender Wasserversorgungsanlagen*, beispielsweise durch *tieferer Brunnen* und *leistungsfähigere Pumpenanlagen*, ii) die *Schaffung größerer Speicherkapazitäten* in Wassernetzen sowie -werken und iii) die *Sicherstellung weiterer Entnahmooptionen*. Außerdem ist für lokale, mengenmäßige Notfallsituationen die Möglichkeit einer redundanten Gewinnung von Trinkwasser, insbesondere durch *Verbundsysteme* – wie sie durch die Stadtwerke Forchheim im Landkreis angestrebt werden (Stadtwerke Forchheim, 2020) – zu empfehlen (LAWA, 2017, S. Anhang II-74).

4.2.2 Trinkwasserqualität

Hinsichtlich der Trinkwasserqualität stellen sich die folgenden Maßnahmen im Landkreis Forchheim heraus.

4.2.2.1 Maßnahmen zur Gewährleistung der Trinkwasserqualität

Aufgrund bisheriger Beobachtungen und Erfahrungen wird den Wasserwerken empfohlen, den Betrieb der Anlagen langfristig gesehen auf stärkere Schwankungen der Rohwasserqualität einzustellen und das Krisenmanagement zu optimieren (Rohn & Mälzer, 2010). Um einem möglichen, klimabedingten, negativen Einfluss auf die Trinkwasserqualität bei ungünstigen Nährstoffverhältnissen entgegenzuwirken, sind auf verschiedenen Ebenen der Trinkwasserversorgung Anpassungsstrategien denkbar. Je nach lokalen Trends, Ansprüchen und Bedürfnissen können Wasserwerke um *weitere Verfahrensstufen* (z.B. Aktivkohlefilter, Desinfektion mit UV-Licht, etc.) modernisiert werden, damit sie auf das Auftreten von Spurenstoffen im Rohwasser vorbereitet sind (Rohn & Mälzer, 2010). Die *Gewährleistung eines regelmäßigen Durchflusses mit spülender Wirkung* im Trinkwasserverteilungsnetz kann ansteigende Temperaturen¹⁸ und Standwasser in den Rohrleitungen verhindern und zu einer mikrobiologisch-hygienischen, einwandfreien Qualität des Trinkwassers beitragen (Staben et al., 2014). Außerdem ist ein *mikrobiologisch-hygienisches Monitoring* des Trinkwassers und der wasserbenetzten Oberflächen, wie es die routinemäßige mikrobiologische Kontrolle der Trinkwasserqualität nach dem Überwachungsprinzip der Trinkwasserverordnung fordert, konsequent fortzuführen und ggf. um den Parameter „mikrobiologisch verwertbarer

¹⁸ Im Sommer ist während längerer Hitzeperioden eine klimabedingte Erwärmung des Trinkwasserverteilungsnetzes in Verbindung mit stark versiegelten Bereichen, wie sie in Ballungsräumen häufig vorkommen, sowie mit geringen Durchflussmengen in den Leitungen zu erwarten. Untersuchungen ergaben, dass ansteigende Temperaturen allein nicht zwangsläufig zu einer Verschlechterung der mikrobiologisch-hygienischen Qualität des Trinkwassers (insb. Aufkeimung und hygienisch relevante Mikroorganismen) führen (Staben et al., 2014).

Kohlenstoff“ zu ergänzen. Auch die *Planung und das Management des Trinkwasserverteilnetzes* können von entscheidender Bedeutung sein, wobei insbesondere das Rohrmaterial, die Rohrleitungstiefe und der Durchfluss allesamt die mikrobiologische Kolonisierung beeinflussen (Rohn & Mälzer, 2010; Staben et al., 2014). Müssen tatsächlich Rohwasserentnahmen wegen Gütebeeinträchtigungen ausgesetzt werden, sind auch in diesem Fall *Verbundstrukturen* der Wassergewinnung von Vorteil (Rohn & Mälzer, 2010). Wie bereits erwähnt, gibt es auf Initiative der Stadtwerke Forchheim im Landkreis Bestrebungen, ein flächendeckendes Verbundsystem zwischen Trinkwasserversorgerinnen und Trinkwasserversorgern aufzubauen, um so im Schadensfall Versorgungsengpässe abfangen zu können (Stadtwerke Forchheim, 2020). Diese Initiative sollte aus den oben genannten Gründen weiter umgesetzt und ggf. politisch unterstützt werden.

Um eine Verschärfung der Nährstoff- (z.B. Nitrat) sowie der Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel (PBSM)-Problematik im (Trink-)Wasser zu vermeiden, können außerdem *vorsorgende Maßnahmen im Ressourcenschutz* sinnvoll sein, die in enger Kooperation mit der Landwirtschaft erarbeitet werden müssen. Bereits existierende Programme zum Schutz des Grundwassers sind dementsprechend fortzusetzen, weiterzuentwickeln und ggf. mit weiteren Programmen zu ergänzen (Staben et al., 2014). Maßnahmen hierzu werden im Abschnitt 4.5.1.2 zusammengefasst.

4.3 Obstbau

Der Klimawandel ist kein linear ablaufender Prozess, sondern er verläuft langsam und mit erheblichen Schwankungen bei gleichzeitiger Zunahme bisher extremer Wetterereignisse (z.B. Trockenperioden). Diese Veränderungen erfordern grundsätzlich eine *breitere Risikostreuung (Diversifizierung) hinsichtlich (Kulturarten) Sorten, Sortentypen, Standorten und Nutzungssystemen*, um das totale bzw. teilweise Verlustrisiko zu vermindern (LfULG, 2009, S. 96; Weigel, 2011, S. 24 f.). Außerdem kann der Erhalt alter Sorten zur Sicherung resistenter und angepasster Eigenschaften von Obstkulturen beitragen und wichtig für den zukünftigen Züchtungsfortschritt sein. Denn – und das gilt im Obstbau genauso wie beispielsweise in der Forstwirtschaft – “wer streut, rutscht nicht” (Kölling et al., 2010).

4.3.1 Trockenheit, Hitze & Strahlung

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Trocken- und Hitzeschäden sind insbesondere *Bewässerung, kulturtechnische Maßnahmen* sowie *geeignete Standort- und Sortenwahl* (Goemann et al., 2015, S. 145 f.).

Bewässerung kann in Form von flexibler oder stationärer Tropfbewässerung effizient Wasserdefizite bei Trockenstress ausgleichen und zusätzlich einen Kühlungseffekt bei Hitzeereignissen hervorrufen. Das Bewässerungssystem kann unter Umständen auch zur Frostberegnung verwendet werden. Grundvoraussetzung für das Etablieren von Bewässerungssystemen ist allerdings eine ausreichende regionale Verfügbarkeit von Zusatzwasser (Goemann et al., 2015, S. 94, 145). Das bewässerungstechnische Erschließen von Obstflächen setzt einen erheblichen Investitionsbedarf voraus. So liegen die Kosten für 1 ha Tropfbewässerungsanlage im Obstbau bei ca. 4.000 €, berücksichtigt man noch Erschließungskosten belaufen sich die Gesamtkosten auf ca. 5.200 € je ha. Bei einem angenommenen Wasserbedarf von 4 Liter pro Baum, einem Wasserpreis von ca. 0,30 € je m³ und einer jährlichen Bewässerungsperiode von 150 Tagen würden zudem Zusatzkosten von ca. 500 € pro Hektar und Jahr anfallen (LfULG, 2009, S. 124).

Zur Entspannung der Nutzungskonflikte um Grundwasservorkommen und Trinkwasserressourcen sollte für die Bewässerung im Obstbau nach Möglichkeit *Grundwasser durch Niederschlagswasser substituiert* werden. Die *Speicherung von Niederschlagswasser in Rückhaltebecken, Teichen, Zisternen* oder Ähnlichem im Winter bietet hier viel Potential, wofür allerdings Speichersysteme vorhanden sein oder gebaut werden müssen (LAWA, 2017, S. Anhang II-101).

Kulturtechnische Maßnahmen zur Vorbeugung von Trocken- und Hitzeschäden zielen insbesondere auf eine Verbesserung der Wasserversorgung durch eine *Erhöhung der Wasserspeicher- und Infiltrationskapazität der Böden*, eine *Reduktion der Wasserkonkurrenz* und eine *Reduktion des Wasserbedarfs der Obstkultur* selbst ab. Wichtige Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur sind der Aufbau von Humus (vgl. dazu Abschnitt 4.5.2.2), beispielsweise durch *organische Düngung* (z.B. Kompost oder Gründüngung), eine *Bodenbedeckung* (z.B. Stroh), *tiefwurzelnde Zwischenfrüchte* oder eine *flache Bodenbearbeitung*. Zur Reduktion der Wasserkonkurrenz ist ein *Begrünungsmanagement* sinnvoll, das beispielsweise während der Vegetationsperiode die *Begrünung um die*

Obstkulturen kurzhält und den *Beikrautbewuchs reguliert*, gleichzeitig aber auch Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur zulässt (Goemann et al., 2015, S. 145). So bietet z.B. das Mulchverfahren die Möglichkeit, Beikräuter im Baumstreifen mit organischen Materialien wie Stroh, Holzhäcksel, Kompost oder Mulchmasse aus der Fahrgasse zu unterdrücken und die Bodenstruktur zu verbessern (Werth et al., 2020, S. 47 f.). Des Weiteren können *konsequente Fruchtausdünnung* und die *Reduktion der Blattfläche auf der sonnenabgewandten Seite* die Assimilationsleistung der Obstkulturen und damit den Wasserbedarf senken. Die beschriebenen kulturtechnischen Maßnahmen sind im Vergleich zur Tröpfchenbewässerung relativ flexibel einsetzbar und in der Beschaffung weniger kostenintensiv, allerdings sind qualitative Einbußen möglich und es bedarf eines hohen Managementanspruchs mit zusätzlichen Arbeitsgängen und -kosten (Goemann et al., 2015, S. 145 f.). Beim angesprochenen Mulchverfahren muss z.B. je nach verwendetem Material die Mulchauflage regelmäßig erneuert werden und die Besiedelung des Baumstreifens durch Wühl- und Feldmäuse überprüft und verhindert werden (Werth et al., 2020, S. 47 f.).

Zur Vorbeugung bzw. Abwehr von Strahlungs- und Hitzeschäden (Sonnenbrand), sollen – wie oben bereits beschrieben – bei Pflegemaßnahmen nur die *sonnenabgewandten Seiten entblättert* werden, sodass auf der sonnenzugewandten Seite die Früchte ggf. durch *Decklaub* geschützt werden. Falls es der Standort, die Topographie und Aspekte des Bodenschutzes zulassen, kann auch eine Zeilenausrichtung nach Nord/ Süd Sonnenbränden auf der Frucht entgegenwirken (Goemann et al., 2015, S. 146). Auch diese Maßnahmen sind, je nach Witterung, sehr flexibel durchführbar, erfordern aber zusätzliche Arbeitsgänge und -kosten (Goemann et al., 2015, S. 146). Ebenso ist der *Zeitpunkt für Ausdünnungs- oder Sommerschnittmaßnahmen* von großer Bedeutung für die Vermeidung von Strahlungsschäden. Insbesondere vor Hitzeperioden oder vor Wetterumschwüngen nach mehrwöchigen Tiefdruckwetterlagen hin zu sonnig-heißem Hochdruckwetter sollten Schnitt und Ausdünnung eingestellt bzw. vermieden werden, um das Risiko für Sonnenbrandschäden nicht zu erhöhen. Denn vermutlich ist die Schale der Früchte nach wochenlangem Regenwetter dünner und somit empfindlicher gegen plötzliche, hohe Sonneneinstrahlung. Bei einem Versuch an Äpfeln kam beispielsweise heraus, dass nach starkem Sommerschnitt unmittelbar vor einer heißen Witterung 10,5 % der Äpfel geschädigt waren, wohingegen in der Variante ohne Schnitt (Kontroll-Parzelle) kein Apfel Sonnenbrand-Schäden hatte. Außerdem wurde gezeigt, dass der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (vor allem Schwefelpräparate) vor einer heißen Wetterlage Sonnenbrand fördern kann (Wiebusch, 2019, S. 167 f.).

Sonnenbrand-Nekrosen und Sonnenbrand-Verbräunung an Äpfeln entstehen jeweils bei Temperaturen auf der Fruchtoberfläche von über 52 °C bzw. 46 °C. Eine Vermeidung solcher Spitzentemperaturen kann durch die kühlende Wirkung von Wind bewirkt werden, wohingegen sich bei Windstille die Wärme in den Obstanlagen stauen kann und so die Sonnenbrandgefahr an windstillen, sonnig-heißen Tagen stark ansteigt. Versuche haben gezeigt, dass bereits bei Windgeschwindigkeiten von 1,0 bis 1,5 m/s die Temperatur an der Fruchtschale innerhalb von 15 Minuten von 49 °C auf 45 °C, und nach 30 Minuten auf 44 °C abgesenkt werden konnte (Wiebusch, 2019, S. 165

ff.). Eine gute *Durchlüftung der Obstanlage* kann demnach auch wesentlich zur Verringerung des Sonnenbrand-Risikos beitragen.

Sollten aufgrund einer windstillen, sonnig-heißen Witterung mit hoher Strahlungsintensität die eben aufgeführten Maßnahmen hinfällig werden, kann Sonnenbrand effektiv durch *keinen Sommerschnitt, Kaolin-Spritzung* (= Sonnenschutz, der allerdings bei Trockenperioden Spritzflecken bis zur Ernte hinterlässt) oder *klimatisierende Beregnung* entgegengewirkt werden. Die klimatisierende Beregnung bewirkt durch den Effekt der Verdunstungskälte bei Beregnung im Minutentakt um bis zu 10 °C geringere Temperaturen im Bestand als bei unberechneten Anlagen. Benötigt werden allerdings große Wassermengen und eine gute Wasserqualität, um keine Versalzung an der Fruchtschale hervorzurufen (Wiebusch, 2019, S. 167 f.).

Ganz grundsätzlich ist natürlich auch die Standort- und Sortenwahl entscheidend, um Trocken- und Hitzestress präventiv abzuwehren. Für die Errichtung neuer Obstanlagen sollten Standorte mit *genügend Wasserhaltevermögen* und ggf. mit *Bewässerungsmöglichkeiten* ausgewählt und zudem *dem Standort und den zukünftigen klimatischen Bedingungen angepasste Obstkulturen und -sorten*¹⁹ angebaut werden. Auch die Auswahl trocken- und hitzetoleranter Unterlagen und Sorten kann Trocken- und Hitzestress entgegenwirken (Goemann et al., 2015, S. 146), denn neben einer geeigneten Sortenwahl kann auch die richtige *Unterlage* gewisse Standortnachteile ausgleichen. Schwachwachsende Unterlagen weisen im Allgemeinen höhere Standortansprüche auf als mittelstarkwachsende Unterlagen. Die geringsten Standortansprüche haben in der Regel starkwachsende Unterlagen, deren Baumform zumeist ein für Streuobstbestände typischer Halb- oder Hochstamm ist (LWG, 2016). Damit verbunden ist allerdings ein hoher Arbeitsaufwand für Pflege- und Erntemaßnahmen mit entsprechend hohen Kosten im Vergleich z.B. zur Spindel²⁰ (Goemann et al., 2015, S. 146).

4.3.2 Spätfrost

Temperaturen unter dem Gefrierpunkt können – je nach Obstart, Sorte und Entwicklungsstadium – starke Schäden an den generativen Organen von Obstbäumen verursachen. Die Frostanfälligkeit ist beim Austrieb deutlich geringer als bei Blüten oder jungen Früchten, bei denen Spätfrostschäden bereits ab 0 °C auftreten können. Wenn milde Winter einen frühen Austrieb begünstigen, steigt das Risiko von Ertragsverlusten durch Blütenfrost. Allgemein werden Spätfrostereignisse nach ihrer Entstehung in Strahlungsfrost (Inversion) und Strömungsfrost (Advektion) unterteilt (Kröling, 2021, S. 7; Szalatnay et al., 2018, S. 2).

Bei Strahlungsfrost wird in sternklaren Nächten die vom Boden abgestrahlte Wärme nicht durch einen bedeckten Nachthimmel zurückgestrahlt. Wenn zudem kaum Wind weht, kühlen der Boden und die unmittelbar darüber liegenden Luftschichten ab. Dabei bilden sich besonders in Mulden und Tallagen sogenannte Kaltluftseen. Über der kalten Luftschicht sind bei Inversionslagen jedoch wärmere Luftmassen geschichtet. Dieser Effekt wird bei der

¹⁹ Es sei an dieser Stelle auf die Sortenempfehlung des Bayerischen Obstbauleitfadens des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF, 2014) hingewiesen.

²⁰ Siehe Kosten durch Spindel mit hoher Besatzdichte (Beispiel: LfULG (2021): Apfelanbau im Klimawandel).

Verwirbelung von Luftmassen genutzt, bei der die Luft künstlich mit *Windmaschinen* oder Hubschrauberflügen vermischt und so die bodennahe Luft erwärmt wird. Bei Inversionswetterlagen, die den Hauptteil der Frostereignisse ausmachen, haben Luftverwirbelungsmethoden einen hohen Wirkungsgrad und sind relativ kostengünstig. Die effektivste Vorsorge gegen Strahlungsfrost ist aber die *Standortwahl* der Obstanlage. Durch die Vermeidung von Mulden und Tallagen, wo sich bevorzugt Kaltluftseen bilden, lassen sich Schäden durch Inversionswetterlagen stark reduzieren (Kröling, 2021, S. 7 f.; Szalatnay et al., 2018).

Bei Advektionsfrost werden Kaltluftmassen mit Temperaturen $< 0\text{ °C}$ horizontal aus ihren Entstehungsgebieten heraus verfrachtet, wodurch nun alle Luftschichten kalt ($< 0\text{ °C}$) sind. Dieser Frostart kann nur durch Zufuhr großer Mengen an Energie und nicht beispielsweise durch Windmaschinen entgegengewirkt werden. Eine sehr effektive Methode zur Spätfrostprävention ist die *Frostschutzberegnung*, bei der bis zu 40 m^3 Wasser pro Hektar und Stunde über den Baumkronen verteilt werden, bevor die Feuchttemperatur²¹ die kritische Pflanzentemperatur unterschreitet. Die beim Einfrieren freigesetzte Erstarrungsenergie hält die Blütenorgane auf einer Temperatur von ca. 0 °C . Nachteil dieser wirkungsvollen Methode sind die z.T. sehr hohen Wasseraufwendungen, weshalb die Frostschutzberegnung nur auf *Standorten* mit entsprechender Wasserverfügbarkeit möglich ist (Kröling, 2021, S. 8, S. 18).

Alternativen zur Frostschutzberegnung sind das Aufstellen und Entzünden von Kerzen oder das Verbrennen von Gas, z.T. in Kombination mit Folienabdeckung. Diese Methoden sind aber relativ kosten- und arbeitsintensiv (Frostkerzen bis 2.400 € pro Hektar und Frostnacht) und im Wirkungsgrad deutlich schlechter, da dabei beträchtlich weniger Energie freigesetzt wird. Sie bieten einen gewissen Schutz im Temperaturgrenzbereich und sollten aus wirtschaftlicher Sicht nur in Kulturen und Sorten mit hoher Wertschöpfung eingesetzt werden, wenn eine Beregnung nicht möglich ist (Kröling, 2021, S. 18; Szalatnay et al., 2018, S. 4). Die Frostschutzberegnung sowie Methoden der Geländeheizung, z.B. durch Paraffinkerzen oder Festbrennstofföfen, können natürlich auch genutzt werden, um Strahlungsfrostereignisse abzumildern.

Eine interessante Option ist zudem, durch Pflanzenöle oder Schnitttechnik (z.B. double pruning im Weinbau) den Austrieb der Knospen zu verzögern. Insbesondere eine 10-prozentige Rapsölapplikation zeigte sich bei Versuchen im Weinbau in Franken als vielversprechende und kostengünstige Maßnahme, da sie durch Verklebung der Knospen eine Austriebsverzögerung von 7-15 Tagen bewirkte und somit sowohl gegen Inversionsfrost als auch Advektionsfrost wirkte. Allerdings ist unbedingt zu beachten, dass die Öle mit der im genannten Versuch eingesetzten Dosierung und Zielsetzung **in Deutschland bislang nicht zugelassen** sind (Müller, 2018, S. 27 ff.). Solche Verfahren müssen erst noch weiter erforscht und optimiert werden, z.B. hinsichtlich der Ertragsstabilität (Goemann et al., 2015, S. 143).

²¹ "Tiefste Temperatur, die sich durch Verdunstungskühlung erreichen lässt. Sie bildet annähernd die Temperatur der feuchten Knospe ab. Zur Messung wird das Thermometer z.B. mit feuchtem Stoff umwickelt. Streng genommen muss es zusätzlich belüftet sein, um die maximale Verdunstung zu erreichen" (Szalatnay et al., 2018, S. 1).

Eine gute Übersicht über Vor- und Nachteile sowie die Praxistauglichkeit von verschiedenen technischen Frostschutzmaßnahmen liefert Müller (2018, S. 33 f.).

Außerdem können kulturtechnische Maßnahmen die Empfindlichkeit gegenüber Spätfrost vermindern. Zum einen entscheidet die *Obstart- und Sortenwahl* darüber, wie empfindlich die Obstkulturen auf Frost reagieren (Goemann et al., 2015, S. 142). So sind beispielsweise Äpfel weniger frostempfindlich als Kirschen, Pflaumen und Birnen, allerdings wurden auch bis zu 20 % weniger Spätfrostschäden zwischen unterschiedlichen Apfelsorten festgestellt. Außerdem konnte gezeigt werden, dass eine *intensive Blüte* zwar keinen direkten Einfluss auf die Spätfrostresistenz hat, aber die absolute Überlebensrate bei gleichem relativem Schaden entsprechend deutlich höher ist. Des Weiteren kann ein später Blühbeginn von Vorteil sein, da somit die Blütenstände entwicklungsbedingt weniger anfällig für Blütenfrost sind²² (Kröling, 2021, S. 7, 16 ff.).

Außerdem weist ein *unbearbeiteter, unbewachsener Boden bzw. ein Boden mit relativ kurzer Vegetation* meist eine höhere Wärmestrahlung im Vergleich zu begrünten Flächen mit starkem Bewuchs auf. Zwar ist dadurch keine deutliche Erwärmung des Pflanzenbestandes möglich, weswegen es nicht als alleinige Frostschutzmaßnahme empfohlen werden kann. Jedoch kann dies unter Umständen in Frostnächten das „Zünglein an der Waage“ sein, um die frostempfindlichen Blüten vor Frostschäden zu schützen (Goemann et al., 2015, S. 143; Werth et al., 2020, S. 8).

Das gleiche gilt für eine *Reduktion der Windgeschwindigkeit*. Wenn Pflanzenteile feucht sind, kommt es durch Verdunstung zu einer weiteren Abkühlung, der sogenannten Verdunstungskälte. Dieser Effekt ist besonders bei Temperaturen um den Gefrierpunkt, bei tiefer relativer Luftfeuchtigkeit und bei Wind von Bedeutung. Die Pflanzentemperatur kann dadurch um bis zu 4 °C abgesenkt werden (Szalatnay et al., 2018, S. 2). Durch Windschutzelemente kann die Gefahr von „Windfrost“ und ggf. auch die Zufuhr von Kaltluft reduziert werden (LfL, 2005, S. 6).

Auch bestimmen die *Unterlage* und das *Erziehungssystem* die Frostempfindlichkeit, wobei die Gefahr von Frostrissen bei Halb- bzw. Hochstamm geringer ist als z.B. bei der Spindelerziehung oder dem Spalier. Bei Inversionsfrösten können bei den Erziehungsformen Halb- und Hochstamm die generativen Organe der Obstäume oberhalb der schadbringenden, kalten Luftschichten liegen und so das Schadausmaß reduzieren. Zudem können beim Schnitt Triebe als Frostreserven an den Obstkulturen belassen werden (Goemann et al., 2015, S. 143; LWG, 2016). Auch das *Weißeln von Obstbäumen* kann vor Frostrissen schützen, indem es das eingestrahelte Sonnenlicht reflektiert, das dann nicht für eine Erwärmung des Stammes und den damit verbundenen Spannungsrissen in der Borke zur Verfügung steht (Hinrichs-Berger, 2004).

²² Dem gegenüber steht jedoch die steigende Gefahr einer Feuerbrandinfektion, welche mit zunehmender Temperatur zur Blüte zunimmt (Kröling, 2021, S. 18).

Eine Maßnahme rein zur Absicherung finanzieller Verluste durch Spätfröste ist eine *Frostversicherung*, die zwar keine Minderung bzw. Verhinderung der direkten Schäden und Verluste des Erntegutes bewirkt, allerdings ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand, dafür mit Versicherungsbeiträgen verbunden, Erlöseinbußen ausgleichen kann (Goemann et al., 2015, S. 143).

4.3.3 Sturm

Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Sturmschäden an Obstbeständen umfassen vor allem eine *Erhöhung der Standfestigkeit* oder eine *Reduktion der Windgeschwindigkeit*.

Die *Standfestigkeit* der Obstbestände kann zum einen durch die *Wahl der Unterlage* sowie mittels *Stützpfehlen* beeinflusst werden. So weisen die Erziehungsformen Mittel- bzw. Hochstamm, die in der Regel typisch für Streuobstbestände sind, auf starkwachsenden Unterlagen bei Apfel und Kirsche eine höhere *Standfestigkeit* auf als Erziehungsformen auf schwachwachsenden Unterlagen. Bei der Kirsche ist ein *Stützpfehl* nur in den ersten drei Jahren bei allen Unterlagentypen notwendig, insbesondere wegen eines geraden Wuchses im Jugendstadium. Beim Apfel hingegen ist – wegen seiner geringen Standfestigkeit auf schwach wachsenden Unterlagen – ein Stützpfehl zeitlebens notwendig (LWG, 2016).

Eine Reduktion der Windgeschwindigkeit kann auch durch Windschutzhecken oder Windschutzstreifen bewirkt werden. Der mikroklimatische Effekt von Windschutzstreifen ist abhängig von ihrem Aufbau, ihrer Durchlässigkeit, ihrer Höhe und vor allem auch von ihrer Ausrichtung in Bezug auf die Hauptwindrichtung. Besonders groß ist die Schutzwirkung von Windschutzhecken mit einer Durchlässigkeit von 30 bis 50 % und ohne große Lücken. Lücken wirken wie Düsen und beschleunigen den Wind. Windschutzstreifen können die Windgeschwindigkeit um bis zu 50 bis 60 % reduzieren, mit einer windbremsenden Wirkung bis in eine Entfernung des mindestens 12-fachen der Höhe des Windschutzstreifens (12 H). Aber auch auf der Leeseite kann eine Windreduktion bis in eine Entfernung von 5 H festgestellt werden. Die Windreduzierung durch Hecken beeinflusst außerdem andere klimatische Standortfaktoren auf der Leeseite und fördert beispielsweise die Taubildung und Bodenfeuchte insbesondere dadurch, dass die Verdunstung durch geringere Windgeschwindigkeiten reduziert wird (Ableidinger et al., 2020, S. 4 ff.; DVL, 2006, S. 90 ff.).

4.3.4 Schädlinge

Ein Obstbaum wird während seiner Standzeit insbesondere von Insekten und Pilzen besiedelt. Es existieren komplexe Interaktionen zwischen dem Baum und seinen Nützlingen sowie Schädlingen. Der Klimawandel hat bereits jetzt zu Veränderungen des Schaderreger-Spektrums geführt. Neue wärmeliebende Schaderreger wie die Schwarze Sommerfäule an Äpfeln oder die Kirschessigfliege führen zu neuen Herausforderungen. Die Dynamik dieser Entwicklung wird in Zukunft weiter zunehmen. Das *frühzeitige Erkennen einer neuen Krankheit bzw. eines neuen Schaderregers* ist ein sehr wichtiger Schlüssel zur Vermeidung hoher Folgeschäden. Ist ein Schaderreger identifiziert worden, muss seine Infektionsbiologie unter den Bedingungen vor Ort aufgeklärt werden. Aus diesem Wissen heraus lässt sich dann eine gezielte Bekämpfungsstrategie ableiten, die an die regionalen Verhältnisse

angepasst sein muss. Einer möglichst engen Vernetzung zwischen den Erzeugerinnen und Erzeugern, der Beratung sowie der Forschung kommt eine sehr große Bedeutung zu (Weber, 2014).

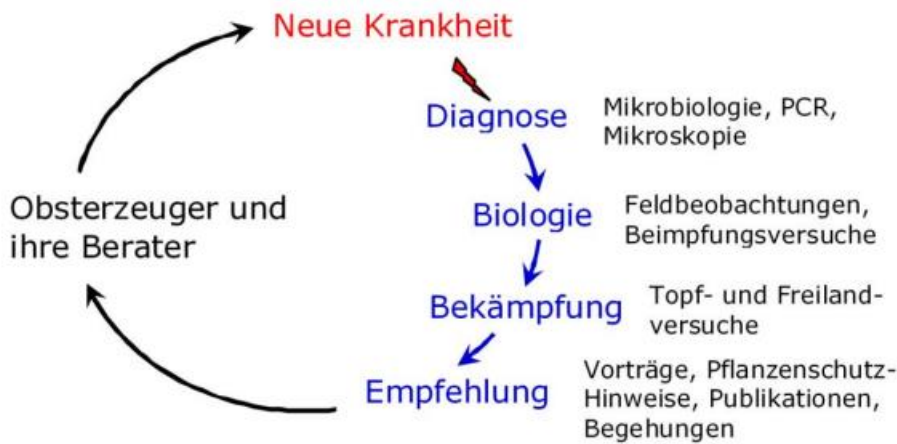


Abbildung 17: Vorgehensweise vom ersten Auftreten bis zur erfolgreichen Bekämpfung eines neuen Schaderregers (Weber, 2014, S. 3)

Bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln sind die Belange des integrierten Pflanzenschutzes²³ zu beachten. Unter Berücksichtigung von *Nützlingen* und *präventiven Maßnahmen*, wie dem Entfernen von Mumien, sind Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes für den Erwerbsobstbau umfassend in Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg et al. (2020) zusammengefasst.

²³ "Der integrierte Pflanzenschutz als Leitbild des praktischen Pflanzenschutzes ist eine Kombination von Verfahren, bei denen unter vorrangiger Berücksichtigung biologischer, biotechnischer, pflanzenzüchterischer sowie anbau- und kulturtechnischer Maßnahmen die Anwendung chemischsynthetischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendige Maß beschränkt wird" (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg et al., 2020, S. 5).

4.4 Forstwirtschaft

Wälder bedecken im Landkreis Forchheim mit 24.200 ha etwa 38 % der Landoberfläche. Damit sind Wälder nach den landwirtschaftlich genutzten Flächen landkreisweit die zweitgrößte Landnutzung (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2020, S. 13). Aufgrund der sich ändernden klimatischen Bedingungen ist eine Anpassung forstwirtschaftlicher Belange in vielerlei Hinsicht notwendig, um Trocken- und Hitzeschäden, Sturmschäden, Schädlingsbefall sowie Spätfrostschäden zu vermeiden.

4.4.1 Trocken- und Hitzeschäden

Für den Landkreis Forchheim eignen sich vor allem folgende Maßnahmen zur Eindämmung von Trocken- und Hitzeschäden.

4.4.1.1 Waldumbau hin zu Mischwaldbeständen

Trocken- und Hitzeextreme wirken sich insbesondere durch die Erhöhung der Absterbewahrscheinlichkeit auf hitze- und trockenheitssensitive Baumarten und deren Verjüngung aus. Der Ausfall der Verjüngung führt für Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer zu erheblichen Mehrkosten bei der Begründung von Waldbeständen (Goemann et al., 2015, S. 175). Untersuchungen zeigten beispielsweise für Buchen- und Fichtenverjüngung, dass bei einem nutzbaren Rest-Bodenwasservorrat von unter 20 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) die Naturverjüngungen in akuten Trockenstress geraten, der zum Absterben von bis zu 50 % der Naturverjüngungen führen kann (Goemann et al., 2015, S. 179). Modellierungen für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung zeigen aber auch, dass in Zukunft kritische Trockenheit (\cong Bodenwasservorrat von unter 20 % nFK an mehr als 150 Tagen im Jahr) für die Naturverjüngung unter Buchenschirmen nur alle 5-20 Jahre auftreten wird, während diese Schwelle aufgrund fast doppelt so hoher Interzeptionsverluste unter Nadelbaumbeständen alle 2-5 Jahre eintreten wird (Goemann et al., 2015, S. 183 ff.). Die hohen Interzeptionsverluste unter Nadelbäumen führen außerdem dazu, dass unter Nadelbaumbeständen nur ca. 180 l/m² tiefenversickern, während der entsprechende Wert unter Laubwaldbeständen bei ca. 280 l/m² und unter Grasvegetation bei ca. 420 l/m² liegt (Zimmermann et al., 2008, S. 17). Reine Nadelbaumbestände verstärken so die Trockenheit in Böden und reduzieren die Grundwasserneubildung.

Die beschriebene Vorteilswirkung von Laubwaldbeständen auf das Bodenwasserangebot für die Verjüngung macht deutlich, dass der seit ca. drei Jahrzehnten laufende *Waldumbau von reinen Nadelwäldern in Mischwälder* bereits eine Anpassungsoption an den Klimawandel darstellt. Aber auch die Überlegung, das Risiko von Hitze-, Trocken-, Sturm- und Insektenschäden durch Umwandlung von Reinbeständen in Mischwaldbestände auf mehrere Baumarten mit unterschiedlichen Anpassungskapazitäten zu verteilen, ist eine wesentliche Komponente in der bisherigen Anpassungsstrategie der Forstbetriebe an den Klimawandel (Goemann et al., 2015, S. 207). Die Bayerischen Staatsforste streben beispielsweise mit dem von ihnen entwickelten *4-Baum-Konzept* flächendeckend an, je Waldbestand mindestens vier Baumarten in angemessenen Anteilen (mindestens 5 %) zu erhalten oder einzubringen. Davon müssen mindestens drei *Baumarten klimatolerant* sein, d.h. sie ertragen Auswirkungen des

Klimawandels voraussichtlich besser und können somit wichtige Waldfunktionen aufrechterhalten. Dabei sollen neben den heimischen Hauptbaumarten als Basis (z.B. Stiel-Eiche, Trauben-Eiche, Buche), seltene heimische Baumarten (z.B. Feldahorn, Elsbeere, Vogelkirsche) besonders gefördert und alternative Herkünfte heimischer Baumarten (z.B. rumänische Weißtanne) sowie nichtheimische Baumarten (z.B. Esskastanie, Douglasie) in angemessenem Umfang beigemischt werden (BaySF, 2020, S. 3 ff.). Bei der Auswahl der Baumarten sind deren spezifische Standortansprüche bezüglich des Bodens, Klimas sowie Lichtbedarfs und deren Wuchsverhalten zu berücksichtigen und in die weitere waldbauliche Behandlung einzubeziehen. Einen guten Überblick über standörtliche Baumartenansprüche bietet z.B. die Praxishilfe *Klima-Boden-Baumartenwahl* der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF), die für den Landkreis Forchheim und seine Umgebung aufzeigt, dass beispielsweise die Baumarten Buche, Stieleiche, Traubeneiche und Spitzahorn ein deutlich geringeres Anbaubaurisiko bei fortschreitendem Klimawandel aufzeigen als die Nadelbäume Fichte, Weißtanne und Lärche (LWF, 2019). Aufgrund ihrer Trockenheits- und Hitzetoleranz werden im Landkreis Forchheim und seiner Umgebung in Zukunft vor allem auf flachgründigen und/ oder tonreichen Standorten mit geringer Wasserverfügbarkeit verschiedene *Eichenarten*, der *Speierling*, die *Elsbeere*, die *Mehlbeere*, die *Vogelkirsche* und der *Feldahorn* als heimische (Licht-)Baumarten an Bedeutung gewinnen, während v.a. die Fichte und zu gewissen Teilen auch die Buche aufgrund ihrer Sensitivität gegenüber Trockenheit und Hitze an Bedeutung verlieren werden (LWF, 2019; Walentowski et al., 2017).

4.4.1.2 Naturverjüngung

Die *Naturverjüngung* bietet gegenüber der Pflanzung (Kunstverjüngung) beachtliche Vorteile: i) eine ungestörte Wurzelentwicklung, die ein besseres Erschließen von Wasserressourcen ermöglicht, ii) eine große genetische Vielfalt mit standörtlich angepassten Baumarten, iii) eine erhöhte Vitalität und Stabilität der Bäume sowie iv) geringere Kulturgründungskosten. Abhängig von der Bestandesart müssen verschiedene Maßnahmen eingeleitet werden, um eine zielgerichtete Naturverjüngung mit hitze- und klimatoleranten Baumarten zu erreichen. So sind in Nadelholz-Reinbeständen vor der Einleitung der Naturverjüngung frühzeitig *Mischbaumarten durch Voranbau* einzubringen bzw. Mischbaumarten als Samenbäume zu fördern. Erst wenn sich die (vorangebauten) Mischbaumarten auf ausreichender Fläche etabliert haben, soll durch Nachlichten – abgestimmt auf die Lichtbedürftigkeit der jeweiligen Baumarten – und ggf. durch Bodenbearbeitung auf geeigneten Standorten eine Naturverjüngung eingeleitet werden. Bei den vorangebauten Mischbaumarten sind neben deren Klimatoleranz deren Herkunft und Standorteigenschaften zu berücksichtigen. Künftige Bestockungsziele sind jeweils gemischte, qualitativ hochwertige und klimaangepasste Mischbestände. Die Verjüngung richtet sich auch bei Laubholz nach der Lichtbedürftigkeit der jeweiligen Baumart, die entweder durch Femelschlag (z.B. Buche, Edellaubhölzer) oder einzelstammweise Entnahme mit späterem Lochhieb (z.B. Eiche) eingeleitet wird. Die Vitalität der Naturverjüngung ist durch Minderung der Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe zwischen den beteiligten Baumarten, dem Altbestand und der Begleitvegetation zu fördern (Ruppert et al., 2014, S. 6 ff.). Außerdem soll das Baumartenspektrum der Naturverjüngung zugunsten klimatoleranter Baumarten reguliert werden. Neben diesen

„erzieherischen“ Maßnahmen, ist die Naturverjüngung insbesondere durch ein konsequentes *Jagdmanagement* vor Schalenwildverbiss zu schützen. So fordert auch das im Bayerischen Jagdgesetz (BayJG) konkretisierte Waldverjüngungsziel, dass durch Bejagung insbesondere die natürliche Verjüngung von standortsgemäßen Baumarten – die für den Waldumbau so wichtig ist – ohne Schutzmaßnahmen ermöglicht werden soll (Art.1 Abs.2 Nr.3 BayJG). Ein waldverträglicher, durch Bejagung regulierter Schalenwildbestand, im Landkreis Forchheim insbesondere Rehwildbestand, trägt damit maßgeblich zur Anpassungsfähigkeit der Forstwirtschaft an den Klimawandel bei. Schutzmaßnahmen der Naturverjüngung bzw. Forstkulturen sind auf großer Fläche nicht zielführend, da größere Zäune kaum rehwildrein zu halten sind und Einzelschutzmaßnahmen wie Wuchshüllen nur einzelne Pflanzen schützen können. Einer an der Gesamtökologie orientierten Jagd kommt somit eine Schlüsselrolle beim Umbau der heimischen Wälder zu.

4.4.1.3 Waldbauliche Maßnahmen

Eine rechtzeitige und selektive *Durchforstung* trägt entscheidend dazu bei, dass aus dem reichen Pool der natürlichen Waldverjüngung die standörtlich wie klimatisch am besten angepassten Baumarten gefördert werden, sich so stabile und hochwertige Bestände entwickeln können und eine *Überbestockung vermieden* wird. Bäume mit hohen h/d-Werten (Verhältnis Höhe zu Brusthöhendurchmesser), kurzen Kronen oder starken Baumschäden sowie Baumarten mit geringer Klimatoleranz sollten bei Durchforstungen entnommen und Z-Bäume (Z=zukunftsfähig) gefördert werden (LWF, 2016). Ergebnisse deuten des Weiteren an, dass undurchforstete, überbestockte (v.a. Nadel-)Wälder im Vergleich zu stark durchforsteten Beständen sehr viel mehr Wasser verbrauchen, wodurch der Bodenwassergehalt sowie die Transpiration der Ausleseebäume im überbestockten Bestand stark vermindert waren (Gebhardt et al., 2012, S. 8 ff.).

Zur Vermeidung von Hitze- und Strahlungsschäden an lichtexponierten Laubblättern und dünner Rinde sollen *Bestände möglichst geschlossen bleiben*, *Kahlschläge vermieden* und *dichte Waldränder* mit hitze- und trockentoleranten Baum- und Straucharten etabliert werden. Untersuchungen zum Kiefernsterben in Franken zeigten z.B., dass 17 % der untersuchten Kiefern nach dem Trockenjahr 2015 abstarben. Dabei waren 73 % der abgestorbenen Kiefern an südexponierten Waldrändern gewachsen. Es wurde eine geringere Vitalität der Kiefern insbesondere in den ersten 50 m vom Waldrand aus festgestellt (Buras et al., 2018, S. 4 f.). Untersuchungen auf Kahlflächen nach einem Sturmwurf zeigten außerdem, dass in den ersten drei Jahren nach dem Sturmwurf im Mittel 2,6 cm Humusaufgabe aufgrund erhöhter Mineralisation (Kohlenstoffverluste betragen ca. 10 t/ha) und Erosion verlorgen gingen. Mit dem Kohlenstoff gehen dem Standort auch Wasserspeicherkapazität und Austauschkapazität für Nährstoffe verloren. Außerdem wurden wichtige Nährstoffe wie Stickstoff (bis zu 250 mg/l Nitrat!), Phosphor und Kalium mit dem Sickerwasser ausgetragen. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, dass eine *Vorausverjüngung* bereits vor einer möglichen Bestandsauflösung etabliert ist, um – aus dem Humus durch Mineralisation freiwerdende – Nährstoffe im Ökosystem zu halten (Kohlpainter et al., 2014, S. 36 f.). Auch kann die angehende Naturverjüngung von reduzierten Hitze- und Strahlungsschäden unter dem Bestandesschirm profitieren.

Dabei ist jedoch der Konkurrenzdruck der Altbäume bei der Wasserversorgung zu beachten. Entsprechend ihres Lichtbedürfnisses ist über der aufwachsenden Naturverjüngung zielgerichtet nachzulichten.

4.4.1.4 Wegebau

Der Beitrag des Waldes durch die starke Zerschneidung und den Eingriff in den Bodenwasserhaushalt durch den Forststraßenbau ist nicht unbedeutend. Bei steilem Gelände kommen die tief in das Bodenprofil einschneidenden Gräben auch in den Bereich, in dem Zwischenabfluss fließt. Dadurch machen die Gräben aus dem abflusdämpfenden bzw. trockenheitsmindernden Zwischenabfluss deutlich schneller fließenden, abfluss- und trockenheitsfördernden Oberflächenabfluss. Wälder mit Wegseitengräben im steilen Gelände können dann bei Starkregenereignissen ähnlich schnell Abfluss liefern wie landwirtschaftliche Flächen, insbesondere hangabwärts gleichzeitig aber auch Trockenheit verstärken (Seibert & Auerswald, 2020, S. 146 f.). Das *Vermeiden von Wegebau* in steilem Gelände, das *Anlegen von Retentionsbecken* oder *verkrauteten Abflussmulden* sowie *Wiederversickerung* können dem beschriebenen Effekt entgegenwirken. Wenn Wegebau notwendig ist und es das Gelände zulässt, sollten die Wege möglichst entlang von Höhenrücken geführt werden, da dort die Wege wenig Wasser sammeln und dementsprechend weniger befestigt sein müssen und weniger Unterhalt erfordern (Seibert & Auerswald, 2020, S. 211 ff.).

4.4.2 Sturmschäden

Stürme sind schon immer eine der bedeutendsten Schadfaktoren für die Forstwirtschaft und können beispielsweise durch Holzentwertung oder Hiebsunreifeverluste hohe ökonomische Schäden verursachen (Goemann et al., 2015, S. 191). Die Vulnerabilität von windexponierten Waldbeständen gegenüber Sturmschäden durch Winterorkane oder Gewitterstürme hängt entscheidend von der Baumart mit ihrem Wurzelsystem (Fichte > Douglasie > Kiefer > Buche > Eiche), der ansteigenden Dimension der Bäume (Höhe, Durchmesser) (Goemann et al., 2015, S. 205) sowie von der Geschlossenheit und Mischung der Bestände und dem Schutz von intakten Waldrändern ab.

4.4.2.1 Waldumbau und Reduktion der Umtriebszeit

Zum einen kann der hohen Vulnerabilität der Fichte gegenüber Stürmen durch den *Umbau von Reinbeständen in weniger anfällige Mischwälder* entgegengewirkt werden, insbesondere durch Anbau von sturmstabilen Pfahl- und Herzwurzeln wie der Eiche und Buche. Zum anderen kann eine *Verkürzung der Zieldurchmesser* windwurfgefährdeter Baumarten deren Beibehaltung selbst in windexponierten Nadel-Mischwäldern erlauben. Eine Reduktion der *Umtriebszeiten* (durchschnittlicher Produktionszeitraum) für sturmgefährdete Baumarten wie der Fichte kann zu einer erheblichen Verminderung der Schadensvulnerabilität führen (Goemann et al., 2015, S. 207).

Des Weiteren können Bestände durch frühzeitige und regelmäßige Durchforstungen der Wälder stabilisiert werden: Das Verhältnis der Höhe eines Baumes zu seiner Dicke (h/d-Verhältnis) trägt maßgeblich zur Stabilität des Einzelbaumes und somit des gesamten Bestandes bei.

Schließlich können *gestufte, dichte Waldränder* mit hitze- und trockenoleranten Baum- und Straucharten die Stabilität des angrenzenden Waldbestandes gegen Sturmschäden erhöhen, indem Waldränder die Luftströmung durch das Höhenprofil und die Vegetationsdichte am Waldrand entscheidend beeinflussen. Bei einem sanft ansteigenden Waldrand wird ein Teil der bodennahen Luftströme langsam nach oben über das Kronendach gelenkt, während der andere Teil abgebremst in den Bestand einströmt. Dadurch werden Turbulenzen gemindert und die Windwurf- und Bruchgefahr reduziert (Costa, 2000, S. 3). Diese Schutzfunktion von Waldrändern könnte jedoch mit der naturnahen Waldwirtschaft und der Abkehr von Nadelholz-Reinbeständen an Bedeutung verlieren (Schröder et al., 2016, S. 18 f.). Zusätzlich bringt eine hohe Vielfalt an Strukturen am/ im Waldrand hohe ökologische und naturschutzfachliche Wertigkeiten oder zumindest Potentiale mit sich (Schröder et al., 2016, S. 27 f.). Außerdem kann die Bedeutung von Waldrändern insbesondere zur Vermeidung von Hitze- und Trockenschäden im Bestand zunehmen (siehe Abschnitt 4.4.1.1).

4.4.3 Schädlingsbefall

Um das Risiko des Schädlingsbefalls einzudämmen, eignen sich für den Landkreis Forchheim folgende Maßnahmen.

4.4.3.1 Waldumbau

Wie bereits bei Trocken-, Hitze- und Sturmschäden beschrieben, soll auch das Risiko eines vermehrten Auftretens von Schadinsekten durch *Umwandlung von Reinbeständen in Mischwaldbestände* durch *Diversifizierung* verteilt und vermindert werden – gemäß dem Motto "wer streut, rutscht nicht" (Kölling et al., 2010). Entscheidend ist auch hier, dass eine *Vorausverjüngung bereits im Bestand etabliert* ist und diese *durch die Jagd vor Schalenwild geschützt* wird.

4.4.3.2 Risikomanagement und Waldschutz

Wegen der Veränderungen der Waldschutzrisiken in Folge des Klimawandels müssen die bisher verwendeten *Risikomanagementmaßnahmen angepasst oder intensiviert werden sowie Strategien und Behandlungskonzepte für neu auftretende Schädlinge entwickelt werden*. Wichtig dafür ist, dass aktuelle Ergebnisse der Waldschutzforschung an die forstliche Praxis kommuniziert werden und die forstliche Praxis diese Informationen waldbaulich zu berücksichtigen versucht (Petercord et al., 2009, S. 6 f.). Im Folgenden sollen beispielhaft drei für den Landkreis Forchheim relevante Forstschädlinge genannt und mögliche Gegenmaßnahmen kurz beschrieben werden.

Der wirtschaftlich bedeutendste Forstschädling in Bayern wird wohl zumindest in naher Zukunft der Buchdrucker bleiben (Petercord et al., 2009, S. 6 f.). Ein erfolgreich besiedelter Käferbaum stellt ein Infektionspotential für etwa 50 weitere Bäume dar. Diese Zahl verdeutlicht, wie wichtig es im Rahmen des Risikomanagements ist, *befallene Bäume und Infektionsherde frühzeitig am ausgeworfenen Bohrmehl zu erkennen und zu entnehmen bzw. zu entrinden oder – als letztes Mittel – mit Insektiziden zu behandeln*, bevor die Altkäfer wieder ausfliegen, um Geschwisterbruten anzulegen (Lobinger, 2002b, S. 11). Bei niedrigen Ausgangsdichten des Buchdruckers besteht kein konkretes Massenvermehrungsrisiko, aber es zeigt sich, dass bei kleinflächig erhöhtem Brutraumangebot –

insbesondere nach Sturmereignissen – in den Folgejahren erhöhter Überwachungsbedarf besteht, um befallene Bäume rasch identifizieren und abtransportieren zu können. Denn Käferpopulationen können selbst kleinräumig stark anwachsen und bei günstigen Bedingungen zu Massenvermehrung gelangen (Lobinger, 2002a, S. 12 f.).

Vom Klimawandel profitieren wird auch der gesundheitsgefährdende Eichenprozessionsspinner. Eichen ohne Eichenprozessionsspinner wird es künftig immer weniger geben. Demgegenüber steht das Interesse, die Eiche als Baumart, die eine hohe Hitze- und Trockenheitstoleranz sowie ein enormes Regenerationspotential nach Schäden z.B. durch Insektenfraß besitzt, sowohl im Wald als auch im öffentlichen Raum zu fördern. Bereits jetzt ist jedoch der mögliche Befall durch den Eichenprozessionsspinner ein Grund für Skepsis bei der Einbringung der Eiche im Zuge des Waldumbaus. Zu starker Vermehrung kommt es besonders in Trockenjahren, wobei lichte Eichenwälder, Bestandesränder und Einzelbäume in warmtrockenen Regionen oder Jahren bevorzugt werden. Der Befall durch den Eichenprozessionsspinner stellt jedoch vor allem eine Gefährdung der Gesundheit dar, während flächiger Kahlfraß nicht üblich ist (Lobinger & Wallerer, 2020). So wird der Eichenprozessionsspinner im Forstrevier Forchheim beispielsweise durch Absaugen, ganz ohne den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, von befallenen Bäumen entfernt. Entscheidend ist auch die Prävention durch den frühzeitigen Waldumbau von anfälligen Reinbeständen in resiliente Mischwälder. Hier kann sich eine Gesellschaft von teils *spezialisierten Gegenspielern* wie Raupenfliegen und Schlupfwespen ausbilden, die zwar den Aufbau einer Vermehrung des Eichenprozessionsspinners nicht verhindern können, aber neben weiteren Faktoren wie Witterung und Nahrungskonkurrenz zu deren Regulierung beitragen können. Im Offenland hingegen halten sich Populationsdichten oft chronisch auf erhöhtem Niveau (Lobinger & Wallerer, 2020).

Unter ähnlichen Witterungsbedingungen vermehrt sich auch der Schwammspinner wie der Eichenprozessionsspinner. Im Gegensatz zum Eichenprozessionsspinner kann der Schwammspinner allerdings Forstflächen in eine bestandesbedrohende Gesamtsituation bringen, weshalb dessen Populationsdichte unter solchen Umständen mit Pflanzenschutzmitteln reduziert wird (Lemme et al., 2019). Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln kann nur als jeweils letzte Möglichkeit in Erwägung gezogen werden. Natürlich ist der Einsatz von Insektiziden sorgfältig unter Berücksichtigung des Natur- und Gewässerschutzes abzuwägen und *Rat von Fachpersonen* einzuholen (Lobinger & Wallerer, 2020).

4.4.3.3 Lagerung

Kalamitätsereignisse durch Schadinsekten und/ oder Windwurf stellen die Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer vor die Herausforderung, große Mengen Holz verkaufen zu müssen. Eine rechtzeitige Katastrophenvorsorge inkl. Holzlagerkonzepten kann ggf. finanzielle Schäden minimieren.

Entscheidend ist die Holzlagerung außerhalb des Waldes, um einen Schädlingsbefall der gesunden Bäume zu vermeiden. Hier sind langfristige Lagerkonzepte nötig. *Zur langfristigen Konservierung von Rundholz* hat sich seit Jahrzehnten die Nasslagerung durch Berieseln bewährt. Dies erfordert allerdings einen hohen Investitions- und Organisationsaufwand. Im trockenen Franken scheitert der Aufbau von Nasslagerkapazitäten oft am verfügbaren

Wasser. Nasslager dürfen weder in Überschwemmungsgebieten noch FFH- oder Wasserschutzgebieten errichtet werden. Für kleinere Holzmenge können ggf. Trockenlager umhüllt von luftdichten Folien zum Einsatz kommen, da sie genehmigungsfrei und räumlich flexibel sind. Das Entscheidende aber ist, sich frühzeitig mit Schadensszenarien auseinanderzusetzen. Waldbesitzerinnen und Waldbesitzer sollten im Verbund mit ihren forstlichen Zusammenschlüssen bereits in naher Zukunft Lagerkonzepte entwickeln (Lutze, 2014, S. 45 ff.). Deren Umsetzung sollte regelmäßig in der kommunalen Bauleitplanung Berücksichtigung finden.

Für weitere Informationen zur Holzlagerung wird auf Wauer et al. (2013) und Lutze (2014) verwiesen, die im LWF Wissen 71 eine aktualisierte, ausführliche Beschreibung der gängigen Holzlagerungsverfahren herausgegeben haben.

4.4.4 Spätfrostschäden

Frost kann zu verschiedenen Schäden an Waldbäumen führen, z.B. Erfrierungen an Trieben, Aufplatzen der Rinde, Holzrisse, Wassermangel und Entwurzelung von Baumsämlingen. Bei Spätfrostereignissen im Frühjahr erfrieren am häufigsten frische Triebe von Verjüngungspflanzen. Durch die Wahl *geeigneter Baumarten, waldbauliche Maßnahmen* und *geeignete Standorte* lassen sich Frostschäden teilweise vermeiden.

Zur Vermeidung von Spätfrostschäden sollte der Anbau frostempfindlicher Baumarten in typischen Frostlagen, insbesondere Geländesenken, in denen sich in Strahlungs Nächten Kaltluftseen bilden können, vermieden werden. In diesen Bereichen sollten vorrangig *spätfrosttolerante Baumarten* verwendet werden. Die besonders empfindlichen Verjüngungspflanzen können außerdem *unter Schirm* vor Frostschäden bewahrt werden, indem ein lockerer Schirm von Altbäumen die nächtliche Abkühlung abdämpft. Dies hat sich für die Verjüngung spätfrostempfindlicher Baumarten wie der Tanne oder der Rotbuche bewährt. Das gleiche Prinzip gilt für Kahlfelder, auf denen die Gefahr von Spätfrostschäden besonders groß ist. Hier kann die Verjüngung durch den Schutz von natürlich angesamten, frostunempfindlichen Pionierbaumarten wie Birken, Salweiden oder Vogelbeeren geschützt werden. Sobald die Verjüngung allerdings zu sehr beschattet oder bedrängt wird, ist eine Pflege notwendig.

Einen Überblick über die Spätfrostempfindlichkeit von Baumarten gibt die folgende Tabelle. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die heimische und (bisher) so konkurrenzstarke Rotbuche unter die höchste Gefährdungsklasse fällt (LWF, 2015).

Tabelle 1: Spätfrostempfindlichkeit verschiedener Baumarten (LWF 2015, S. 3)

Baumart	Grad der Gefährdung	Besonderheiten
Eberesche (Vogelbeere), Grauerle, Sandbirke, Moorbirke, Schwarzkiefer, Waldkiefer, Weymouthskiefer (Strobe), Zirbelkiefer, Zitterpappel (Aspe), Zuckerahorn	1 (sehr gering)	- geeignet als Naturverjüngung oder für die Aufforstung von großen Kahlf lächen auf Verebnungen und Senken mit besonders häufigen und scharfen Spätfrosten - geeignet als schützender Vorwald, unter dessen lockerem Schirm nach wenigen Jahren empfindlichere Baumarten gepflanzt oder als Naturverjüngung übernommen werden können
Bergahorn, Bergulme, Europäische Lärche, Japanische Lärche, Feldahorn, Feldulme, Flatterulme, Gemeine Eibe, Gemeine Fichte, Mehlbeere, Robinie (Scheinakazie), Roteiche, Schwarzerle, Silberweide, Stieleiche, Winterlinde	2 (gering bis mäßig)	- im Rahmen der Kulturplanung lassen sich größere Schäden weitgehend verhindern, indem man Spätfrostlagen meidet
Douglasie, Elsbeere, Flaumeiche, Hainbuche, Hybridnuss, Paulownia (Blauglockenbaum), Schwarzpappel, Sommerlinde, Speierling, Spitzahorn, Traubeneiche, Traubenkirsche, Vogelkirsche, Wildbirne	3 (erhöht)	- häufige Frostschäden in Spätfrostlagen: Ausfälle (Absterben), qualit äts mindernde »Verwieselung« und Gefahr, durch weniger spätfrostempfindliche Baumarten überwachsen zu werden
Edelkastanie, Gemeine Esche, Gemeine Walnuss, Küstentanne, Roßkastanie, Rotbuche, Schwarznuss, Weißtanne, Wildapfel	4 (groß)	- besonders gefährdet in ungeeigneten Lagen wie Mulden (Kaltluftseen), größeren Verebnungen, zu schwach geeigneten Hängen, Hängen mit Kaltluftstau (z. B. durch Hecken) und insbesondere Kahlf lächen im Wald > 0,5 ha - Pflanzung nur an Hängen und Kuppen, an denen die Kaltluft abfließen kann oder unter/neben einem lockeren Schirm von Altbäumen oder Weichlaubhölzern (Kronenschlussgrad mindestens 20%)

4.4.5 Bodenschutzmaßnahmen aufgrund milderer und feuchterer Winter

Der vermehrte Einsatz von produktiveren und meist schwereren Maschinen erhöht die Gefahr häufig irreversibler Bodenstrukturveränderungen erheblich. Die Folgen einer Befahrung ergeben sich aus der Tragfähigkeit des Bodens einerseits und der maschinenbedingten Auflast andererseits. Spuren sind das äußerliche Erscheinungsmerkmal nach einem Maschineneinsatz. Sie geben Hinweise auf die Befahrbarkeit von Böden und auf die Intensität von Bodenschäden. Prinzipiell gilt, dass der *Maschineneinsatz während zu feuchter Bedingungen vermieden* und der Einsatzzeitpunkt unter Berücksichtigung der Witterung geplant werden soll. Aufgrund feuchterer und milderer Winter ist zu empfehlen, den *Maschineneinsatz möglichst auf Jahreszeiten mit geringen Bodenwassergehalten zu legen* – wie den Spätsommer oder Herbst/ Frühwinter. Außerdem entscheidet der Kontaktflächendruck einer Maschine zusammen mit der Tragfähigkeit des Bodens über die Art der Spurausprägung. Der Kontaktflächendruck kann maschinenindividuell durch eine *Erhöhung der Radzahl* um bis zu 55 %, durch das *Absenken des Reifeninnendrucks* um bis zu 35 % und durch eine *erhöhte Reifenbreite* um bis zu 10 % verringert werden. Des Weiteren kann der Kontaktflächendruck durch den Einsatz von Raupenlaufwerken, dem Aufziehen von Moorbändern, durch eine *Verringerung der Radlast* und durch das Auslegen von Astmaterial auf die Rückegassen bewirkt werden. Radlasten von 4 bis 4,5 Tonnen stellen einen wichtigen Schwellenwert für den Bodenschutz dar, der vor allem auf empfindlichen Standorten möglichst nicht überschritten werden soll (LWF, 2012).

Außerdem ist ein angepasstes Feinerschließungssystem die Grundlage für die bodenschonende und nachhaltige Bewirtschaftung von Waldbeständen. Rückegassen und Rückewege dienen Holzernte- und Rückemaschinen als dauerhafte Verbindungsachsen zwischen Lkw-befahrbaren Forstwegen und in den Hiebsorten. Die Bodenbelastung durch die Forstmaschinen konzentriert sich damit ausschließlich auf ausgewiesene Gassen und Wege (LWF, 2017). Es sei an dieser Stelle auf Abschnitt 4.1.1.1 (Wegebau) verwiesen und angemerkt, dass sowohl Trockenheit als auch Hochwasser durch Wegebau verstärkt werden können.

4.5 Landwirtschaft

Etwa 45 % der Fläche des Landkreises Forchheim werden landwirtschaftlich genutzt. Damit sind landwirtschaftliche Flächen landkreisweit die größte Landnutzungsform (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2020, S. 13). Die Landwirtschaft im Landkreis Forchheim umfasst insbesondere den Pflanzenbau und die Grünlandwirtschaft, in geringem Umfang auch Tierhaltung und Teichwirtschaft. Der traditionell wichtige Obstbau im Landkreis Forchheim wird in einem eigenen Kapitel beschrieben (vgl. Abschnitt 4.3).

4.5.1 Starkregen

Im Bereich der Landwirtschaft sind folgende Maßnahmen hinsichtlich des Starkregenisikos für den Landkreis Forchheim zu empfehlen.

4.5.1.1 Bodenbearbeitung, Boden- und Erosionsschutz

Die mittlere Erosivität von Regen, d.h. die Fähigkeit von Regen, Bodenabtrag auszulösen, nahm in Deutschland von der Periode 1960-1990 bis zur Periode 2001-2017 flächendeckend um etwa 65 % zu (Auerswald et al., 2019, S. 1819). Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich die Regenerosivität bayernweit in der Periode 2021-2050 im Vergleich zur Periode 1971-2000 verdoppeln wird. Bedeutend sind diese Ergebnisse hinsichtlich der Klimawirkung daher, weil – wegen der multiplikativen Verknüpfung der Faktoren der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung²⁴ – eine Erhöhung der Regenerosivität im gleichen Maß eine Zunahme des Bodenabtrags bewirkt. Nimmt also die Regenerosivität bis 2050 um den Faktor 2 zu, wird sich auch der Bodenabtrag verdoppeln, sofern nicht noch weitere Änderungen bei anderen Faktoren einsetzen (Auerswald et al., 2020, S. 61 & 68).

Maßnahmen zum *Erosionsschutz* sind zum Teil komplementär zu den Maßnahmen zur Hochwasserminderung im ländlichen Raum (siehe Abschnitt 4.1.1.1), auch wenn Erosionsschutzmaßnahmen (schlagspezifisch; Ziel ist v.a. die Reduktion der Sedimentkonzentration) nicht mit Maßnahmen zur Abflussminderung (gesamtes Einzugsgebiet/ gesamten Fließpfad betreffend, daher gesamtgesellschaftliche Aufgabe; Ziel ist v.a. die Reduktion der Scheitelanstiegszeit) verwechselt werden dürfen (Seibert & Auerswald, 2020, S. 114 f.).

Eine sehr wichtige und effektive Maßnahme im Sinne des Boden- und Erosionsschutzes ist, eine möglichst *hohe Bodenbedeckung* ($\geq 30\%$) über das Jahr zu gewährleisten (LfULG, 2009, S. 99 f.; Seibert & Auerswald, 2020, S. 114 f.). Es gibt bereits zahlreiche kurzfristige Maßnahmen, dieses Ziel zu erreichen (LfULG, 2009, S. 99 f.; Seibert & Auerswald, 2020):

- *eine konservierende Bodenbearbeitung*, wobei v.a. die Mulchdirektsaat ein sehr wirkungsvolles Instrument ist, aber auch z.B. die Streifenbearbeitung ("Strip Tillage")

²⁴ Die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) berechnet den Bodenabtrag A [$t\ ha^{-1}\ a^{-1}$] als Produkt von sechs Faktoren:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Dabei ist R die Regenerosivität (in [$N\ h^{-1}$] für Einzelregen bzw. in [$N\ h^{-1}\ a^{-1}$] für die Jahressumme), während die anderen Faktoren den Einfluss von Bodenerodierbarkeit (K) [($t\ ha^{-1}$) / ($N\ h^{-1}$)], Hanglänge (L), Hangneigung (S), Bewirtschaftung (C) und langfristigen Erosionsschutzmaßnahmen (P) abbilden.

- die *Minimierung der Zeitspannen ohne Bodenbedeckung*, u.a. durch Fruchtartenauswahl, Zwischenfruchtanbau, Untersaaten und Strohmulch

Mittel- und langfristig können auch folgende Maßnahmen die Erosion wesentlich reduzieren (LfULG, 2009, S. 99 f.; Seibert & Auerswald, 2020):

- die *Fruchtfolgestaltung* unter Nutzung natürlicher Vorteilswirkungen einzelner Fruchtarten (z.B. Bodenstrukturstabilisierung, lang anhaltende Bodenbedeckung, ...)
- die *Vermeidung bzw. Beseitigung infiltrationshemmender Bodenverdichtungen*
- eine *dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung* mit (Mulch-)Direktsaat
- eine *wassererosionsmindernde Flurgestaltung*, dabei insbesondere die Anlage *länglicher Schläge quer zum Gefälle* mit Wechsel der Fruchtart oder Einsaat abflussbremsender Grasstreifen, das Etablieren *begrünter Hangmulden* (grassed waterways) oder die Anlage von *Erosionsschutzstreifen* in Form von Hecken oder Agroforstsystemen mit schnellwachsenden Baumarten als Schlagunterteilung

Eine sehr wirksame und mit großer Akzeptanz bei den Landnutzerinnen und Landnutzern verbundene Erosionsschutzmaßnahme für den Ackerbau wird wohl die *konservierende Bodenbearbeitung* sein, wobei eine nahezu vollständige Vermeidung der Bodenerosion durch das (Mulch-)Direktsaatverfahren erreicht werden kann (LfULG, 2009, S. 100). Konservierende Bodenbearbeitungsverfahren und dabei insbesondere die Direktsaat können im Vergleich zum Pflugeinsatz deutliche Kostenvorteile um bis zu 100 €/ha in der Arbeitserledigung erzielen (LfULG, 2009, S. 101). Neben einem deutlich geringeren Erosionsrisiko erhöhen die Mulchdirektsaat und auch die Streifenbearbeitung im Vergleich zu konventionell bestellten Schlägen das Infiltrationsvermögen für Niederschläge um 10 bis 20 % (Seibert & Auerswald, 2020, S. 120).

Ein weiterer Vorteil der konservierenden Bodenbearbeitung ist außerdem, dass im Gegensatz zum Pflugeinsatz bei zunehmender Trockenheit kein verstärkter Materialverschleiß durch Abrieb im Boden auftritt und die Bodenbearbeitung weniger ressourcen- und arbeitsintensiv ist.

Im Landkreis Forchheim, genauer im Einzugsgebiet der Wiesent, wurden sehr erosionsgefährdete und sehr lokale Erosions-Hot-Spots ausgemacht (Strohmeier & Bruckner, 2013), für welche die oben genannten Maßnahmen besonders gelten und bei denen diese Maßnahmen ggf. in Kooperation mit einem boden:ständig-Projekt umgesetzt werden können (vgl. www.boden-staendig.eu).

4.5.1.2 Beeinträchtigung der Gewässerqualität

Die Gewässerqualität kann zum einen durch diffuse Einträge und zum anderen durch Niedrigwasser gemindert werden. Im Folgenden werden entsprechende adaptive Maßnahmen beschrieben.

4.5.1.2.1 Diffuse Einträge

Zur Verhinderung von i) Sauerstoffmangel und ii) Eutrophierung von Gewässern sowie iii) zur Verminderung toxikologischer Wirkungen auf Organismen sollten Schad- und Nährstoffeinträge durch geeignete Maßnahmen nach Möglichkeit auf ein natürliches Maß beschränkt werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-60). Problematisch sind dabei vor allem diffuse Einträge aus der Landwirtschaft, denen insbesondere durch i) eine beständige *Vermeidung von Bodenabträgen* zur Reduktion des Eintrags partikulär gebundener Nährstoffe und der Kolmation des Gewässers (für weitere Information siehe Abschnitt 4.5.1.1), ii) *Rückhaltebecken* zur Dämpfung von Konzentrationsspitzen von Nährstoffen und Agrochemikalien und durch iii) eine *effektive Dünger- und PBSM-Nutzung* entgegengewirkt werden kann (LAWA, 2017, S. Anhang II-60; Seibert & Auerswald, 2020, S. 136). Gerade auf den in der Studie von Strohmeier & Bruckner (2013) festgestellten Erosions-Hot-Spots im Einzugsgebiet der Wiesent sollten prioritär Gewässerschutzmaßnahmen durch Erosionsschutz durchgeführt werden.

Eine *effektive Dünger- und PBSM-Nutzung* kann u.a. durch die Anwendung der kostenintensiven *Precision Farming-Technologie* ermöglicht werden, die darauf abzielt, das Energie- und Betriebsmittelpotential zu senken und umweltentlastende Effekte nachhaltig zu gewährleisten. Durch die Precision-Farming-Technologie können positive ökonomische wie ökologische Effekte erreicht werden, z.B. die Senkung des Herbizideinsatzes um bis zu 60 %, die Senkung des Fungizideinsatzes um bis zu 30 % und die Senkung des Düngemittelsatzes um bis zu 25 % (LfULG, 2009, S. 122 f.). So wurde beispielsweise in einem Streifenversuch gezeigt, dass sich die Kornerträge der Wintergerste durch Precision Farming in Form von teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung trotz einer um 50 kg N/ha geringeren Düngeapplikation nicht von der Standardvariante (190 kg N/ha) unterschied und sich der Stickstoff-Saldo deshalb signifikant von 51 kg/ha (Standardvariante) auf 13 kg/ha (Precision Farming) verringerte (Spicker, 2016, S. 190 f.).

Es sei an dieser Stelle betont, dass primär durch Grundwasserabsenkung und Drainage das Grünland in Bayern zwischen 1960 und 2018 um 641.000 ha abgenommen hat – insbesondere entlang von Flussläufen und Geländesenken. Bezogen auf die Gesamtlänge des Fließgewässernetzes in Bayern von rund 100.000 km entspricht dieser Verlust einem Grünlandstreifen von 32 m Breite auf beiden Seiten aller Fließgewässer, was weitreichende – überwiegend negative – Folgen für das hydrologisch-ökologische System hat (Geist & Auerswald, 2019), so z.B. diffuse Einträge ins Gewässer. Gründe für den Rückgang der Grünlandnutzung sind vor allem Grundwasserabsenkungen und Drainagen, wodurch Grünland, das einen wesentlich höheren Bedarf an leicht verfügbarem Wasser hat als Ackerkulturen, unwirtschaftlich ist und Ackerbau vielerorts bevorzugt wird. Für eine wirtschaftliche Grünlandnutzung²⁵ ist insbesondere eine *Wiedervernässung* von drainierten Tallagen notwendig, um die bevorzugten Standorteigenschaften von Grünland wiederherzustellen (Auerswald, 2019, S. 17 ff.). Die

²⁵ Der Rückgang des Grünlandes wird meist mit einer schlechteren Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum Ackerbau begründet. Dieses Argument ist allerdings nicht schlüssig und widerspricht den Fakten (Auerswald, 2019). So weisen die Buchführungsergebnisse bayerischer Betriebe in den Jahren 2000 bis 2018 gleich hohe Einkommen sowohl je Fläche als auch je Familienarbeitskraft für Futterbaubetriebe (mit ca. 50 % Grünland) wie für Ackerbaubetriebe aus (Schmidlein und Wolf, 2019, nach Auerswald, 2019).

Wiederherstellung von Grünland entlang von wiedervernässten Flussläufen bzw. sein Erhalt hat eine Vielzahl von positiven Folgen, etwa Aspekte des Gewässerschutzes, das Abpuffern von Trockenheit oder aber auch eine Klimaschutzwirkung wie das Speichern von CO₂ im Boden (Geist & Auerswald, 2019, S. 14). Das Wasserwiesen-Projekt im Landkreis Forchheim (<https://www.waesserwiesen-franken.de/de/>) zeigt eindrucksvoll die vielen positiven Wirkungen von „Wiesen“ im Landkreis. Im Landkreis Forchheim sind immerhin noch ca. 37 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche Dauergrünland, wobei der Anteil von 2003 bis 2016 etwa gleich blieb (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2020). *Aufgrund der vielen Vorteilwirkungen von Grünland ist jenes im Landkreis Forchheim zu erhalten und ggf. an den Flussläufen auszuweiten.*

Als problematisch wird hinsichtlich der Erhaltung des Grünlands im Landkreis Forchheim der mit 0,46 GV/ha (AELF Bamberg, 2019) geringe Viehbesatz der landwirtschaftlich genutzten Fläche gesehen. Die Grünlandnutzung ist meist direkt an eine Tierhaltung gekoppelt.

4.5.1.2.2 Niedrigwasser

Während Niedrigwasserphasen können diffuse Stoffeinträge zu einer erhöhten Stoffkonzentration im Grundwasser und Gewässer führen, da sich der Verdünnungseffekt reduziert (es steht weniger Wasser zur Verdünnung der gleich bleibenden Menge an Stoffeinträgen zur Verfügung).

Eine Konsequenz und Anpassungsmaßnahme könnte die weitere Ausweisung von roten und gelben Gebieten nach Ausführungsverordnung der Düngeverordnung (AV DüV) mit erhöhten Anforderungen an die Landbewirtschaftenden und Landbewirtschafteter sein. Die Düngeverordnung (DüV) verpflichtet die Landesregierungen nämlich, Gebiete mit einer hohen Stickstoffbelastung des Grundwassers (sogenannte „rote Gebiete“) oder einer Eutrophierung von Oberflächengewässern mit Phosphor (sogenannte „gelbe Gebiete“) per Landesverordnung auszuweisen und für diese Gebiete zusätzliche Auflagen bei der Landbewirtschaftung und Düngung zu erlassen (LfL, o. J.). Von zusätzlichen Auflagen besonders stark betroffen sind u.a. die trockenen Regionen in Unter- und Mittelfranken. Der Landkreis Forchheim ist wegen seines geringen Viehbesatzes mit 0,46 GV/ha landwirtschaftlich genutzter Fläche nicht von „roten Gebieten“ (hohen Stickstoffbelastung) betroffen, jedoch sind einige Feldstücke im Landkreis als „gelbe Gebiete“ ausgewiesen (AELF Bamberg, 2019), weshalb es in Anbetracht zunehmender Trockenheit kurz- bis mittelfristig sinnvoll sein kann, Phosphor nur in notwendigen Mengen nach der guten fachlichen Praxis auszubringen.

4.5.2 Trockenheit & Hitze

In Bezug auf die zunehmende Trockenheit und Hitze ergeben sich folgende Empfehlungen für den Landkreis Forchheim.

4.5.2.1 Bewässerung

In der Landwirtschaft kann durch *Steigerung der Bewässerungseffizienz* im Idealfall mit weniger Wasser mehr Fläche bewässert werden, z.B. durch den Wechsel von Überkopfberegnung zu Tropfbewässerung. Zur möglichst

schonenden Wassernutzung sollte jedoch nur dort bewässert werden, wo dringend Wasser benötigt wird (LAWA, 2017, S. 127 f.), was in der Regel bei Sonderkulturen wie dem Gemüsebau, nicht jedoch im Ackerbau der Fall ist. Zum einen sollte zwar bei Sonderkulturen eine *pflanzenbedarfsorientierte zusätzliche Wasserversorgung zur Stabilisierung der Ertragsbildung* angestrebt werden. Zum anderen sollte auch eine *Steigerung der Bewässerungseffizienz durch auf Bodenfeuchte basierende Bewässerungsverfahren* forciert werden (LfULG, 2009, S. 140). Die Anwendung von wassersparenden Produktions- und Bewässerungstechniken wie Tropfbewässerung kann eine interessante Lösung sein, die aber für einen Betrieb einen wichtigen Kostenfaktor darstellt, der bis zur Unwirtschaftlichkeit des Anbaus von Feldfrüchten reichen kann. Zur Unterstützung bei der Bewässerung gibt es inzwischen Methoden bzw. Apps, die den Wasserbedarf von Kulturpflanzen ermitteln und Empfehlungen aussprechen (z.B. *Bewässerungs-App* der ALB Bayern e.V.) (LAWA, 2017, S. 127 f.).

Zur Entspannung der Nutzungskonflikte um Grundwasservorkommen und Trinkwasserressourcen sollte für die Bewässerung in der Landwirtschaft, aber auch in privaten Gärten, nach Möglichkeit *Grundwasser durch Niederschlagswasser substituiert* werden. Die *Speicherung von Niederschlagswasser in Rückhaltebecken, Teichen, Zisternen* oder Ähnlichem im Winter bietet hier viel Potential, wofür allerdings Speichersysteme vorhanden sein oder gebaut werden müssen (LAWA, 2017, S. Anhang II-101).

Für die Bewässerung von Kulturarten können folgende Prioritäten gesetzt werden: 1) Gemüsebau, 2) Obstbau, 3) Kartoffeln, 4) Sonderkulturen und 5) Ackerfrüchte in Fruchtfolgen der oben genannten Kulturarten (LfULG, 2009, S. 121).

4.5.2.2 Humusaufbau

Konservierende Bodenbearbeitung kann neben dem Aspekt des Erosionsschutzes zu einer *Humusanreicherung* beitragen. In einem über 10-jährigem Feldexperiment mit einer Winterweizen-Kartoffel-Winterweizen-Mais Fruchtfolge nahm bei konservierender Bodenbearbeitung der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Oberboden um 150 bis 500 kg C_{org} pro Hektar und Jahr zu, während er bei Pflugbearbeitung um 300 kg C_{org} pro Hektar und Jahr abnahm (Küstermann et al., 2013). Humus vermag mit seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften etwa das 3- bis 5-fache seines Eigengewichtes an Wasser zu speichern, weswegen der Aufbau von Humus Trockenstress mildern und verkürzen kann. Insbesondere auf Sandböden und flachgründigen, humusarmen Böden wie sie z.T. auf den Jurahochflächen im Landkreis Forchheim vorliegen, bestimmt der Humusgehalt daher die Wasserspeicherkapazität (Amelung et al., 2018, S. 85). Allerdings ist zu beachten, dass der Humusaufbau ein nicht linearer Prozess ist. Die Intensität des Humusaufbaus lässt mit der Zeit nach, da bei erhöhtem Humusvorrat im Boden auch ein erhöhter Abbau stattfindet. Die Kurve der Humusanreicherung erreicht schließlich ein (neues) Gleichgewicht und es kann nicht mehr Humus angereichert werden. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass Humusaufbau zum einen begrenzt ist und zum anderen das Potential des Humusaufbaus umso größer ist, je stärker der Humusgehalt in Folge der bisherigen Bewirtschaftungspraxis gesunken ist (Wiesmeier et al., 2020, S. 3 f.; 11 f.). Konservierende Bodenbearbeitung wie die Mulchdirektsaat – aber auch *Mulchdecken* ganz allgemein –

bewirken neben der bereits beschriebenen Humusanreicherung eine verringerte Evaporation, wodurch mehr Wasser im Boden verbleibt und Trockenperioden abgepuffert werden können (vgl. Abschnitt 4.1.1.1 & 4.5.1) (Amelung et al., 2018, S. 85).

Des Weiteren muss dem Aufbau bzw. der Erhaltung einer guten Bodenstruktur angesichts des wachsenden Bodendruckes mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ein verdichteter Boden verhindert die Durchwurzelung und damit auch die optimale Wasser-, Luft- und Nährstoffausnutzung. Außerdem sollte das Verhältnis von Humuszehrer und Humusmehrern innerhalb einer Fruchtfolge im Ackerbau ausgeglichen sein, was insbesondere bei hohen Fruchtfolgeanteilen der Humuszehrer Mais, Raps und Getreide eine große Rolle spielt. *Mehrjährige Futterpflanzen mit (hohem) Leguminosenanteil* bieten sich aufgrund ihres ausgeprägten Wurzelsystems sowohl zur Reduktion von Bodenverdichtungen als auch zum Ausgleich von Humusbilanzen besonders an. Ist eine Futternutzung nicht möglich, können schnell wachsende Zwischenfrüchte als Gründüngung oder als Biogassubstrat eingesetzt werden (LfULG, 2009, S. 129).

4.5.2.3 Förderung hitze- und trockenheitstoleranter Arten und Sorten im Pflanzenbau und Grünland

Der Klimawandel ist kein linear ablaufender Prozess, sondern er verläuft langsam und mit erheblichen Schwankungen bei gleichzeitiger Zunahme bisher extremer Wetterereignisse (z.B. Trockenperioden). Diese Veränderungen erfordern grundsätzlich eine *breitere Risikostreuung (Diversifizierung)* hinsichtlich Kulturarten, Sorten und Standorten, um das totale bzw. teilweise Verlustrisiko zu vermindern. Dabei kann die Ertragsstabilität durch standortangepasste, wärme- bzw. hitze- und trockenheitstolerante Arten mit hoher Wassernutzungseffizienz verbessert werden. Außerdem könnten mit fortschreitendem Klimawandel Kulturen und spezielle *Sortentypen* Vorteile erlangen, die beispielsweise durch *ausgedehntere Wurzelsysteme* gekennzeichnet sind und damit in Stresssituationen einen größeren Bodenraum hinsichtlich Nährstoffe und Wurzeln nutzen können (LfULG, 2009, S. 96; Weigel, 2011, S. 24 f.).

4.5.2.3.1 Pflanzenbau

Die meisten wichtigen Fruchtarten im Pflanzenbau weisen ausreichenden Anpassungsspielraum an den Klimawandel auf, um grundsätzlich anbauwürdig zu bleiben. Lediglich Kartoffel und Hafer reagieren schnell mit stärker abfallender Ertragskurve bei hohen Tagestemperaturen (LfULG, 2009, S. 94).

Auf Böden mit guter Wasserversorgung werden wohl auch weiterhin anspruchsvolle Kulturarten, wie z.B. Winterweizen, Winterraps und Kartoffeln, anbauwürdig bleiben. Auf Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität hingegen werden sich wasseranspruchsvolle Fruchtarten wie Winterweizen, Kartoffeln (ohne Bewässerung) und Zuckerrüben zurückziehen. Dafür könnten sich trockenheitstolerante Kulturen wie Roggen, Hirsearten und Mais – wobei die beiden letzteren wassereffiziente C4-Pflanzen darstellen – ausdehnen. Auch Wintergerste kann ggf. an Bedeutung gewinnen, da sie die Herbst- und Winterniederschläge effizient verwertet (LfULG, 2009, S. 94 f.).

Die zurzeit auch als nachwachsende Rohstoffe verwerteten Kulturarten wie Raps, Weizen, Roggen oder Mais werden ihre Bedeutung auch in der nahen Zukunft bei einer moderaten Klimaerwärmung behalten oder sogar noch ausbauen. Nutzgehölze wie z.B. Pappel oder Weide sind eher an feuchte und kühlere Standortbedingungen adaptiert und können auch weiterhin an solchen Standorten angebaut werden. Miscanthus, Sudangras oder Zuckerhirse hingegen werden das aktuelle Anbauspektrum nachwachsender Rohstoffe hinsichtlich Trockentoleranz und Risikostreuung erweitern (LfULG, 2009, S. 95).

Lupinen und Luzerne stellen Leguminosenarten mit erhöhter Trockenheitstoleranz dar (LfULG, 2009, S. 94). Wegen ihres vergleichsweise hohen Keimwasserbedarfs sollten insbesondere Körnerleguminosen – unter Vermeidung von Bodenverdichtungen – früh gesät werden, um die Winterfeuchtigkeit in den Böden besser ausnutzen zu können (LfULG, 2009, S. 97). Möglicherweise wird in Zukunft der Anbau von Wintererbsen und Winterackerbohnen mit vertretbarem Risiko möglich sein, da diese im Vergleich zu den Sommerformen in der Regel einen ca. 2- bis 4-wöchigen Entwicklungsvorsprung haben, was neben der besseren Wasserversorgung zur Saat im Herbst auch eine frühere Blüte und Abreife mit sich bringt (Herrmann & Bader, o. J., S. 5; LfULG, 2009, S. 97).

Im Feldfutterbau sind Futterpflanzenarten und -mischungen noch stärker als bisher auf die betrieblichen *Standortbedingungen* abzustimmen. Hohertragreiche, aber anspruchsvolle Arten sollten nur auf Standorten mit guter Wasserversorgung angebaut werden. Auf Standorten mit wechselhafter Wasserversorgung und geringerem Ertragsvermögen bieten *Leguminosengemenge* eine höhere Ertragssicherheit (LfULG, 2009, S. 67 ff. & S. 129).

Beim Wintergetreide könnten in Zukunft *frühreife Sorten* Vorteile haben, da die Kornreife früher eintritt und sie damit möglicherweise kürzerem Witterungsstress ausgesetzt²⁶ sind. Auch könnten spätere Saatzeitpunkte erforderlich werden, um zu vermeiden, dass die Bestände „überwachsen“ in den Winter gehen. Noch führen allerdings spätere Saatzeitpunkte und frühreife Sorten zu Mindererträgen im Vergleich zu normalreifenden Sorten bzw. zur Normalsaat (LfULG, 2009, S. 96).

Unter Berücksichtigung des Bodenschutzes könnte ein weiteres Voranschreiten des Klimawandels zu vorgezogenen Saatzeitpunkten für Sommerkulturen führen, sodass durch die frühere Aussaat die Winterfeuchtigkeit besser genutzt werden könnte (LfULG, 2009, S. 97).

Des Weiteren sind neue Anbausysteme wie der *Zweitfruchtanbau* entwicklungsfähig (z.B. Sudangras oder Zuckerhirse nach Winterzwischenfrucht), der von den erwarteten längeren Vegetationsperioden profitiert, aber eine ausreichende Wasserversorgung voraussetzt (LfULG, 2009, S. 95).

Insgesamt kann festgehalten werden, dass durch Nutzung des *Züchtungsfortschritts*, der *Sortenempfehlungen* der Länderdienststellen und *durch Anbau standortangepasster, trocken toleranter und hitzeverträglicher Sorten* mit angepasstem Abreifeverhalten (z.B. frühreife Sorten) dem Klimawandel wirksam begegnet werden kann. Eine

²⁶ Sog. „escape Strategien“ z.B. Vermeidung von Trockenphasen durch frühe Entwicklung.

Anpassung an die Wasserkonkurrenz auf trockenen Standorten kann außerdem durch *Reduzierung der Aussaatstärken im Getreide und Raps* erfolgen (LfULG, 2009, S. 98).

4.5.2.3.2 Grünland

Aufgrund unzureichender Wasserversorgung steigt insbesondere für trockene Regionen künftig die Gefahr, dass sich Kahlstellen und Lücken in der Grünlandnarbe bilden, die wiederum unerwünschten Gräsern und Kräutern Ausbreitungsraum bieten können. Deswegen wird die Narbenerhaltung und -verbesserung durch *gezielte Nachsaaten* mit *standortangepassten Arten und Sorten* als kurz- und mittelfristige Anpassungsstrategie wohl sehr bedeutend werden. Vor allem die *Nachsaat* kann zu einer häufigeren bis hin zu einer ständig notwendigen Pflegemaßnahme werden, wobei *Schlitzsaatverfahren* meist einen besseren Bodenkontakt ermöglichen als *Übersaatverfahren* und deshalb verbesserte Auflaufchancen zu erwarten sind. Vor allem der Einsatz von qualitativ hochwertigem Saatgut sowie die Verwendung von *trockenheitstoleranten Grasarten* wie beispielsweise Wiesenschweidel, Bastard-Weidelgras, Knautgras und Rohrschwengel oder Leguminosen wie Luzerne oder Hornschotenklee können zu einer besseren Anpassung an Trockenphasen beitragen. Die Bedeutung an *Leguminosen* wird in gräserreichen Beständen zunehmen, da aufgrund einer erhöhten CO₂-Konzentration eine schlechtere Futterqualität (niedrigere Rohproteingehalte) zu erwarten sind. Hochleistungsfähige, aber sehr anspruchsvolle Arten und Sorten sollten auf Standorten mit ausreichender Wasserversorgung beschränkt bleiben, wo das Ertragspotential auch in Zukunft ausgeschöpft werden kann (LfULG, 2009, S. 67, 128).

Außerdem sollte die Nutzungstiefe (6 bis 8 cm) eine *ausreichende Restblattfläche* gewährleisten, damit die Gräser ohne Mobilisation von Reservestoffen unverzüglich nach einer Schnitt- oder Weidenutzung rasch weiterwachsen und wieder austreiben können. Das bedeutet vor allem, dass *kein zu tiefer Schnitt* bzw. *keine Überbeweidung* erfolgen darf. Des Weiteren wird mittelfristig die *regelmäßige Ermittlung der Bodennährstoffversorgung* im Grünland noch wichtiger. Die Kenntnis der Versorgungsstufen und die ggf. notwendigen Düngungsmaßnahmen (Erreichen und Erhaltung der Versorgungsstufe „C“ oder zumindest oberen Hälfte „B“ bei den Nährstoffen Ca, K, P, und Mg) sind von essentieller Bedeutung für einen optimalen Pflanzenbestand, welcher Stresssituationen wesentlich besser übersteht als eine mangelhaft ernährte Grasnarbe (LfULG, 2009, S. 128). Weitere praxisnahe Informationen zur Verbesserung und Erneuerung von Grünland sind z.B. bei Elsässer et al. (2019) beschrieben.

4.5.2.4 Windschutz

Hecken und Agroforstsysteme, die auch als potentielle Einkommensquellen an trockenheitsgefährdeten Randstandorten etabliert werden können, vermögen aufgrund ihrer mikroklimatischen Wirkung Standorteigenschaften zu verändern. Hecken und Agroforstsysteme können die Windgeschwindigkeit um bis zu 50 bis 60 % auf der Leeseite reduzieren, mit einer windbremsenden Wirkung bis in eine Entfernung des mindestens 12-fachen der Höhe des Windschutzstreifens (12 H). Der mikroklimatische Effekt von Windschutzstreifen ist abhängig vom Aufbau, der Durchlässigkeit, der Höhe und vor allem auch von der Ausrichtung in Bezug auf die Hauptwindrichtung. Besonders groß ist die Schutzwirkung von Windschutzhecken mit einer *Durchlässigkeit von 30*

bis 60 %, die keine zu großen Lücken aufweisen. Lücken wirken wie Düsen und können den Wind beschleunigen (Ableidinger et al., 2020, S. 1 ff.).

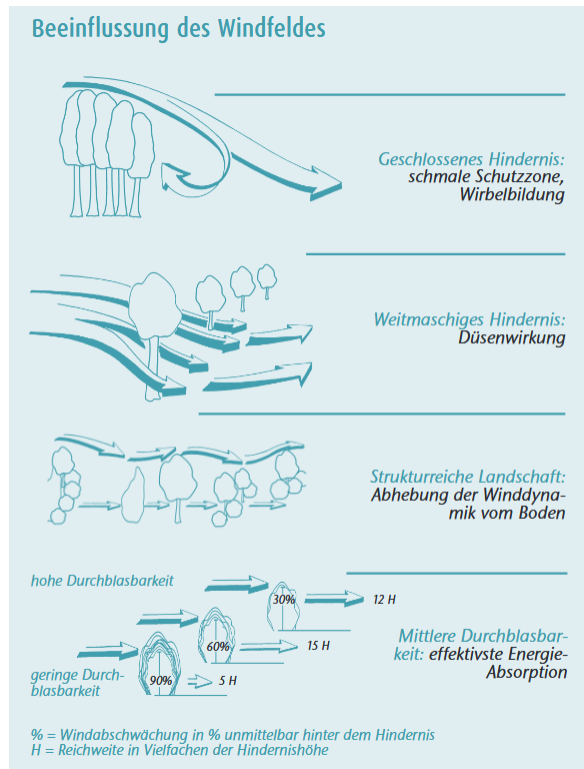


Abbildung 18: Beeinflussung des Windfeldes in Abhängigkeit von verschiedenen Gehölzstrukturen (DVL, 2006, S. 90)

Aber auch auf der Leeseite kann eine Windreduktion bis in eine Entfernung von 5 H festgestellt werden. Die Windreduzierung durch Hecken beeinflusst auch andere mikroklimatische Standortfaktoren auf der Leeseite. So sind insbesondere die Taubildung, Bodenfeuchte, Luftfeuchte, Boden- und Lufttemperatur (tagsüber) hinter Hecken und Windschutzstreifen im Vergleich zu offenen Landschaften höher, während die Verdunstung und die Lufttemperatur (nachts) geringer sind (Ableidinger et al., 2020, S. 3 ff.; LfL, 2005) (vgl. Abbildung 19).

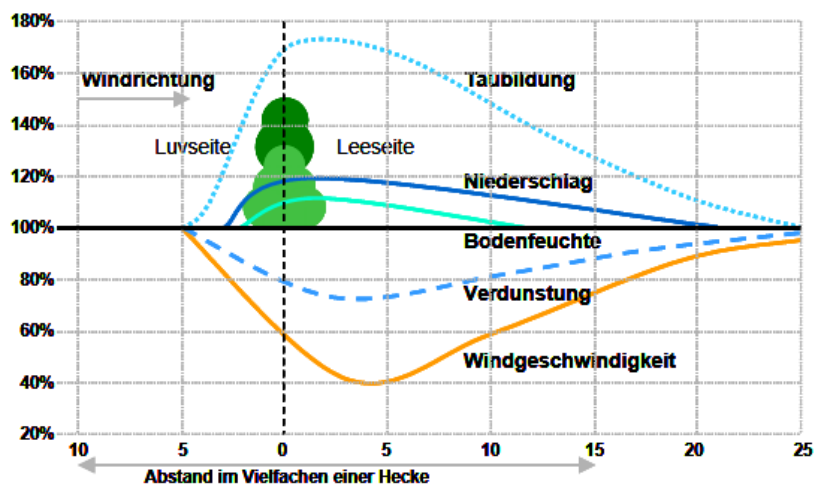


Abbildung 19: Wirkung einer streifenförmigen Gehölzpflanzung auf das Mikroklima (LfL, 2005, S. 7)

Ob sich diese mikroklimatischen Effekte positiv oder negativ auswirken, hängt von den lokalen Temperatur- und Niederschlagsbedingungen sowie von den Anbaufrüchten, deren Ansprüchen und Gefährdungen ab. Verschiedene Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass es im Bereich von einigen Metern Abstand zu einem Windschutzhindernis zu Ertragsminderungen aufgrund von Schattenwurf und Wurzelkonkurrenz der Windschutzpflanzung mit den Feldkulturen um Wasser und Nährstoffe kommen kann (sog. Konkurrenz- bzw. Verlustzone). Allerdings werden die im Nahbereich der Gehölze gemessenen Mindererträge durch eine Ertragssteigerung um bis zu 150 % in weiter vom Gehölzstreifen entfernt liegenden Bereichen kompensiert (Ableidinger et al., 2020, S. 10 ff.; DVL, 2006, S. 91 f.). Diese Befunde wurden u.a. für Getreide, Dauergrünland, Kartoffel, Futterrüben und Klee gras festgestellt (Ableidinger et al., 2020, S. 10 ff.; LfL, 2005, 2019a, S. 22).

4.5.3 Krankheiten & Schädlinge

Aus dem klimabedingten wohl insgesamt höheren Krankheits-, Unkraut- und Schädlingsdruck ergibt sich zunächst, dass der *Einsatz von Pflanzenschutzmitteln* in Zukunft intensiver werden wird. Dies konterkariert die Zielstellung in dem von der Bundesregierung langfristig angelegten Pflanzenschutzmittel-Reduktionsprogramm. Außerdem sollte ein steigender Stoffeintrag in die Umwelt im Sinne des Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutzes vermieden werden. Daher ist die gezielte Förderung und Begleitung von Verfahren des *integrierten Pflanzenschutzes* dringend notwendig (LfULG, 2009, S. 107).

Bei den Bekämpfungsverfahren sollten den *vorbeugenden pflanzenbaulichen Maßnahmen*, insbesondere einer *weiten, aufgelockerten Fruchtfolge* mit *ausreichenden Anbaupausen* aber auch biologischen Pflanzenschutzmaßnahmen wie der Förderung von Nützlingen durch geeignete Rahmenbedingungen wieder mehr Chancen auf Praktikabilität und Durchsetzung eingeräumt werden (LfULG, 2009, S. 107).

Außerdem stellt das *Precision Farming* eine interessante und zukunftsfähige – aber kostenintensive – Technologie dar, die u.a. auf die nachhaltige Sicherung umweltentlastender Effekte abzielt. Bei der Anwendung der Precision-Farming Technologie werden ökonomische und umweltpolitisch wichtige Effekte in Aussicht gestellt, u.a. die Senkung des Herbizideinsatzes um bis zu 60 %²⁷ sowie die Senkung des Fungizideinsatzes um bis zu 30 %, die wesentlich zur Umsetzung des integrierten Pflanzenschutzes in Deutschland beitragen können (LfULG, 2009, S. 122).

Die *laufenden Monitorings zur Befallserfassung von Krankheiten* sind einerseits elementar für die Erfassung von Veränderungen in der Struktur und dem Verhalten der Schadorganismenpopulation sowie der Artenvielfalt in der Unkrautflora und ermöglichen andererseits eine gut organisierte, effektive Schaderregerüberwachung sowie witterungsbasierte Schaderregerprognoseverfahren. Fachinformationen über Veränderungen im Spektrum und Auftreten von Krankheiten, Schädlingen oder Schadpflanzen liefern die wesentliche Grundlage für die Bekämpfungsentscheidung der Landwirtin oder des Landwirtes (LfULG, 2009, S. 108). Der *Schaderregerwarndienst*

²⁷ Ergebnisse der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) weisen darauf hin, dass eine 25-prozentige Reduktion des ortsüblichen notwendigen Maßes an Pflanzenschutzmitteln – ohne zusätzliche Technologie – keine gravierenden Ertragsverluste durch Unkräuter, Krankheiten und Schädlinge zur Folge hatte (LfL, 2019b).

bzw. die *Schaderegerprognosen* in Bayern sind digital unter <https://www.lfl.bayern.de/ips/warndienst/> abrufbar und werden wöchentlich aktualisiert.

4.5.4 Erhöhtes Risiko für Spätfrostschäden und Folgen milderer Winter

Spätfrostgefahr im Ackerbau wird hinsichtlich des Risikos von Kälteschäden während des Aufgangs bzw. der Jugendentwicklung mit der Folge von Ertragseinbußen diskutiert, *weswegen der Übergang zu früheren Saatterminen kritisch gesehen wird* (LfULG, 2009, S. 97) bzw. nur mit frostresistenten Kulturen und Sorten möglich ist. Strategien zur Anpassung des Ackerbaus an eine erhöhte Spätfrostgefahr wurden weder im Workshop noch in der Literatur (Goemann et al., 2015; LfULG, 2009) genannt. Es sei an dieser Stelle auf die Maßnahmen zur Minderung oder Vermeidung von Spätfrostschäden im Obstbau hingewiesen, die in Abschnitt 4.3.2 beschrieben werden.

Aufgrund der prognostizierten Abnahme an Frosttagen und damit einhergehenden milderen und feuchteren Wintern kann die Stabilität des Bodengefüges herabgesetzt werden. Um eine Bodenverdichtung zu vermeiden, ist daher zu empfehlen, den *Maschineneinsatz möglichst auf Termine mit geringen Bodenwassergehalten zu legen*, wie im späten Frühjahr oder im Spätsommer. Prinzipiell gilt, dass der *Maschineneinsatz während zu feuchter Bedingungen vermieden* und der Einsatzzeitpunkt unter Berücksichtigung der Witterung geplant werden soll. Ähnlich wie in der Forstwirtschaft können negative Auswirkungen der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen mittels *Herabsetzung des Kontaktflächendrucks der Maschinen* reduziert werden – z.B. durch eine *Erhöhung der Radzahl* um bis zu 55 %, durch das *Absenken des Reifeninnendrucks* um bis zu 35 % und durch eine *erhöhte Reifenbreite* um bis zu 10 % (LWF, 2012).

Außerdem können auch die Keimung und Vernalisation angebauter Kulturen, aber auch das Abfrieren von Zwischenfrüchten durch milde Winter beeinträchtigt werden (Henke & Trieschmann, 2020; Weigel, 2011). Der Vorteil von abfrierenden Zwischenfrüchten, dass sie den *Einsatz von Herbiziden* zum Abtöten der Zwischenfrucht überflüssig machen (LfL, 2011, S. 5), kann dadurch wegfallen. Auch eine angepasste Verwendung der Zwischenfrucht, z.B. als Ganzpflanzensilage oder für die Futternutzung ist denkbar. Hinsichtlich Keimung und Vernalisation sind *Sorten* denkbar, die nur einen geringen Kältereiz bedürfen und/ oder einen geringen Vernalisationsanspruch haben.

4.5.5 Weitere Aspekte

Ferner gilt es neben den bereits genannten Aspekten der Landwirtschaft ebenso die Bereiche der Tierhaltung und der Teichwirtschaft zu betrachten, da auch diese im Landkreis Forchheim einer Anpassung bedürfen.

4.5.5.1 Tierhaltung

In der Tierhaltung ist sowohl die Anpassung von Futtermittel- als auch von Tierhaltungsstrategien ratsam.

4.5.5.1.1 Futtermittelstrategie

Aufgrund von zunehmenden Ertragsschwankungen durch den Klimawandel können die *Vorratswirtschaft* (z.B. mehrjährige Reservebildung, flexiblerer Futtermittelzu- und -verkauf) und der *Schutz von Futtermitteln* (z.B. Schaffung von Silo- und Lagerraum, überdachte Silos, Haltbarkeit) an Bedeutung gewinnen (LfULG, 2009, S. 130).

4.5.5.1.2 Tierhaltungsstrategien

Witterungsbedingte Extreme werden neue Anforderungen an die Stall- und Tierhaltungsanlagen stellen, um Stress und Beeinträchtigungen der Tiergesundheit bei den Nutztieren zu vermeiden. Im Interesse des Tierschutzes werden wohl *bauliche Anpassungsmaßnahmen, wie z.B. Be- und Entlüftung, Klimatisierung, Wärme- und UV-Schutz sowie Kuhduschen* erforderlich werden. Auch bei der *Freilandhaltung auf Weiden sollte durch die Schaffung von kühlen Plätzen mit einer ausreichenden Wasserversorgung* stärkeren Hitze- und UV-Belastungen begegnet werden (LfULG, 2009, S. 70, 130 f.). Dazu bieten sich z.B. beschattete Plätze unter Bäumen an.

4.5.5.2 Teichwirtschaft

Stehende Gewässer sind durch die Klimaerwärmung weltweit wärmer geworden. Klimabedingte Veränderungen lassen sich vor allem bei den physikalischen, direkten Effekten mit recht hoher Sicherheit prognostizieren. Als ziemlich sicher werden insbesondere weiter steigende Wassertemperaturen, ein verändertes Schichtungsverhalten und eine reduzierte Sauerstoffkonzentration im Sommer angesehen. Dadurch nimmt wohl auch die interne Düngung in Seen mit nährstoffreichen Sedimenten zu (IGB, 2018, S. 9). Während im östlichen Teil des Landkreises Forchheim in der Nördlichen Frankenalb Fließgewässer dominieren, befindet sich im Mittelfränkischen Becken im westlichen Teil des Landkreises eine charakteristische Teichlandschaft, die Teile des Aischgrundes umfasst (LfU, 2011).

Auch bei Teichen gilt, dass ein besonders kritischer Parameter für viele aquatische Lebewesen der Sauerstoffgehalt des Wassers ist, der wiederum stark von der Wassertemperatur abhängt (LAWA, 2017, S. Anhang II-113). Atmosphärischer Sauerstoff wird insbesondere durch Winddurchmischung in Stillgewässer eingetragen (Kollmann, 2019, S. 154), weswegen es für eine natürliche Anreicherung der Teiche mit Sauerstoff wichtig ist, die Teiche *in Hauptwindrichtung* offen zu halten. Außerdem können Beschattungsmaßnahmen wie Ufergehölze – die dann allerdings nord- bzw. südexponiert sein sollten, um die Teiche in Hauptwindrichtung offen zu halten – die Wassertemperatur kleiner Teiche bzw. einzelner Bereiche im Teich durch Beschattung verringern und so die Sauerstoffaufnahmekapazität der Teiche im Sommer erhöhen. Je nach Besatzdichte der Teiche mit Fischen – wobei der Sauerstoffbedarf eines *geringen Besatzes* natürlich niedriger ist – und des ökologischen Zustands der Teiche kann auch ein *(technisches) Belüftungsmanagement* sinnvoll sein (LAWA, 2017, S. Anhang II-114). Außerdem kann eine Belüftung den *Abbau sauerstoffzehrender organischer Materialien* unterstützen (Kollmann, 2019, S. 163).

Krankheiten in der Teichwirtschaft

Bleiben Starkfröste im Winter zukünftig häufiger aus, können neue, zweckmäßige Desinfektionsmaßnahmen zur Prävention von Fischkrankheiten und Parasiten oder deren Entwicklungsstadien erforderlich sein.

4.6 Stadt- und Kommunalplanung

In der Stadt- und Kommunalplanung sind primär im Hinblick auf Hitze und Starkregen Anpassungen an die Klimawandelfolgen zu tätigen.

4.6.1 Hitze

Adäquate Maßnahmen gegen die Hitze sind einerseits die Hitzereduktion durch eine entsprechende Einflussnahme auf das lokale Mikroklima und andererseits die Schaffung eines Angebots an Erholungsmöglichkeiten für den Menschen und seine gesundheitliche Vorsorge.

4.6.1.1 Beeinflussung des Mikroklimas zur Hitzereduktion

Städte sind von den Auswirkungen des Klimawandels stärker betroffen als ländliche Räume. Städte können sich tagsüber im Vergleich zu ihrem Umland stärker erwärmen und kühlen nachts in der Regel schlechter ab, weswegen von der städtischen Wärmeinsel²⁸ gesprochen wird. Wegen der hohen Versiegelung und der dichten Bebauung können Städte viel Wärme aufnehmen, speichern und abgeben. Verstärkt wird der Effekt der städtischen Wärmeinsel durch die Energieverbrauchsdichte, da die beim Energieverbrauch entstehende Wärme in den Stadtraum abgegeben wird. Wärme wird dabei auch über Nacht im Stadtgebiet gespeichert, was insbesondere die nächtlichen Erholungsphasen beeinträchtigt und Stadtbewohnerinnen und Stadtbewohner belastet. So ist die Temperaturdifferenz zwischen Stadtgebiet und Umland in der Regel nicht tagsüber, sondern nachts am größten (TUM, 2020, S. 18–22). Nichtsdestotrotz ist auch tagsüber der Temperaturunterschied so wesentlich, dass es in Ballungsgebieten doppelt bis dreimal so viele Hitzetage und Tropennächte gibt als im Umland (Noppel, 2017, S. 5). Der Effekt der städtischen Wärmeinsel ist für Großstädte wie z.B. München und Nürnberg gut belegt. Neue Untersuchungen zeigen allerdings, dass auch die Stadt Bayreuth einen ähnlich hohen Wärmeeffekt wie die genannten Großstädte hat (Thomas, 2019, S. 24). Für den Landkreis Forchheim werden ähnliche Untersuchungen vom Lehrstuhl Klimatologie der Universität Bayreuth bis Ende 2024 durchgeführt.

Besonders anfällig gegenüber Hitze sind Kleinkinder und ältere Menschen, da diese am ehesten unter Kreislaufschwäche leiden und schneller dehydrieren (TUM, 2020, S. 22).

Ziel von Klimaanpassungsmaßnahmen sollte daher sein, dem städtischen Wärmeineleffekt durch *kühle Rückzugs- und Erholungsorte* im Stadt- und Siedlungsgebiet entgegenzuwirken, indem solche Gebiete erhalten und geschaffen werden sowie eine weitere *Versiegelung von Freiflächen vermieden* wird (Mücke et al., 2009, S. 5).

Zum einen können Sanierungskonzepte für Gebäudehüllen genutzt werden, um den negativen Auswirkungen des Klimawandels, insbesondere dem potentiellen Anstieg des Kühlbedarfs, zu begegnen. Der Fokus liegt dabei auf einer *Reduktion der Überhitzung des Gebäudes* durch einen reduzierten Eintrag an Solarstrahlung in das Innere des

²⁸ „Der Begriff „städtische Wärmeinseln“ bezeichnet urbane Bereiche, die im Vergleich zum Umland eine höhere Temperatur aufweisen (in München im Mittel 2-3 °C). Der Temperaturunterschied ist nachts am stärksten und beläuft sich in München auf bis zu 10 °C. Grund dafür ist vor allem die hohe Bebauungsdichte, weil große thermische Massen die Wärme speichern und langsamer wieder abgeben als natürliche Oberflächen. Durch den Verlust an Grünflächen wird zudem weniger Wasser verdunstet, was die Abkühlung weiter verringert“ (TUM, 2020, S. 20).

Gebäudes (z.B. durch Sonnenschutz oder eine weiße Gebäudehülle), Lüftungssysteme und eine ausreichende Isolation (vgl. Abbildung 20) (TUM, 2020, S. 29).

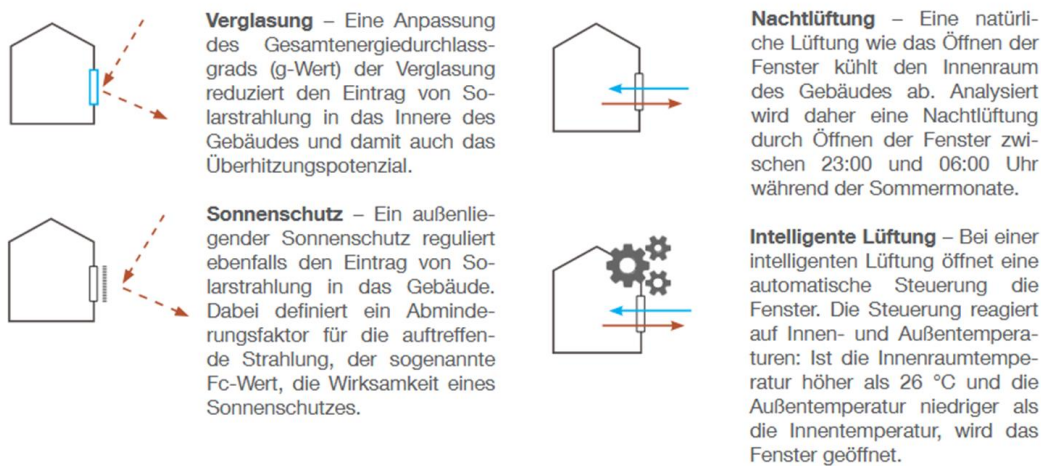


Abbildung 20: Maßnahmen zur Reduktion von Überhitzung im Gebäude (TUM, 2020, S. 29)

Vor allem die *Kombination aus außenliegendem Sonnenschutz an südwärts exponierten Fenstern und Nachtlüftung* stellt dabei einen guten Kompromiss aus Praktikabilität und Reduktion des Nutzenergiebedarfs sowie der Treibhausgasemissionen dar, um den potentiellen Kühlbedarf möglichst gering zu halten. Zwar lassen sich der Nutzenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen mit der *Kombination aus außenliegendem Sonnenschutz und automatischer, intelligenter Lüftung* noch weiter absenken, doch stellt die oben genannte Variante bereits eine gute und weniger aufwändige Option dar. Für die Periode 2061 bis 2090 lässt sich der Nutzenergiebedarf so um 10 bis 15 % (und Treibhausgasemissionen um 40 bis 50 %) in Gebäuden mit EnEV Gebäudehüllensanierung im Vergleich zu einem Referenzgebäude, ebenfalls mit EnEV Gebäudehüllensanierung aber ohne Maßnahmen zur Reduktion der Überhitzung des Gebäudes, vermindern.

Verglasungen mit einem geringen Gesamtenergiedurchlassungsgrad können zwar im Sommer den Kühlbedarf reduzieren, erhöhen aber im Winter aufgrund geringerer Sonnenwärme die Heizkosten. Dadurch kann in der Summe durch Verglasungen nur eine sehr geringe Reduktion des Nutzenergiebedarfs erreicht werden (TUM, 2020, S. 39).

Zum anderen können *Begrünungsmaßnahmen* (= grüne Infrastruktur) regulierend auf häufigere und extremere Hitzeereignisse wirken, da sie die nähere Umgebung beschatten und – bei ausreichender Wasserversorgung – durch Evapotranspiration kühlen. Die Verschattung, die abhängig von der Blattflächendichte ist, wirkt sowohl auf Luftmassen als auch auf Oberflächen, deren Wärmerückstrahlung in den Außenraum dadurch reduziert wird (TUM, 2020, S. 30).

Die regulierenden Leistungen von Begrünung unterscheiden sich weiter nach Art und Standort der Maßnahmen. Vor allem *Bäume* verschatten den Außenraum sowie Fassadenflächen und können zudem durch Verdunstung die nähere Umgebung kühlen. Primäres Ziel sollte deshalb sein, den *Baumbestand in Städten und Siedlungen zu*

sichern, zu pflegen und klimasensitive Baumarten durch klimaresistente zu ersetzen. Das zweite Ziel sollte sein, den Baumbestand, insbesondere an sonnenexponierten Standorten mit ausreichend Platz für eine vitale Entwicklung, zu vergrößern. Dabei sind Arten und Artenkombinationen anzustreben, die den zukünftigen klimatischen Bedingungen angepasst sind (TUM, 2020, S. 30, 32).

Außerdem können Dachbegrünungen die Oberflächentemperatur insbesondere dunkler Dächer reduzieren und vermindern die Wärmespeicherfähigkeit der Bausubstanz. Je nach Wasserverfügbarkeit, können sie durch Evapotranspiration auch die unmittelbare Umgebung kühlen. Vor allem aber können sie mehr Niederschlagswasser als unbegrünte Dächer speichern und bieten daher bei Starkregenereignissen einen wichtigen Puffer. Es lassen sich je nach Substratqualität und -schichtdicke sowie Wasserversorgung unterschiedliche Vegetationsformen als Dachbegrünung umsetzen. Vom extremen Trockenrasen über unterschiedliche Wiesentypen bis hin zu Feuchtbiotopen oder intensiv bewirtschafteten Dachgärten ist je nach Dachneigung und -statik eine große Bandbreite möglich (TUM, 2020, S. 30, 33).

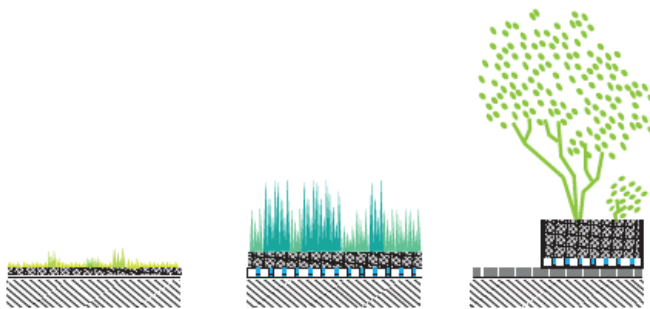


Abbildung 21: Extensive Dachbegrünung (linkes Bild), Retentionsdach mit Intensivbegrünung (mittig) und Dachterrasse mit Pflanztrögen (rechtes Bild) (TUM, 2020, S. 33)

Im städtischen Gebäudebestand bieten sich insbesondere Nebengebäude für Dachbegrünungen an, da diese meist massiv gebaut sind und Dächer mit keiner oder nur geringer Neigung besitzen.

Fassadenbegrünung verschattet vor allem die dahinterliegende Fassade und reduziert so die Wärmespeicherfähigkeit der Bausubstanz.

Für eine möglichst kühlende mikroklimatische Wirkung sind vor allem *begrünte, wasserreiche Stadtteile und Grünflächen zu erhalten bzw. herzustellen*. Bei einer Messkampagne in Bayreuth konnte z.B. gezeigt werden, dass der Hofgarten bis in den späten Nachmittag durch Baumbeschattung kühler war als die meisten anderen Stadtteile. Am frühen Abend und nachts jedoch kühlte der Hofgarten deutlich weniger ab als begrünte, wasserreiche Stadtteile (siehe Abbildung 22) (Thomas, 2019, S. 18).

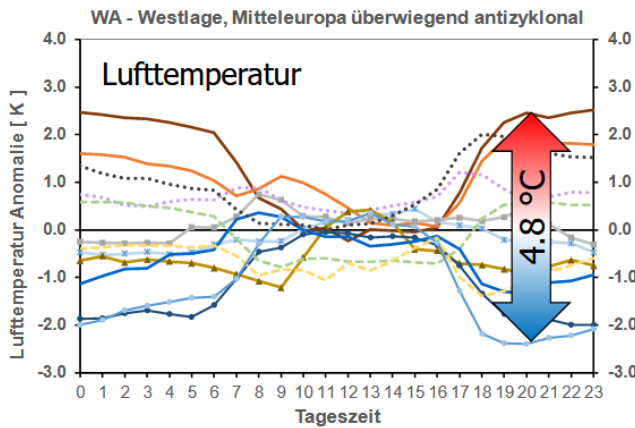


Abbildung 22: Tageszeitliche Entwicklung der Lufttemperatur an unterschiedlichen Messstellen in Bayreuth. Die grün gestrichelte Linie stellt den Temperaturverlauf im Hofgarten dar (Thomas, 2019, S. 18)

Dementsprechend ist die *Schaffung von Freiflächen durch Begrünung und Entsiegelung trotz Nachverdichtung* ein besonders wichtiger Bereich für eine klimagerechte Stadtentwicklung (TUM, 2020, S. 34). Neben der oben genannten Dachbegrünung auf Nebengebäuden oder Flachdächern bieten sich – je nach Ausgangslage – beispielsweise Hinterhöfe, Parkplätze, baumlose Rasenflächen, Fassaden, versiegelte öffentliche Plätze und Straßenränder zur Begrünung an. Planerische und rechtliche Instrumente zur Festsetzung und Förderung von Begrünung sind ausführlich in TUM (2020) und auszugswise in Tabelle 3 im Anhang beschrieben.

Für die nächtliche Abkühlung ist es außerdem notwendig, *Kaltluftentstehungsgebiete und Kaltluftzufuhrschneisen freizuhalten und bei Planvorhaben zu berücksichtigen*. Analysen zeigen, dass Kaltluft vor allem auf am Hang gelegenen Freiflächen gebildet wird, aber auch auf innerstädtischen Grünflächen. Für die Kaltluftzufuhr haben in die Stadt führende Täler sowie umgebende Hänge eine wichtige Funktion (Noppel, 2017, S. 68). Deren Freihaltung erfordert folglich die Abstimmung mit Nachbargemeinden und eine überörtliche Planung (TUM, 2020, S. 34).

4.6.1.2 Schaffung von Erholungsmöglichkeiten und gesundheitlicher Vorsorge gegen Hitze

Neben der im vorherigen Abschnitt beschriebenen mikroklimatischen Wirkung, bieten beschattete Grünflächen außerdem *Schutz und Erholung* für die Stadtbewohnerinnen und Stadtbewohner.

Es sollte ein ausreichendes Angebot an *beschatteten Rastplätzen* geschaffen werden und bei künftigen Planungen wegen seiner kühlenden Wirkung ("das kühle Nass") eine verstärkte *Verwendung des Gestaltungselementes Wasser* (z.B. mittels Trinkwasserbrunnen, Wasserspielplätzen, Brunnen, Teichen, künstlichen Wasserläufen und Uferzugängen an Bächen sowie Flüssen) berücksichtigt werden. Dies gilt besonders für Grünflächen und Stadtgebiete, die von empfindlichen Bevölkerungsgruppen genutzt, bewohnt und besucht werden. Dazu gehören z.B. zentrale Plätze und Einkaufsstraßen, Klinikparks oder Grünanlagen im Umfeld von Alten- und Pflegeheimen oder Spielplätzen (Stadt Nürnberg, 2012, S. 64).

Besonders in stark frequentierten (Einkaufs-)Straßen und Plätzen in Siedlungen, Städten oder Stadtteilen wäre unter dem Aspekt der Klimaanpassung die *Errichtung eines Netzes aus öffentlichen Trinkwasserspendern*

angebracht. Die Bereitstellung von Trinkwasser im öffentlichen Raum kann in Hinblick auf den prognostizierten und bereits spürbaren Klimawandel auch als Aufgabe der Gesundheitsvorsorge verstanden werden. Hiervon würden besonders die empfindlichen Bevölkerungsgruppen profitieren (Stadt Nürnberg, 2012, S. 68, 77).

Außerdem stellen *Freibäder* im städtischen und ländlichen Gebiet eine weitere Erfrischungs- und Erholungsmöglichkeit für viele Menschen während Hitzeperioden dar. Daher sollten die bestehenden Freibäder im Landkreis Forchheim in einer angemessenen Qualität und mit ausreichend Schattenplätzen erhalten bleiben und der Bevölkerung zur Verfügung gestellt werden.

4.6.2 Starkregen

Um die negativen Folgen des zunehmenden Starkregens zu reduzieren, ist es wichtig, an das Hochwasserrisiko angepasste Bauweisen zu verfolgen, entsprechend aufzuklären und Retentionsmaßnahmen zu ergreifen.

4.6.2.1 Hochwasserangepasstes Bauen und Aufklärungsarbeit

Infolge von Starkniederschlägen können sowohl von überlasteten (urbanen) Fließgewässern, als auch von Bereichen fernab von Gewässern oder von normalerweise trockenen Abflussbahnen in Geländetiefpunkten, die jedoch bei starken Niederschlägen plötzlich Wasser führen, große Gefahren und ein hohes Schadpotential ausgehen (LAWA, 2017, S. 68; Seibert & Auerswald, 2020, S. 22 ff.). Ganz grundsätzlich sollte natürlich die *Bebauung hochwassersensibler Flächen* vermieden werden (Haber, 2003, S. 6).

In einem Großteil der Schadfälle (~75 %) gelangt dabei das schadbringende Wasser nach Starkniederschlägen oder Überflutungen durch Öffnungen (Fenster, Türen, Lichtschächte, Kellerfenster) in Gebäude ein. Dementsprechend vielseitig sind die Maßnahmen des *Objektschutzes* und reichen von Gebäudeabdichtungen, wasserdichten Fugen und Anschlüssen, Lichtschachterhöhungen, hochwassersicheren Fenstern oder Türen, Rückstausicherung im Kanal, Nutzungsanpassung im betroffenen Gebäudeteil, bis hin zu permanenten Wassersperren am Grundstück (z.B. durch Mauern). Außerdem ergreifen viele Betroffene mit vorrätigen Sandsäcken, Pumpen, oder Mobilelementen an Öffnungen Vorsorgemaßnahmen (Zahnt et al., 2018).

Neben den Maßnahmen des Objektschutzes tragen folgende technische Maßnahmen wesentlich dazu bei, Schäden an Siedlungen und Infrastruktur zu vermindern (LAWA, 2017):

- *Barrieren* zwischen Siedlungen und Außengebieten. Neben Rückhaltmaßnahmen können Barrieren wie Dämme oder Gräben den Zufluss von Wasser aus Außengebieten in Ortslagen hinein reduzieren oder verhindern, indem das Wasser um Ortslagen herumgeleitet oder Rückhalteinlagen bzw. -flächen zugeführt wird (LAWA, 2017, S. Anhang II-37).
- Herstellung und Sicherung von *Notwasserwegen* inkl. Entlastungsgräben/ Retentionsbecken: Zur Vermeidung von Schäden an Gebäuden und Infrastruktur sollte das oberflächlich abfließende Wasser gezielt durch Notwasserwege im öffentlichen Raum oder auf Privatgrundstücken auf Retentionsflächen

(oder in Vorfluter) geleitet werden. Dafür müssen Notwasserwege im öffentlichen Raum und auf Privatgrundstücken ausgewiesen, freigehalten und in Bauleitplänen festgesetzt werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-40).

- *Regelmäßige Wartung und Inspektion der Entwässerungssysteme:* Dies unterstützt dabei, dass Wasser aus Ortslagen ungehindert abfließen kann und Rückstau sowie Überflutungen vermieden werden können. Dabei sollten Engstellen im Gewässer und Einläufe zur Kanalisation, inkl. Rechen davor, regelmäßig überprüft werden. Hierbei ist mit Entwässerungssystem das gesamte oberirdische Einzugsgebiet und nicht allein die Kanalisation gemeint (LAWA, 2017, S. Anhang II-44).
- Durchführung von *Gefährdungsabschätzungen* und Erstellung von *Starkregenrisikokarten:* Es sollten Risikoanalysen durchgeführt und Starkregenrisikokarten erstellt werden, in denen Topographie, Siedlungs- und Freiraumstruktur sowie Bebauungstypen berücksichtigt werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-45).
- *Öffentlichkeitsarbeit* und *Fortbildungen:* Ein Gefahrenbewusstsein für die Folgen bzw. Schäden von Starkniederschlägen – oft fernab von Gewässern – ist in der Regel erst nach einem Überflutungsereignis vorhanden (Zahnt et al., 2018), weshalb Öffentlichkeitsarbeit und Fortbildungen wichtige Bausteine der Vorsorge sind (LAWA, 2017, S. Anhang II-42).

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass in Modellstudien in einem oberfränkischen Maineinzugsgebiet festgestellt wurde, dass sich von 1850 bis 2011 Siedlungsflächen um 2600 % vergrößert haben und dass die bebaute Fläche in Überschwemmungsgebieten heute ca. fünfmal so groß ist wie 1850 (Früh-Müller et al., 2015; Ulloa-Torrealba et al., 2020). Diese Entwicklung verringerte nicht nur die Kapazität der Landschaft, Wasser in den Böden zu speichern (Seibert & Auerswald, 2020, S. 26 & 79 ff.), sondern erfordert viel umfänglichere und aufwändigere Hochwasserschutzmaßnahmen (Früh-Müller et al., 2015), die bisher häufig darauf abzielten, das überschüssige Wasser schnell abzuführen. *Weitere Flächenversiegelung und Bebauung entlang von Flüssen und in Überflutungsgebieten sollte daher dringend vermieden werden* (Haber, 2003, S. 6).

4.6.2.2 Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen für Niederschlagswasser in Städten bzw. Siedlungsgebieten

Städte und Siedlungsflächen bieten oft unzureichende Versickerungs- und Abflussmöglichkeiten für Starkniederschläge aufgrund der oft hohen Flächenversiegelung und dichten Bebauung. Niederschlagswasser fließt in Städten größtenteils oberflächlich ab, wird in der Kanalisation unterirdisch gesammelt und abtransportiert. Dieses meist zentral organisierte System kann an seine Grenzen geraten, wenn die Mengen an Niederschlagswasser die bemessene Aufnahmekapazität der Kanalisation übersteigt (TUM, 2020, S. 22 f.).

Retentionsmaßnahmen inner- und außerhalb von Städten und Siedlungen können Überschwemmungen und Mischwasserüberläufe der Kanalisation in die Gewässer verhindern bzw. verringern. Dabei werden Niederschlagswasser oder verschmutzte Mischwassermengen zentral zwischengespeichert und – sobald wieder

Kapazitäten frei werden – zum Klärwerk bzw. zur Aufbereitungsanlage geleitet und dort gereinigt. Zentral oder dezentral zurückgehaltenes Regenwasser kann auch von Pflanzen genutzt und verdunstet werden. Hinsichtlich der Aspekte Kosten und Flächenkonkurrenz sind *dezentrale Retentionsmaßnahmen*, wie i) *Multifunktionsflächen*, die nur im Falle eines Starkniederschlagsereignisses als Retentionsflächen für Niederschlagswasser genutzt werden (z.B. Parkplätze, Spielplätze, etc.), ii) *Zisternen* zur Speicherung und Nutzung von Regenwasser, aber auch iii) *Gründächer* besonders interessante Maßnahmen (LAWA, 2017, S. Anhang II-30). Außerdem kann die *Nutzung von Versickerungspotentialen* eine Überlastung der Kanalisation durch Niederschlagswasser vorbeugen. Dazu sollten möglichst viele dafür geeignete Flächen²⁹ vom Kanalsystem abgekoppelt und das Niederschlagswasser stattdessen dort dezentral in Mulden an Gebäuden oder Straßen versickert werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-31).

Die Umsetzung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung durch Privatpersonen kann durch Maßnahmen wie rechtliche Vorgaben (z.B. Entwässerungssatzungen der Kommunen, bauplanerische Festsetzung einer Regenrückhaltung auf Grundstücken), Förderprogramme (z.B. für Dachbegrünung oder Zisternenbau) und Informationen für die Öffentlichkeit unterstützt werden (LAWA, 2017, S. Anhang II-32).

²⁹ Nicht geeignet sind Flächen, die i) schadstoffbelastet sind, ii) wegen Bodenverdichtung nur bedingt versickerungsfähig sind und iii) wegen geringem Grundwasserflurabstand vernässungsgefährdet sind (LAWA, 2017, S. Anhang II-31).

4.7 Menschliche Gesundheit

Da die Gesundheit des Menschen in verschiedener Hinsicht von den klimatischen Folgen betroffen ist, sind Maßnahmen für folgende Aspekte erforderlich: Gesundheitliche Vorsorge, Hitze, UV-Strahlung, Vektorvermittelte Infektionskrankheiten und Ausbreitung von Allergenen.

4.7.1 Gesundheitliche Vorsorge

Die Befähigung zur Selbsthilfe und die Sensibilisierung der Bevölkerung bilden wichtige Bestandteile der gesundheitlichen Vorsorge. So kann z.B. ein hitzeangepasstes Verhalten einen wichtigen Beitrag zur Anpassung der Bevölkerung des Landkreises Forchheim an den Klimawandel leisten (vgl. Abschnitt 2.1). Informationen dazu müssen insbesondere der potentiell betroffenen und verwundbaren Bevölkerung über geeignete Medien bereitgestellt werden, wobei neben der gezielten Information die rechtzeitige Warnung wichtig ist (BBK, 2019, S. 45 f., 54, 57f.).

4.7.2 Hitze

Es gilt als sehr wahrscheinlich, dass auch im Landkreis Forchheim Hitzeperioden zukünftig häufiger auftreten und zu hitzebedingten Todesfällen führen werden. Hitzewellen belasten den menschlichen Organismus unmittelbar, wobei vor allem das Herz- und Kreislaufsystem betroffen ist. Besonders gefährdete Personen sind ältere Menschen und Menschen mit gestörter bzw. verlangsamer Regulierung der Körpertemperatur. Das Durstgefühl nimmt bei diesen Personengruppen ab und sie trinken zu wenig. Zusätzlich sinkt die Fähigkeit zu schwitzen, wodurch die Wärmeabgabe beeinträchtigt wird. Neben den älteren, pflegebedürftigen und kranken Menschen sind aber auch Säuglinge und Kleinkinder gefährdet (Mücke et al., 2009, S. 3 f.). Daneben sind Personengruppen von Hitzeereignissen besonders betroffen, die sich mittags und nachmittags viel im Freien aufhalten, wie z.B. Dachdeckerinnen und Dachdecker oder Maurerinnen und Maurer.

Der Deutsche Wetterdienst hat ein *Warnsystem* eingerichtet, das bundesweit auf Landkreisebene u.a. vor Hitze und UV-Belastung warnt und teilweise auch Verhaltensregeln empfiehlt (abrufbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen/warnWetter_node.html). Informationen über Hitzewarnungen können dann beispielsweise über die Homepage des Landkreises an die Bevölkerung weitergegeben und diese so informiert werden (Mücke et al., 2009, S. 4).

Die Kompetenzen des Landkreises zur Vermeidung von hitzebedingten Erkrankungen und Todesfällen liegen außerdem besonders in einer *vermehrten und verbesserten Information und Aufklärung der Bevölkerung und des medizinischen Fach- und Pflegepersonals* über die gesundheitlichen Folgen von Hitze sowie über mögliche Präventionsmaßnahmen im Rahmen eines Hitzeaktionsplanes. Zentraler Inhalt sollten Strategien und Verhaltensweisen zur Vermeidung von Dehydrierung des Menschen sein (Mücke et al., 2009, S. 4).

Tipps und Empfehlungen für Verhaltensweisen von Privatpersonen zum Schutz vor Hitze sind beispielsweise (Mücke et al., 2009, S. 6):

- *Beschränkung der Aktivitäten im Freien auf die Morgen- und Abendstunden*
- *Vermeiden von körperlichen Anstrengungen, auch Sport*
- *Aufenthalt bzw. Pausen im Schatten*
- *ausreichende Flüssigkeitszufuhr (Erinnerungen/ Kontrolle durch Trink-Apps möglich)*
- *Meiden von Alkohol und sehr kalten Getränken*
- *Aufenthalt bzw. Pausen in möglichst kühlen Räumen und an beschatteten Orten (siehe dazu Abschnitt 4.6)*

Außerdem sind Anpassungsmaßnahmen durch geeignete Architektur, Kommunal-, Stadt- und Landschaftsplanung nötig, um der gesamten Bevölkerung und insbesondere den genannten Risikogruppen bei Hitzewellen Erholungsorte zu bieten (Mücke et al., 2009, S. 4 f.). Durch die kommunale Beratung und Unterstützung bei der Aufstellung und Änderung von Flächennutzungsplänen und Bebauungsplänen kann das Landratsamt dabei entscheidende Hinweise und Anstöße liefern und Klimaanpassung in der Bauleitplanung fördern. Der Abschnitt 4.6 liefert dazu weitere, detailliertere Informationen.

4.7.3 UV-Strahlung

Intensive Sonneneinstrahlung, insbesondere deren UV-Anteil, führt zu Schäden an der Haut und den Augen. Zu den akuten Wirkungen gehören u.a. Sonnenbrand sowie Horn- und Bindehautentzündung. Häufige Sonnenbrände können zu Hautkrebs führen, wobei insbesondere häufige Sonnenbrände in Kindheit und Jugend zu gefährlichen Hautkrebsformen führen können.

Der Deutsche Wetterdienst hat ein *Warnsystem* eingerichtet, das bundesweit auf Landkreisebene u.a. vor UV-Belastung warnt und darin auch Verhaltensregeln empfiehlt (abrufbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen/warnWetter_node.html). Dieses Warnsystem liefert der Bevölkerung die Basis für einen sorgsamen Umgang mit dem Sonnenlicht.

Wesentliche Empfehlungen zum Schutz vor intensiver UV-Strahlung sind i) *der Aufenthalt im Schatten bzw. in Räumen*, ii) *Tragen von Sonnenhut und Sonnenbrille* und iii) *Sonnenschutz in Form von Kleidung oder Mitteln mit Lichtschutzfaktor 15 oder höher*.

Besonders betroffen von intensiver UV-Strahlung sind Personengruppen, die sich viel im Freien aufhalten. Für sie sind die o.g. Maßnahmen besonders wichtig.

4.7.4 Vektorvermittelte Infektionskrankheiten

Insgesamt wird von einer klimawandelbedingten steigenden Gefahr durch vektorvermittelte Infektionskrankheiten ausgegangen. Als Folge einer Erwärmung ist z.B. damit zu rechnen, dass sich heimische und eingeschleppte Vektoren durch kurze Generationsdauern, Verlängerung der jährlichen Aktivitätsperioden und durch höhere

Überlebensraten als Folge milderer Winter zunehmend vermehren werden. Trotzdem können regional auch Vektor-Dezimierungen auftreten, etwa bei Stechmücken durch das Austrocknen von Brutbiotopen. Das Klima ist allerdings nur ein Faktor von mehreren, die das Vorkommen und die Ausbreitung von Vektoren bestimmen. Weitere wichtige Faktoren sind der zunehmende globale Warenhandel und der Tourismus, die z.B. wesentlich zur Verbreitung der Asiatischen Tigermücke beitragen.

Die Anpassungsmaßnahmen im Bereich vektorübertragener Krankheiten sind relativ beschränkt, da i) zum Teil keine Impfmöglichkeiten existieren, ii) Therapien oft langwierig und nicht immer erfolgsversprechend sein können und iii) Bekämpfungsmaßnahmen gegen die tierischen Vektoren oft im Widerspruch zu Umwelt- und Naturschutzinteressen stehen. Außerdem fehlen für Aufklärungs- und Vorsorgemaßnahmen genaue, regionale Daten, Risikobewertungen und Informationen über den Zusammenhang mit dem Klimawandel.

In Deutschland haben die durch Schildzecken übertragenen Krankheiten Borreliose und Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) die größte Bedeutung. Der Landkreis Forchheim ist vom Robert-Koch-Institut beispielsweise als FSME-Risikogebiet ausgewiesen. Dementsprechend ist eine *vermehrte und verbesserte Information und Aufklärung der Bevölkerung* über Präventionsmaßnahmen von großer Bedeutung, die mit der Zeit und mit entsprechend verbessertem Wissensstand angepasst werden müssen. Schutzmaßnahmen gegen Zeckenbisse sind z.B. das Tragen geschlossener Kleidung, regelmäßiges Absuchen des Körpers auf Zecken sowie die Anwendung von Mitteln zur Abwehr von Insekten auf der Haut und auf der Kleidung. Außerdem wird in FSME-Risikogebieten eine Impfung empfohlen (Mücke et al., 2009, S. 7 ff.).

4.7.5 Ausbreitung von Allergenen

Die Klimaerwärmung lässt im Frühjahr bei den Pflanzen die Pollensaison zeitiger beginnen und teils länger andauern – die Pollensaison verlängerte sich bereits um 10 bis 12 Tage. Außerdem kann eine Zunahme der CO₂-Konzentration zu einer gesteigerten Pollenproduktion führen. Zudem besteht das Risiko der Einwanderung von Neophyten mit hochallergenen Pollen, wie z.B. der Beifuß-Ambrosie. Daher kann sich für Personen mit Asthma und Heuschnupfen die Beschwerdezeit verlängern und/ oder intensivieren (Mücke et al., 2009, S. 9 f.).

Die Anpassungskapazität gegenüber Allergenen ist sehr gering. Gegen hochallergene, invasive Arten, wie der Beifuß-Ambrosie, sollte präventiv gehandelt werden, d.h. es gilt deren lokale Ausbreitung und deren Pollenemissionen durch das Vernichten der Pflanze zu minimieren. Beim Entdecken von Ambrosiabeständen mit über 100 Pflanzen soll die zuständige Kreisverwaltungsbehörde kontaktiert werden. Weitere hilfreiche Informationen zum Umgang mit der Beifuß-Ambrosie sind unter folgendem Link abrufbar: <https://www.stmgp.bayern.de/vorsorge/umwelteinwirkungen/ambrosia-bekaempfung/>.

4.8 Katastrophenschutz

Bund, Länder und Kommunen teilen sich die Verantwortlichkeiten im Bevölkerungsschutz auf. Alle drei Ebenen arbeiten im Rahmen ihrer jeweiligen Zuständigkeitsbereiche zusammen, um die Bevölkerung vor Gefahren zu schützen, gefährliche Ereignisse vorzubeugen bzw. sich darauf vorzubereiten sowie sie zu bewältigen und deren Folgen zu begrenzen. In diesem Abschnitt wird vor allem die Anpassungskapazität des Katastrophenschutzes auf kommunaler Ebene behandelt (BBK, 2019, S. 9).

In der Deutschen Klimaanpassungsstrategie (DAS) wird betont, dass der Bevölkerungsschutz auf die Bewältigung von Extremereignissen und Großschadenslagen als seine Kernaufgabe grundsätzlich bereits gut eingestellt ist (BBK, 2019, S. 25), was den Aussagen der Expertinnen- und Experten-Interviews entspricht. Dies gilt insbesondere deshalb, da sich der Bevölkerungsschutz schon heute mit der Vorbeugung vor, der Vorbereitung auf und der Bewältigung von Folgen von Extremwetterereignissen befasst. Deswegen zeichnen sich sämtliche, im folgenden beschriebene Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel dadurch aus, dass sie auch dann sinnvoll sind, wenn klimatische Veränderungen nicht in dem derzeit angenommen Ausmaß auftreten oder ihre Auswirkungen weniger schwerwiegend sein sollten (BBK, 2019, S. 35). Als Ansatzpunkte für konkrete Anpassungsmaßnahmen werden in der DAS formuliert:

- Prüfung und ggf. Weiterentwicklung der Einsatztechnik und -taktik, damit der Bevölkerungsschutz seine Aufgaben auch weiterhin zuverlässig erfüllen kann
- Verbesserung der Information und Risikokommunikation aller Betroffenen, u.a. zur Stärkung der Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung
- Zeitnahe und effektive Warnung

Noch vor der Diskussion über konkrete Anpassungsmaßnahmen sowie deren Notwendigkeit und Durchführbarkeit, ist die *Auseinandersetzung mit dem Thema „Klimawandel“ in den Organisationen* sowie die *Bereitstellung eines zugeschnittenen Informationsangebots* für den Bevölkerungsschutz wichtig. Das am Landratsamt Forchheim angesiedelte Klimaschutzmanagement, das u.a. auch das Themenfeld „Klimaanpassung“ bearbeitet, ist ein geeigneter Ansprechpartner, um lokale Klimarisiken und klimatische Entwicklungen mit dem Bevölkerungsschutz zu kommunizieren. Dies stellt wiederum die Basis dafür dar, um „vor die Situation“ zu kommen und ermöglicht, die *Einsatzplanung/ Vorbereitung, Ausbildung/ Schulungen* und die *Ausstattung* gezielt für bestimmte Extremwetterereignisse anzupassen (BBK, 2019, S. 35 ff.). Im Landkreis Forchheim ist beispielsweise die Trockenheit ein bereits heute bekanntes Phänomen, weswegen zur Sicherstellung der Löschwasserversorgung Kooperationen mit Landwirtinnen und Landwirten geschlossen wurden, die in Trockenperioden ihre Güllefässer mit Wasser auffüllen und diese im Falle eines Einsatzes zur Verfügung stellen.

Um sinnvolle Maßnahmen auszuwählen, diese angemessen dimensionieren und bei Bedarf nachsteuern zu können, ist zudem ein *Monitoring*, d.h. eine systematische und kontinuierliche Erfassung bestimmter Größen, z.B.

Einsatzstatistiken, hilfreich. Diese und weitere Datensätze können offenlegen, ob sich ein Anpassungsbedarf ergibt und gleichzeitig dabei helfen, die Wirksamkeit von getroffenen Maßnahmen zu überprüfen. Dies ist keine neue Aufgabe für den Bevölkerungsschutz, es könnte aber die Eignung der Datensätze zur Analyse über eine Harmonisierung ggf. noch erhöht werden (BBK, 2019, S. 38 ff.).

Die gewonnenen Erkenntnisse können für eine planmäßige *Risikoanalyse* genutzt werden, sodass genauer abgeschätzt werden kann, mit welchen Ereignissen und Einsätzen im jeweiligen Zuständigkeitsgebiet gerechnet werden muss und welche *Ressourcen* notwendig sind. Hilfestellung und die Methodik zur Analyse kann die Broschüre "Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz" vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe liefern (BBK, 2019, S. 40).

4.8.1 Eigene Betroffenheit

Angesichts vergangener Ereignisse und Erkenntnisse aus der Klimaforschung ist eine Auseinandersetzung des Katastrophenschutzes mit Hitze und hitzebedingten Einsätzen sinnvoll. Um hitzebedingte Personalausfälle und damit einhergehende Beeinträchtigungen in der Einsatzfähigkeit zu vermeiden, ist es wichtig ein *Problembewusstsein für eine mögliche Betroffenheit* zu entwickeln, eine *hitzeangepasste Arbeitsumgebung* zu schaffen und *vor Sonne zu schützen*.

Durch die *Stärkung des Problembewusstseins* sollten alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie Helferinnen und Helfer im Bevölkerungsschutz über die *Gefahren einer Hitzewelle sowie hitzeangepasstes Verhalten* informiert sein, das *Wissen im eigenen Arbeitsalltag* umsetzen und *die eigenen Leistungsgrenzen erkennen und respektieren*. Auch Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Führungsebene müssen Rahmenbedingungen für die Umsetzung einer hitzeangepassten Arbeitsweise schaffen, etwa durch häufigere Pausen bis zur Planung für einen möglichen Personalausfall.

Außerdem sollte nach Möglichkeit ein Arbeitsumfeld geschaffen werden, das dem Personal die Arbeit unter Hitze erleichtert. Dies umfasst beispielsweise eine Kühlung der Räume bzw. eine Klimatisierung der Einsatzfahrzeuge, die Bereitstellung von ausreichend Mineralwasser, eine reduzierte Einsatzdauer und angepasste Einsatzkleidung. Bei Einsätzen im Freien könnten zudem Sonnenschutz (Schattenplatz, Kopfbedeckung, Sonnencreme, ...) und Insektenschutz (Insektenspray, Kleidung, ...) Erleichterung schaffen (BBK, 2019, S. 42–46).

Außerdem gilt es zu *überprüfen, inwiefern die eigenen Liegenschaften von den Auswirkungen extremer Wetterereignisse betroffen sein können*. Ob abgedeckte Dächer, versperrte Zufahrten oder überflutete Keller – letztlich können alle Probleme, zu deren Beseitigung der Katastrophenschutz in der Regel zur Hilfe gerufen wird, auch die Einsatzorganisationen selbst treffen und deren Arbeit behindern. So meldeten ca. 30 % der an einem Fragebogen beteiligten Katastrophenschutzeinrichtungen Stürme als Ursache für Schäden, während Starkniederschläge bei bereits rund 17 % der Befragten in der Vergangenheit Probleme verursachten (BBK, 2019, S. 50).

Kurz angeschnitten soll an dieser Stelle die Betroffenheit durch den Ausfall kritischer Infrastruktur werden, obwohl die Thematik im Rahmen der Interviews nicht angesprochen wurde. Von grundlegender Bedeutung bei diesem Thema ist die Vorsorge zur Sicherstellung der Einsatzfähigkeit bei Infrastrukturausfällen. Eine *systematische Bestandsaufnahme der eigenen Infrastrukturabhängigkeit* kann einen Überblick darüber verschaffen, inwiefern die eigene Einsatzfähigkeit aktuell unter den Bedingungen eines Ausfalls gegeben wäre. Für eine Reihe von Einrichtungen ist zwar z.B. eine Notstromversorgung vorgeschrieben – dies trifft jedoch nicht umfassend für alle im Bevölkerungsschutz tätigen Organisationen und ggf. nicht für alle Betriebsbereiche zu. Die aus der Überprüfung abgelesenen Probleme gilt es dann nicht nur zur Kenntnis zu nehmen, sondern nach Möglichkeit auch nach einem Umgang mit ihnen zu suchen. Eine Hilfestellung dafür bietet der Leitfaden "Basisschutz für Katastrophenschutz und Hilfsorganisationen" (BBK, 2019, S. 49).

4.8.2 Stärkung der Selbsthilfekapazität der Bevölkerung

In der Anfangsphase von Extremwetterereignissen können die lokal verfügbaren Ressourcen des Katastrophenschutzes ggf. nicht ausreichen, um allen Bedarfen zeitnah gerecht zu werden. Die Gefahrenabwehrbehörden müssen in solchen Situationen Prioritäten setzen. In vielen Fällen können Schäden mit einfachen Mitteln jedoch vermieden oder gemindert werden. Ein angepasstes Verhalten der Bevölkerung kann die Notwendigkeit von Einsätzen nämlich verhindern oder zumindest die Arbeit der Einsatzkräfte erleichtern. *Die Befähigung zur Selbsthilfe und die Sensibilisierung der Bevölkerung* können so einen wichtigen Bestandteil der lokalen Gefahrenabwehr bilden. Dies gilt neben Hochwasser, Stürmen und Sturzfluten (vgl. Abbildung 23) auch in Bezug auf Hitze, weswegen die Aufklärung der Bevölkerung zu gesundheitlichen Gefahren und zu einem hitzeangepassten Verhalten einen wichtigen Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel leisten kann.

Informationen dazu müssen insbesondere der potentiell betroffenen und verwundbaren Bevölkerung über geeignete Medien bereitgestellt werden, wobei neben der gezielten Information die rechtzeitige Warnung ein wesentliches Element der Gefahrenabwehr darstellt (BBK, 2019, S. 45 f., 54, 57f.).



Abbildung 23: Informationen zum Thema „baulicher Schutz“ stehen der Bevölkerung u.a. als Informationsflyer auf der Webseite des BKK zur Verfügung (BKK, 2019, S. 51)

4.9 Naturschutz und Landschaftspflege

„Der anthropogene Klimawandel bedroht nicht „die Natur“. Vielmehr bedroht er einerseits diejenigen Naturprodukte, Naturprozesse und Naturphänomene, die wir (derzeit) brauchen – z.B. weil er in ariden Gebieten zum Verlust landwirtschaftlicher Nutzflächen führt. Andererseits bedroht der Klimawandel den heutzutage erreichten Stand der Naturbeherrschung, auf dem wir uns vor vielen, aber keineswegs allen Gefahren durch Naturprozesse zu schützen vermögen – z.B. weil er zu einem Anstieg des Meeresspiegels und einer Zunahme von Extremwetterereignissen führt. Eine wichtige Forschungsfrage ist, ob und ggf. wie wir Menschen in der Lage sind, uns an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Dafür ist mit Blick auf 'Natur' entscheidend, ob und ggf. wie schnell sich Pflanzen und Tiere an die veränderten Klimabedingungen anpassen bzw. in nun für sie geeignete Habitate einwandern können. Entscheidend ist auch, ob die mehr oder weniger natürlichen ökologischen Systeme, die wir brauchen, z.B. Buchenwälder [...], weiterbestehen oder durch funktional äquivalente ökologische Systeme ersetzbar sein werden“ (Kirchhoff, 2016, S. 38).

Durch Flächenverluste, Landnutzungswandel, Zerschneidung der Landschaft, Entwässerung und anderen Eingriffen ist die Natur schon seit Jahrzehnten starken Beeinträchtigungen ausgesetzt. Mit dem Klimawandel kommt nun ein zusätzlicher Faktor hinzu, der Umweltbedingungen verändert und in hohem Maße ökologische Funktionen sowie die biologische Vielfalt beeinflusst sowie gefährdet. Durch die vielfältigen Auswirkungen von Klimaänderungen wächst z.B. die Gefahr von Artenverlusten, insbesondere an Feuchtstandorten (z.B. Talauen), in aquatischen Ökosystemen (z.B. kleine Stand- und Fließgewässer) und in höheren Lagen der Mittelgebirge (LfU, 2007, S. 16 & 20).

Außerdem können neue invasive Arten zu enormen Störungen in Ökosystemen führen, deren Konsequenzen nur schwer abschätzbar sind. Aber auch Klimaschutzmaßnahmen können den Naturhaushalt und die biologische Vielfalt beeinträchtigen. Beispielsweise können ein großflächiger agrarischer Anbau nachwachsender Rohstoffe oder der Energieholzanbau zu Konflikten mit den Interessen des Naturschutzes führen (LfU, 2007, S. 20 f.).

Ökosystembasierte Ansätze im Sinne des Naturschutzes können aber teilweise auch gezielt eingesetzt werden, um einen Beitrag zur Klimaanpassung (und auch zum Klimaschutz) zu leisten. Dabei können jene Ansätze technische Maßnahmen ergänzen oder teilweise sogar ersetzen, sofern technische Maßnahmen überhaupt zur Verfügung stünden (Jessel, 2020, S. 9). Dies trifft insbesondere für Anpassungsmaßnahmen der Handlungsfelder Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Obstbau sowie Stadt- und Kommunalplanung zu, wobei nachfolgend beispielhaft einige bereits beschriebene ökosystembasierte Klimaanpassungsmaßnahmen nochmals stichpunktartig aufgelistet werden:

- Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft, etwa durch begrünte Abflussmulden, einer Bodenbedeckung von mindestens 30 %, Retentionsbecken oder landschaftlicher Vielfalt (vgl. Abschnitt 4.1.1.1)

- Maßnahmen zur Sicherung der Gewässerqualität etwa durch Beschattung von Fließgewässern durch Ufergehölze, Boden- und Erosionsschutzmaßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen und einer reichhaltigen morphologischen Gewässerstruktur und -dynamik (vgl. Abschnitt 4.1.2.3)
- Erhalt, Sicherung und ggf. Ausweitung von Grünland entlang von Gewässern, Gräben und Geländesenken (vgl. Abschnitt 4.1.2.3)
- Windschutzstreifen bzw. Hecken zur Verminderung der Windgeschwindigkeit auf landwirtschaftlichen Schlägen sowie zur Erhöhung der Bodenfeuchte trockener Standorte (vgl. Abschnitt 4.5.2.4)
- Maßnahmen zur Förderung klimaresilienter Wälder, etwa durch Waldumbau hin zu Mischwaldbeständen aus einem Pool mit standortangepassten, heimischen Baumarten wie der Elsbeere (vgl. Abschnitt 4.4.1.1)
- Maßnahmen zur Förderung stabiler Waldränder, insbesondere durch gestufte Waldränder mit hitze- und trockenoleranten Baum- und Straucharten (vgl. Abschnitt 4.4.2)
- Maßnahmen zur Vorbeugung und Abwehr von Trocken- und Hitzeschäden im Obstbau, etwa durch geeignete Sortenwahl aus einem Pool an Obstsorten (inkl. alter Sorten), deren Resistenzeigenschaften in Zukunft von Interesse sein können (vgl. Abschnitt 4.3.1)
- Maßnahmen in der Stadt- und Kommunalplanung zur Schaffung kühler Rückzugs- und Erholungsorte im Stadtgebiet, etwa durch Stadtbegrünung sowie Sicherung von Kaltluftentstehungsgebieten um das Siedlungsgebiet (vgl. Abschnitt 4.6)

Diese beispielhaft genannten Maßnahmen können ganz grundlegend zur Aufrechterhaltung und Gewährleistung der ökologischen Funktionalität im Landkreis Forchheim sowie davon abhängiger ökologischer Funktionen, wie sauberes Grundwasser, Hangstabilität und Bestäubung von Obstbäumen, beitragen (LfU, 2007, S. 17). Viele dieser genannten Maßnahmen (wie z.B. Retentionsflächen) bieten die Möglichkeit einer Verknüpfung von Naturschutzinteressen mit Klimaanpassungsmaßnahmen. Beispielsweise können Hecken, Retentionsflächen und Waldränder zu Oasen der Biodiversität werden. Die *funktionelle Vielfalt ökologischer Systeme* und ihre *Strukturvielfalt* sind wichtige Faktoren zur Milderung der Auswirkungen von Klimaänderungen (LfU, 2007, S. 21).

Mit Blick auf den Erhalt funktionaler ökologischer Systeme ist entscheidend, ob und ggf. wie schnell sich Pflanzen und Tiere an die veränderten Klimabedingungen anpassen bzw. in nun für sie geeignete Habitats einwandern können (Kirchhoff, 2016, S. 38). *Durch die Vergrößerung und Vernetzung von Habitats können Wandlungsmöglichkeiten geschaffen werden*, welche die geographische Anpassungsfähigkeit von Arten unterstützen können. Hierzu müssen aber zunächst erhaltenswürdige und erhaltensfähige Lebensräume identifiziert werden, denn es ist nur sinnvoll, jene Lebensräume zu vernetzen, die auch in Zukunft noch funktionell erhalten bleiben werden (Hein et al., 2009, S. 54). Bis auf einige Feuchtstandorte, wie (periodisch) trockenfallende Quellen und Quellbereiche, kleine Fließ- und Stillgewässer (inkl. deren Ufersäume und Staudenfluren), sowie Waldmäntel

und Laubmischwälder feuchter bis nasser Standorte (inkl. standortgerechter Auenwälder und gewässerbegleitender Wälder), zeichnen sich nach Interviewaussagen aktuell keine großräumigen Lebensraumveränderungen im Landkreis Forchheim ab. Allerdings werden sich wohl Trockenstandorte räumlich ausdehnen. Daher gibt es eine Vielzahl an Lebensräumen, die zur Vernetzung von Habitaten dienen könnten, u.a. die Felsbiotope, Wacholderheiden, Kalk-Magerrasen, Sandmagerrasen im Regnitztal (Trockenstandorte) sowie die Quellen und Bäche in der Fränkischen Schweiz, die idyllischen Wiesentäler, inkl. der Wasserwiesen (Feuchtstandorte), wie auch die ausgedehnten Streuobstbestände. Aber auch Gehölzstrukturen wie die bereits erwähnten Hecken mit überwiegend einheimischen, standortgerechten Arten oder Waldmäntel bieten ökologisch wertvolle Lebensräume, deren Vernetzung Wanderungsmöglichkeiten schaffen könnten. Außerdem können diese dazu beitragen, die *Agrarlandschaft als Lebensraum zu erhalten oder wiederherzustellen*, was einerseits zur Erhaltung der Biodiversität unbedingt erforderlich ist (Heißenhuber et al., 2015, S. 255), andererseits aber auch eine ökosystembasierte Klimaschutzanpassungsmaßnahme darstellt. Grundstein für die Durchgängigkeit und Vernetzung von Lebensräumen ist der *Rückbau bzw. die Umgestaltung von Ausbreitungsbarrieren*, wie Fließgewässerverbauungen und intensiv genutzte Flächen (LfU, 2007, S. 21).

Außerdem soll grundsätzlich die *Erhaltung ausreichend großer Populationen heimischer Arten, inkl. deren Beobachtung*, angestrebt werden, wofür hinreichend große Habitate bereitzustellen sind (LfU, 2007, S. 21). Regional muss aber die langfristige Erhaltung aller bislang vorkommender Arten und die Verhinderung der Zuwanderung neuer potentiell invasiver Arten als unrealistisch betrachtet werden (Hein et al., 2009, S. 54). Zudem sollten Arten, die in Oberfranken endemisch sind oder dort ihren Verbreitungsschwerpunkt haben, besonders intensiv *beobachtet* werden. Dazu gehören im Landkreis Forchheim insbesondere endemische Mehlbeeren, die man vor allem an Waldrändern oder auf kargen Felsstandorten findet und die wohl vom Klimawandel profitieren werden. Früher waren Mehlbeeren viel weiter verbreitet und häufiger, da in der Frankenalb die meisten Wälder als Nieder- oder Mittelwald genutzt wurden, wodurch austriebsfreudige und Lichtbaumarten wie die Mehlbeere gefördert wurden (LPV Forchheim, 2011).

Allerdings ist es schon aus evolutionsbiologischer Sicht nicht möglich, einen gegebenen Artbestand auf Dauer zu erhalten; es ist lediglich möglich, seinen viel zu raschen Schwund zu verlangsamen, wobei man auch Prioritäten setzen muss. Was auf Dauer allerdings möglich ist, dem Artbestand nützt und vielleicht sogar die praktikabelste Umsetzung der Biodiversitäts-Konvention darstellt, ist die *Erhaltung der Vielfalt von Habitaten, Lebensräumen sowie landschaftlicher Struktur* und damit einhergehend auch der landschaftlichen Vielfalt. Dieser Weg führt zurück in die Kulturlandschaft, bedarf aber zwingend eine Abstimmung mit der Agrarpolitik und der Landnutzung, die aus Wettbewerbsgründen selbstverständlich den modernen Anforderungen der Nahrungs- und Rohstoffherzeugung angepasst sein muss. Hierfür liegen seit Jahrzehnten geeignete Konzepte vor, wie das bereits 1971 entworfene Konzept der *„differenzierten Landnutzung“*, worin 10 % der genutzten Fläche als durchschnittlicher Mindestwert für die spontane Entwicklung von Natur vorgesehen sind, während die restliche Fläche standortangepasst bewirtschaftet und Flächenversiegelung vermieden werden soll (vgl. Abbildung 24) (Haber, 2008, S. 22 f.).

Nachhaltige (umweltverträgliche) Landwirtschaft durch differenzierte Landnutzung und biotische Anreicherung

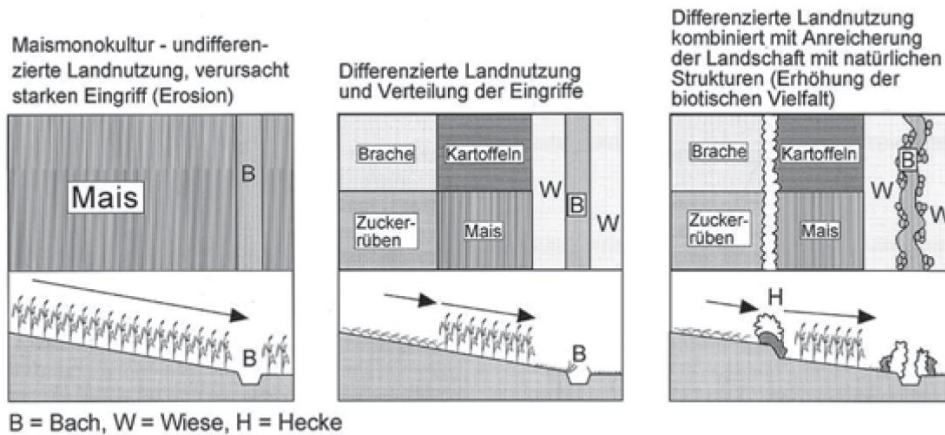


Abbildung 24: Schema der differenzierten Landnutzung (Haber, 2008, S. 22)

So kann Biodiversität als unbestreitbar wichtiges Ziel weitaus wirkungsvoller durch eine Vielfalt von Landnutzungssystemen und -strukturen einschließlich von Habitaten gefördert werden (Haber, 2008, S. 15), ohne dass Energie und Ressourcen des Naturschutzes zu sehr für den – auch klimabedingten – nicht möglichen Erhalt des gegebenen Artbestandes verwendet werden.

Diese Problematik wird beispielsweise bei der europäischen Vogelschutzrichtlinie und FFH-Richtlinie deutlich, welche die Mitgliedstaaten zur Errichtung des zusammenhängenden Schutzgebietssystems Natura 2000 verpflichten, mit dem Ziel, das europäische Naturerbe zu schützen und zu erhalten. Bei der Entstehung der genannten Richtlinien spielte der Aspekt des Klimawandels keine Rolle. Der Klimawandel kann aber einerseits manche Arten und Habitate negativ beeinträchtigen (z.B. Feuchtstandorte), während andere von den Veränderungen profitieren können (z.B. Trockenstandorte). Es stellt sich daher die Frage, inwieweit die Regelungen in der Lage sind, das europäische Naturerbe auch unter veränderten klimatischen Bedingungen zu erhalten (Schumacher & Schumacher, 2013). Daher wird diskutiert, die Richtlinie flexibler zu gestalten, sodass mehr FFH-Arten als Schutzgüter der Natura-2000 Gebiete gelten und erhaltenswert sind oder Definitionen und Kriterien der FFH-Lebensraumtypen so erweitert werden, dass Veränderungen im Artenbestand, die durch den Klimawandel bewirkt werden, möglich sind. So soll das wichtigste naturschutzfachliche Instrument der Klimaanpassung, die „Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung von Schutzgebieten“, erreicht werden (Schlumprecht et al., 2010, S. 72).

Das Konzept der differenzierten Landnutzung wird außerdem als Form eines „nachhaltigen Landmanagements“ bezeichnet und als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel gesehen. Das Ziel, eine großflächig-einheitliche Landnutzung durch vielfältig-angepasste Nutzungsformen und durch natürliche Strukturelemente möglichst zu verhindern, bewirkt viele ökologische Vorteile der Klimaanpassung, etwa eine erosions- und abflussmindernde Wirkung, den Erhalt bzw. Ausbau naturnaher Fließgewässer, ein zeitlich stark entzerrtes Ausbringen

umweltbelastender Stoffe, den Erhalt von Biotopen wildlebender Pflanzen- und Tierarten, aber auch den Erhalt heterogener Landschaften und ihrer touristischen Attraktivität (Haber et al., 2010, S. 379 f.).

So kann dieser Ansatz auch die "Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie den Erholungswert von Natur und Landschaft" steigern, der als drittes Ziel des Naturschutzes und der Landschaftspflege im Paragraphen 1 des Bundesnaturschutzgesetzes definiert ist. Gerade für den Landkreis Forchheim mit seiner einzigartigen, historisch gewachsenen Kulturlandschaft ist dieser Ansatz vielversprechend. Denn die dortige Kulturlandschaft ist durch großflächige Obstbaumbestände, Mittelwälder (Kirchehrenbach), die Wiesenbewässerung, aber auch Sommerkeller charakterisiert und u.a. wegen ihrer Bedeutung für den Naturschutz sowie den Tourismus und ihrer Identifikationskraft von gesellschaftlichem Wert (LfU & BLfD, 2004).

Priorisierung

In Anlehnung an die Priorisierung von Maßnahmen im Gewässerschutz, sollten im Naturschutz und der Landschaftspflege jene Maßnahmen *höchste Priorität* haben, die eine weitere Schädigung funktionaler Ökosysteme verhindern (z.B. Erhalt der verbliebenen naturnahen Flussauen, Erhalt von Grünland an Gewässern, Erhalt der Schutzfunktion von Wäldern an Hängen, Erhalt von Trocken- und Magerrasen und strukturreicher Landschaften). Danach folgen Schutz- und Restaurierungsmaßnahmen, die auch zum unmittelbaren Schutz von Menschen und Gütern notwendig sind (v.a. hydraulische Verlangsamung des sekundären Gewässernetzes durch Aufweitung und Begrünung enger Grabenprofile, Retentionsflächen, Förderung von Stadtgrün). Schließlich sollten Maßnahmen ergriffen werden, welche die Lebensumwelt des Menschen und der Arten erhalten, stabilisieren und – wo notwendig – restaurieren (z.B. Wiederanbindung und Restaurierung von Auensystemen in Gebieten mit guten Umsetzungschancen) (Geist & Auerswald, 2019, S. 14 ff.).

4.10 Zusammenfassung

Eine tabellarische Zusammenfassung der im Kapitel 0 beschriebenen Maßnahmen können den Abschnitten 0 bis 0 im Anhang entnommen werden. Das Vorgehen orientierte sich dabei am „Klimalotsen“ des Umweltbundesamtes (Haße & Kind, 2019; UBA, 2016).

5 Kommunikation, Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzung

Eine zentrale Aufgabe des Landkreises Forchheim wird es sein, Klimaänderungen und die in dieser Klimaanpassungsstrategie vorgestellten Klimaanpassungsmaßnahmen der Öffentlichkeit und den Kommunen zu kommunizieren. Hierzu kann eine Vielzahl an Instrumenten verwendet werden, wie Informationsveranstaltungen, Informationsmaterialien wie Flyer und Broschüren, Beiträge in lokalen Medien und das Internet. Ein besonders gutes Mittel der Sensibilisierung dieser Thematik sind Abbildungen und Karten. Kommunikationsinstrumente sollten dabei zielgruppenorientiert eingesetzt werden und sich vorrangig an besonders betroffene Akteurinnen und Akteure richten. Wichtig sind aber auch Multiplikatorinnen und Multiplikatoren, die mit besonders betroffenen und verwundbaren Akteurinnen und Akteuren in Verbindung stehen (UBA, 2016, S. 29).

Die Kommunikation von Maßnahmen und Strategien ist eng mit der Kommunikation von Betroffenheiten durch den Klimawandel verbunden. Sie sollte ein ausgewogenes Verhältnis von analytisch-wissenschaftlichen und emotionsbezogenen Elementen aufweisen (UBA, 2016, S. 57). Daher und aufgrund der Breite des Themenfeldes „Klimaanpassung“ ist es hierbei besonders wichtig, mit Fachleuten sowie Akteurinnen und Akteuren aus der Praxis eines jeden Handlungsfeldes vernetzt zu bleiben, gemeinsam Informationsveranstaltungen abzuhalten, gleiche Inhalte zu vermitteln und die vorgeschlagenen Klimaanpassungsmaßnahmen zu evaluieren (vgl. Abschnitt 6).

6 Monitoring und Evaluation

Es ist wichtig, den Anpassungsprozess im Landkreis Forchheim zu beobachten und zu evaluieren. So können der Fortschritt und erste Ergebnisse der Anpassungsstrategie bewertet sowie neue oder unerwartete Entwicklungen rechtzeitig erkannt und ggf. nachgesteuert werden. Denn die Anpassung an den Klimawandel ist ein kontinuierlicher Prozess und kein einmaliges Vorhaben. Rahmenbedingungen für die Klimaanpassung, wie z.B. Betroffenheiten oder der rechtliche Rahmen, stellen kein statisches System dar, sondern verändern sich mit der Zeit und beeinflussen sich manchmal gegenseitig. Die große Herausforderung besteht deshalb darin, Maßnahmen oder Strategien mit langfristigen Zielen in einem sich stetig ändernden Umfeld aktuell und wirkungsvoll zu halten. Daher ist es wichtig, die vorgeschlagenen Maßnahmen bzw. die Klimaanpassungsstrategie regelmäßig zu überprüfen und zu aktualisieren, z.B. in einem fünfjährigen Rhythmus (UBA, 2016, S. 59 f.).

Dieses Vorgehen entspricht einer prozessorientierten Evaluation der Klimaanpassungsmaßnahmen, weil bereits während des Prozesses der Anpassung die Geeignetheit und Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen überprüft werden. Eine ergebnisorientierte Evaluation der Klimaanpassungsmaßnahmen hingegen ist in der Praxis schwer umsetzbar, da die Maßnahmen komplex sind und ihre Wirkung häufig erst nach langen Zeiträumen zeigen. Ziel der ergebnisorientierten Evaluation ist es zu prüfen, wie sich die Verwundbarkeit des Landkreises seit Beginn des Anpassungsprozesses verändert hat. Diese Art der Überprüfung bedarf auch einer Wiederholung der Bewertung der Empfindlichkeit und Betroffenheit gegenüber Klimaänderungen. Dementsprechend aufwändiger ist diese Art der Evaluation im Vergleich zur prozessorientierten Evaluation (UBA, 2016).

Das prozess- und ergebnisorientierte Monitoring und die Evaluation werden vom Klimalotsen des Umweltbundesamtes auf kommunaler Ebene empfohlen (UBA, 2016). Sie sind aber auf kommunaler Ebene einfacher zu handhaben als auf Landkreisebene, da sich auf Landkreisebene ein sehr hoher Arbeitsaufwand ergeben würde, um z.B. für den gesamten Landkreis Daten bzw. Aussagen darüber zu erhalten, in welcher Kommune wie viele Stadtbäume seit Veröffentlichung der Klimaanpassungsstrategie gepflanzt wurden. Aufgrund des hohen Anteils an Privatwaldbesitzerinnen und Privatwaldbesitzern im Landkreis Forchheim ist es zudem beispielsweise sehr aufwändig zu evaluieren, wie der private Waldumbau im Landkreis Forchheim voranschreitet.

Daher wird für den Landkreis Forchheim empfohlen, ein prozessorientiertes Monitoring durchzuführen, das die prognostizierten Klimaänderungen sowie die Aktualität, Praktikabilität, Wirksamkeit und Priorisierung der vorgeschlagenen Klimaanpassungsmaßnahmen regelmäßig überprüft.

7 Literatur

- Ableidinger, C., Erhart, E., Sandler, K., Kromp, B., & Hartl, W. (2020). *Forschungsstudie: Klimaschutz durch Bodenschutzanlagen* (S. 81) [Endbericht]. Bio Forschung Austria.
http://www.unserboden.at/files/1_endbericht_klimagr__n_forschungsstudie_bfa.pdf.
- adelphi, PRC, EURAC. (2015). *Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel* (Nr. 24/2015; CLIMATE CHANGE). Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlandsgegenueber-dem>.
- AELF Bamberg. (2019). *Die Land- und Forstwirtschaft in Bamberg und Forchheim – Zahlen und Fakten 2019*.
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). Organische Bodensubstanz. In W. Amelung, H.-P. Blume, H. Fleige, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretschmar, K. Stahr, & B.-M. Wilke (Hrsg.), *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (S. 63–102). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3_3.
- Auerswald, K. (2019). Grünlandverlust – Ursachen und Wirkungen. *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 6*, 17-20.
- Auerswald, K., Fischer, F. K., & Winterrath, T. (2020). R-Faktor – Regenerosivität. In Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), *Pilotstudie „Klimawirkungskarten Bayern“* (S. 240). Copernicus GmbH. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1535257/1535257.pdf>.
- Auerswald, K., Fischer, F. K., Winterrath, T., & Brandhuber, R. (2019). Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hydrology and Earth System Sciences, 23(4)*, 1819-1832. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>.
- Auerswald, K., & Geist, J. (2018). Extent and Causes of Siltation in a Headwater Stream Bed: Catchment Soil Erosion is Less Important than Internal Stream Processes. *Land Degradation & Development, 29(3)*, 737-748. <https://doi.org/10.1002/ldr.2779>.
- Bayerisches Landesamt für Statistik. (2020). *Landkreis Forchheim 09 474 – Eine Auswahl wichtiger statistischer Daten* (Statistik kommunal 2019, S. 30) [Datenblatt]. Bayerisches Landesamt für Statistik. https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/statistik_kommunal/2019/09474.pdf.

- BaySF. (2020). *Waldbauhandbuch Bayerische Staatsforsten: Richtlinie zur Baumartenwahl* (Richtlinie Nr. 7; Waldbau, Naturschutz, Jagd und Fischerei, S. 10). Bayerische Staatsforsten. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/04-wald_verstehen/Publikationen/Waldbauhandbuch_neu/Bayerische_Staatsforsten_Richtlinie_Baumartenwahl.pdf.
- BBK. (2019). *Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz* (Fachinformation Band 5; Praxis im Bevölkerungsschutz). Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.
- Besselaar, E. J. M., Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Tank, A. M. G. K., & Laatz, A. T. J. (2015). Relationship between sunshine duration and temperature trends across Europe since the second half of the twentieth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(20), 10,823-10,836. <https://doi.org/10.1002/2015JD023640>.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., ... Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, *573*(7772), 108-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>.
- BMBF. (o.J.). C3-Pflanzen. <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/c3-pflanzen-831>.
- BMEL. (2020). *Erntebericht 2020* [Statistik]. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ernte-Bericht/ernte-2020.pdf.
- Buras, A., Schunk, C., Zeiträg, C., Herrmann, C., Kaiser, L., Lemme, H., Straub, C., Taeger, S., Gößwein, S., Klemmt, H.-J., & Menzel, A. (2018). Are Scots pine forest edges particularly prone to drought-induced mortality? *Environmental Research Letters*, *13*(2), 025001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa0b4>.
- Ceglar, A., Zampieri, M., Toreti, A., & Dentener, F. (2019). Observed Northward Migration of Agro-Climatic Zones in Europe Will Further Accelerate Under Climate Change. *Earth's Future*, *7*(9), 1088-1101. <https://doi.org/10.1029/2019EF001178>.
- Costa, R. (2000). *Waldrand – Ein Lebensraum voller Überraschungen* (Faktenblatt Faktenblatt 7; S. 11). Amt für Wald Graubünden. <https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/naturschutz/artenschutz/waldrand-lebensraum-voller-ueberraschungen>.

- Dimke, P. (2015). Spätfrostschäden – Erkennen und vermeiden. *LWF Merkblatt*, 31, 1-3.
- Donat, M. G., Leckebusch, G. C., Wild, S., & Ulbrich, U. (2011). Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1351-1370. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1351-2011>.
- DVL (Hrsg.). (2006). *Landschaftselemente in der Agrarstruktur – Entstehung, Neuanlage und Erhalt: DVL-Schriftenreihe „Landschaft als Lebensraum“, Heft 9*. https://www.dvl.org/uploads/tx_ttproducts/datash eet/DVL-Publikation-Schriftenreihe-9_Landschaftselemente_in_der_Agrarstruktur.pdf.
- DWA. (2010). *Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft* (DWA-Themen, S. 32). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA. (2016). *Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW) Teil 1: Richtlinien für die Anlage und Dimensionierung ländlicher Wege* (Richtlinien Arbeitsblatt DWA-A 904-1; DWA Regelwerk). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V (DWA).
- DWD. (o.J.). Frostgare. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/landwirtschaft/agrar_modelle/frostgare.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- DWD. (2020a). *KOSTRA-DWD*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html.
- DWD. (2020b, September 15). *Climate Data Center*[Opendata]. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/.
- Elsäßer, M., Wurth, W., & LAZBW Fachbereich Grünlandwirtschaft Aulendorf. (2019). *Grünland verbessern und erneuern* (Merkblatt 7 (5. Auflage); Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung). Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg (LAZBW).
- Fischer, F. K., Winterrath, T., & Auerswald, K. (2018). *Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data* [Preprint]. Hydrometeorology/ Instruments and observation techniques. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-504>.
- Foken, T., & Lüers, J. (2015). Regionale Ausprägung des Klimawandels in Oberfranken. *Bayreuther Kontaktstudium Geographie*, 8, 33-42.
- Forstbetrieb Forchheim. (2020). *Forstbetrieb Forchheim im Klimawandel*[Steckbrief]. Bayerische Staatsforsten.

- Forster, M., Falk, W., & Reger, B. (2019). *Praxishilfe: Klima-Boden-Baumartenwahl*. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/praxishilfe_baumarten_bf.pdf.
- Früh-Müller, A., Wegmann, M., & Koellner, T. (2015). Flood exposure and settlement expansion since pre-industrial times in 1850 until 2011 in north Bavaria, Germany. *Regional Environmental Change*, *15*(1), 183-193. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0633-9>.
- Gebhardt, T., Grams, T., Häberle, K.-H., Matyssek, R., Schulz, C., Grimmeisen, W., & Ammer, C. (2012). Helfen Durchforstungen bei Trockenheit? Erste Ergebnisse eines Versuches zur Verbesserung der Wasserversorgung junger Fichtenbestände. In LWF, *LWF aktuell 87: Forstliche Klimaforschung – Den Wandel durchschauen* (S. 60). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a87_komplett.pdf.
- Geist, J., & Auerswald, K. (2019). Synergien im Gewässer-, Boden-, Arten- und Klimaschutz am Beispiel von Flussauen. *Wasserwirtschaft*, *109*(11), 11-16.
- Gillett, N. P., Kirchmeier-Young, M., Ribes, A., Shiogama, H., Hegerl, G. C., Knutti, R., Gastineau, G., John, J. G., Li, L., Nazarenko, L., Rosenbloom, N., Seland, Ø., Wu, T., Yukimoto, S., & Ziehn, T. (2021). Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period. *Nature Climate Change*, 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00965-9>.
- Goemann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J.-H., Frühauf, C., Hauschild, M., Krengel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.-J., Müller, J., Musshoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., & Zimmer, Y. (2015). *Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen* (Bd. 30). Johann Heinrich von Thünen-Institut. <https://doi.org/10.3220/REP1434012425000>.
- Goodsman, D. W., Grosklos, G., Aukema, B. H., Whitehouse, C., Bleiker, K. P., McDowell, N. G., Middleton, R. S., & Xu, C. (2018). The effect of warmer winters on the demography of an outbreak insect is hidden by intraspecific competition. *Global Change Biology*, *24*(8), 3620-3628. <https://doi.org/10.1111/gcb.14284>.
- Greif, H., Mattiaske, B., Weiler-Rahnfeld, I., Kreppel, M., Keilholz, S., Wrede, F., Schilling, H., Dümmler, W., Görl, M., Nützel, W., Buchholz, U., Hurnik, C., Hack, S., & Flake, O. (2020). *Interviews zur Erfassung der Klimawirkung im Landkreis Forchheim im November/ Dezember 2020*. [Telefon].

- Haber, W. (2003). Anforderungen an einen modernen Hochwasserschutz. In LWF (Hrsg.), *Hochwasserschutz im Wald* (S. 1-7). <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/w40-hochwasserschutz-in-wald.pdf>.
- Haber, W. (2008). Naturschutz in der Kulturlandschaft – Ein Widerspruch in sich? *Laufener Spezialbeiträge*, 08(1), 15-25.
- Haber, W., Bückmann, W., & Endres, E. (2010). Anpassung des Landmanagements in Europa an den Klimawandel. *Natur und Recht*, 32(6), 377-383. <https://doi.org/10.1007/s10357-010-1883-z>.
- Haße, C., & Kind, C. (2019). Updating an existing online adaptation support tool: Insights from an evaluation. *Climatic Change*, 153(4), 559-567. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2166-6>.
- Hein, R., Steinbauer, M., Schlumprecht, H., Reineking, B., Jentsch, A., & Beierkuhnlein, C. (2009). Auswirkungen des Klimawandels auf Fauna, Flora und Lebensräume sowie Anpassungsstrategien des Naturschutzes. In BfN (Hrsg.), *Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland V – Ergebnisse und Dokumentation des 5. Workshops an der Internationalen Naturschutzakademie des Bundesamtes für Naturschutz, Insel Vilm, 7.-10.12.2008*.
- Heißenhuber, A., Haber, W., & Krämer, C. (2015). *30 Jahre SRU-Sondergutachten „Umweltprobleme der Landwirtschaft“ – Eine Bilanz*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_28_2015_umweltprobleme_der_landwirtschaft.pdf.
- Henke, L., & Trieschmann, M. (2020). *Zwischenfruchtanbau in Zeiten des Klimawandels – Teil 2* (Nr. 03; Naturland Nachrichten, S. 1-6). https://www.naturland.de/images/Erzeuger/Fachthemen/NaturlandNachrichten/20/ZWISCHENFRUCHTANBAU_IN_ZEITEN_DES_KLIMAWANDELS_1u2.pdf.
- Herrmann, J., & Bader, J. (o. J.). *Körnerleguminosen und Klimawandel* (S. 5) [Sachbericht]. DemoNet Erbse Bohne.
- Hinrichs-Berger, J. (2004). Weißeln von Obstbäumen zur Vermeidung von Frostrissen und Stamminfektionen mit *Pseudomonas syringae*. *Gesunde Pflanzen*, 56(2), 48-54. <https://doi.org/10.1007/s10343-004-0019-x>.
- Hoepe, P. (2016). Trends in weather related disasters – Consequences for insurers and society. *Weather and Climate Extremes*, 11, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.002>.

- Holsten, A., Dominic, A. R., Costa, L., & Kropp, J. P. (2013). Evaluation of the performance of meteorological forest fire indices for German federal states. *Forest Ecology and Management*, *287*, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.035>.
- IGB. (2018). *IGB Dossier. Seen im Klimawandel. Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung*. Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei. https://www.igb-berlin.de/sites/default/files/media-files/download-files/IGB_Dossier_Seen_im_Klimawandel_2018_WEB.pdf.
- Inouye, D. W. (2000). The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters*, *3(5)*, 457-463. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00165.x>.
- Jessel, B. (2020). *Biodiversität und Klima: Naturschutz und Klimaschutz zusammen denken. Öffentliches Fachgespräch im Umweltausschuss des Deutschen Bundestags zum Thema „Biodiversität und Klima“ am 12. Februar 2020*. Bundesamt für Naturschutz. https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/presse/2020/Dokumente/StellungnahmeBfN_Jessel_Klimawandel_Anhoerung_Umweltausschuss_12022020_final_bf_1.pdf.
- Kalny, G., Laaha, G., Melcher, A., Trimmel, H., Weihs, P., & Rauch, H. P. (2017). The influence of riparian vegetation shading on water temperature during low flow conditions in a medium sized river. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, *418*, 5. <https://doi.org/10.1051/kmae/2016037>.
- Kirchhoff, T. (2016). Erläuterungen [Der Klimawandel: Eine naturvermittelte Zumutung von Menschen für andere Menschen]. In R. Pfriem (Hrsg.), *Natur und Evolution als ZuMutungen an eine zukunfähige Gestaltung von Wirtschaft und Gesellschaft* (S. 38-39). dbv.
- Kohlpainter, M., Huber, C., & Göttlein, A. (2014). Wiederbewaldung und Stoffhaushalt auf Windwurfflächen im Kalkalpin: Ergebnisse von den SicApl Untersuchungsflächen im Lattengebirge. In LWF, *LWF aktuell 99: Bestände verjüngen – Natürlich!* (S. 56). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a99_gesamt_bf_geschuetzt.pdf.
- Kölling, C., Beinhofer, B., Hahn, A., & Knoke, T. (2010). „Wer streut, rutscht nicht“ – Wie soll die Forstwirtschaft auf neue Risiken im Klimawandel reagieren? *Allg. Forst. Z. Waldwirtsch. Umweltvorsorge*, *5/2010*, 18-22.
- Kollmann, J. (2019). Stillgewässer. In J. Kollmann, A. Kirmer, S. Tischew, N. Hölzel & K. Kiehl (Hrsg.), *Renaturierungsökologie* (S. 151-170). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54913-1_10.

- Kröling, C. (2021). *Apfelanbau im Klimawandel* (Heft 5; Schriftenreihe). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Küstermann, B., Munch, J. C., & Hülsbergen, K.-J. (2013). Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany. *European Journal of Agronomy*, 49, 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.012>.
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Regierungspräsidium Stuttgart, Regierungspräsidium Karlsruhe, Regierungspräsidium Freiburg & Regierungspräsidium Tübingen (Hrsg.). (2020). *Integrierter Pflanzenschutz 2021 – Erwerbsobstbau*. https://www.obst-und-garten.de/artikel.dll/Integrierter-Pflanzenschutz-Erwerbsobstbau-2021_Njc3MzY0NA.PDF?UID=B5A775794395EC42D851BF45AE347AFCA38A0A25009A07.
- LAWA. (2017). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2017*. Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/top_29_wasserwirtschaft_bericht_1532603521.pdf.
- Lemme, H., Lobinger, G., & Müller-Kroehling, S. (2019). Schwammspinner-Massenvermehrung in Franken: Prognose, Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Naturschutzaspekte. In LWF (Hrsg.), *LWF aktuell 2 | 2019: Beobachten, analysieren, handeln – Modernes Wildtiermanagement* (S. 37-43). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/waldschutz/dateien/a121_schwammspinner.pdf.
- LfL. (o.J.). *Ausführungsverordnung DüV – Rote Gebiete, Gelbe Gebiete*. <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/207027/index.php>.
- LfL. (2005). *Hecken, Feldgehölze und Feldraine in der landwirtschaftlichen Flur* (11. Auflage; LfL-Information, S. 8). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. http://www.lpv-fo.de/media/archive1/Lfl_Bayern_Hecken_Feldgehölze_Feldraine.pdf.
- LfL. (2011). *Integrierter Pflanzenbau – Zwischenfruchtanbau* (LfL-Information). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/p_28819.pdf.
- LfL. (2018). *Gerstenkrankheiten* [Steckbrief]. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. <https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/merkblaetter/gerstenkrankheiten-2018-lfl-merkblatt.pdf>.

- LfL. (2019a). *Agroforstsysteme zur Energieholzerzeugung im ökologischen Landbau* (LfL-Schriftenreihe, S. 173) [Endbericht]. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/agroforstsysteme-energieholzerzeugung-oekolandbau_lfl-schriftenreihe.pdf.
- LfL. (2019b). *Langzeitversuch zur Minderung der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau*. LfL Pflanzenschutz. <https://www.lfl.bayern.de/ips/unkraut/160284/index.php>.
- LfL. (2020). *Agrarmeteorologie Bayern*. https://www.wetter-by.de/Internet/global/inetcntr.nsf/dlr_web_full.xsp?src=980E9BL691&p1=6BH7UJ4826&p3=S313638Z32&p4=YNDMXE6MAN.
- LfU. (2007). *Klimaanpassung – Bayern 2020. Der Klimawandel und seine Auswirkungen – Kenntnisstand und Forschungsbedarf als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen. Kurzfassung einer Studie der Universität Bayreuth* [Studie]. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU. (2011). *17 Aischgrund* (Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität, S. 5) [Kulturlandschaftliche Gliederung]. Bayerisches Landesamt für Umwelt. <https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/17.pdf>.
- LfU. (2018). *Wasserverluste in der öffentlichen Wasserversorgung* (Merkblatt 1.8/2; S. 8). Bayerisches Landesamt für Umwelt. https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil1_grundwasserwirtschaft/doc/nr_182.pdf.
- LfU. (2020a). *GKD Bayern*. <https://www.gkd.bayern.de/>.
- LfU. (2020b). *Klima: Faktenblätter Region Forchheim-Fürth-Erlangen-Höchstadt-Nürnberg*.
- LfU. (2020c). *Niedrigwasser 2018 und 2019. Analysen und Auswirkungen für Bayern* (Umwelt Spezial) [Analysebericht]. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU & BLfD. (2004). *Die historische Kulturlandschaft in der Region Oberfranken-West*. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz & Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. https://www.lfu.bayern.de/natur/historische_kulturlandschaft/pilotprojekt_oberfranken_west/doc/erlaeuterungsbericht_kulturlandschaft.pdf.
- LfULG. (2009). *Klimawandel und Landwirtschaft: Fachliche Grundlage für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel* (S. 151). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).

- Lobinger, G. (2002a). Stürme und Borkenkäfer – Eine gefährliche Kombination. In LWF, *LWF aktuell 33: Borkenkäfer Spezial* (S. 43). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a33_borkenkaefer_spezial.pdf.
- Lobinger, G. (2002b). Wissenswertes über Borkenkäfer. In LWF, *LWF aktuell 33: Borkenkäfer Spezial* (S. 43). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a33_borkenkaefer_spezial.pdf.
- Lobinger, G., & Wallerer, G. (2020). Eichenprozessionsspinner: Zwischen Pflanzenschutz und Gesundheitsvorsorge. In LWF, *LWF aktuell 124: Im Wald erlebt – Vom Wald bewegt*. (S. 68). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a33_borkenkaefer_spezial.pdf.
- Lorenz, R., Stalhandske, Z., & Fischer, E. M. (2019). Detection of a Climate Change Signal in Extreme Heat, Heat Stress, and Cold in Europe From Observations. *Geophysical Research Letters*, *46*(14), 8363-8374. <https://doi.org/10.1029/2019GL082062>.
- LPV Forchheim. (2011). *Endemische Mehlbeeren* [Informationsbroschüre]. Landschaftspflegeverband Forchheim. http://www.lpv-fo.de/endemische_mehlbeeren.
- Lutze, M. (2014). Nach der Kalamität ist vor der Kalamität – Konzepte zur langfristigen Rundholzlagerung sind wichtige Bausteine einer erfolgreichen Katastrophenvorsorge. In LWF, *LWF aktuell 99: Bestände verjüngen – Natürlich!* (S. 56). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a99_gesamt_bf_geschuetzt.pdf.
- LWF. (2012). *Merkblatt 22 – Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz* (S. 4) [Merkblatt]. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-22-bodenschutz.pdf>.
- LWF. (2015). *Merkblatt 31: Spätfrostschäden – Erkennen und vermeiden* (S. 4) [Merkblatt]. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb31_spaetfrost_schaeden.pdf.
- LWF. (2016). *Merkblatt 29 – Jungbestandspflege* (S. 4) [Merkblatt]. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb29-jungbestandspflege-bf.pdf>.
- LWF. (2017). *Merkblatt 38: Feinerschließung – Rückegassen und Rückewege* (S. 6) [Merkblatt]. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/m_b_38_feinerschliessung_bf.pdf.

- LWF. (2019). *Praxishilfe Klima-Boden-Baumartenwahl* (S. 109) [Sachbericht]. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/praxishilfe_baumarten_bf.pdf.
- LWG. (2016). *Veredelungsunterlagen von Obstgehölzen für den Hausgarten*. https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/gartenakademie/dateien/3101_-_veredelungsunterlagen_von_obstgehoeelzen.pdf.
- Ma, Q., Huang, J.-G., Hänninen, H., & Berninger, F. (2019). Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. *Global Change Biology*, *25*(1), 351-360. <https://doi.org/10.1111/gcb.14479>.
- Maier, S. (2020). *Climate Change in the District of Forchheim*. Landkreis Forchheim.
- Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Rakovec, O., Wanders, N., Zink, M., Wood, E. F., Pan, M., Sheffield, J., & Samaniego, L. (2018). Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(2), 1017-1032. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1017-2018>.
- Menzel, A., Yuan, Y., Matiu, M., Sparks, T., Scheifinger, H., Gehrig, R., & Estrella, N. (2020). Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*, *26*(4), 2599-2612. <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>.
- Mohr, S., Kunz, M., & Keuler, K. (2015). Development and application of a logistic model to estimate the past and future hail potential in Germany. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(9), 3939-3956. <https://doi.org/10.1002/2014JD022959>.
- Mücke, H.-G., Klasen, J., Schmoll, O., & Szewzyk, R. (2009). *Gesundheitliche Anpassung an den Klimawandel* (S. 24) [Ratgeber]. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3753.pdf>.
- Müller, M. (2018). *Projekt A/12/22 „Untersuchungen zur Schadensminderung bei Spätfrösten in fränkischen Weinbergen“* [Abschlussbericht]. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/weinbau/dateien/abschlussbericht_sp%C3%A4tfrostvermeidung_a-12-22__2018_ohne_karten.pdf.
- Noppel, H. (2017). *Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz –*

- Stadtklima in der kommunalen Praxis* (Abschlussbericht Nr. 249; Berichte des Deutschen Wetterdienstes, S. 105). Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/249_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- Onyekachi, O. G., Boniface, O. O., Gemlack, N. F., & Nicholas, N. (2019). The Effect of Climate Change on Abiotic Plant Stress: A Review. *Abiotic and Biotic Stress in Plants*.
- Parry, M., Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J., Van der Linden, P., & Hanson, C. (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Bd. 4). Cambridge University Press.
- Petercord, R., Sindy, L., Muck, M., Lemme, H., Lobinger, G., Immler, T., & Konnert, M. (2009). Klimaänderungen und Forstschädlinge: Waldschutz-Klimaprojekt rüstet die Waldwirtschaft für die anstehenden Aufgaben. In *LWF aktuell 72: Maikäfer, Raupe & Co. Keine Pause für den Waldschutz* (S. 63). <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/waldschutz-im-klimawandel-a72.pdf>.
- Pfleger, I. (2009). Bewässerungswasserqualität – Hygienische und chemische Belange. *Landbauforschung, Sonderheft (328)*, 49–57.
- Pfleiderer, P., Menke, I., & Schleussner, C.-F. (2019). Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. *Climatic Change*, *157*(3), 515-525. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02570-y>.
- Rädler, A. T., Groenemeijer, P., Faust, E., & Sausen, R. (2018). Detecting Severe Weather Trends Using an Additive Regressive Convective Hazard Model (AR-CHaMo). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *57*(3), 569-587. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0132.1>.
- Rohn, A., & Mälzer, H.-J. (2010). *Herausforderungen der Klimawandel-Auswirkungen für die Trinkwasserversorgung*. <https://edoc.sub.uni-hamburg.de//klimawandel/frontdoor/index/index/docId/751>.
- Ruppert, O., Rothkegel, W., & Holly, L. (2014). Zielgerichtet natürlich verjüngen: Der Ausgangsbestand und der Zielbestand bestimmen das Handeln. In LWF, *LWF aktuell 99: Bestände verjüngen – Natürlich!* (S. 56). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a99_gesamt_bf_geschuetzt.pdf.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E. F., & Marx, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, *8*(5), 421-426. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>.

- Schlumprecht, H., Bittner, T., Genesch, E., Gohlke, A., Jaeschke, A., & Nadler, S. (2010). Anpassung und mögliche Veränderungen. In Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), *Klimawandel und Natura 2000* (1500. Aufl., S. 79). http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm/en/top/dl/91638/BfNBroschuere_Auszug_Stand41010.pdf.
- Schmidlein, E.-M., & Wolf, L. (2019). *Buchführungsergebnisse des Wirtschaftsjahres 2017/2018* [LfL-Information]. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Schröder, H., Wurster, M., Asmus, R., Smarsly, L., Wattendorf, P., Konold, W., & Bihlmaier, J. (2016). *Waldränder: Typen, ökologisches Potenzial und Empfehlungen zu ihrer Begründung, Erhaltung, Aufwertung und Vernetzung* (Forschungsbericht Aktenzeichen der DBU: 30641; S. 90). <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30641.pdf>.
- Schumacher, A., & Schumacher, J. (2013). Tauglichkeit der Vogelschutz- und FFH-Richtlinie für Anpassungen an den Klimawandel. *Natur und Recht*, *35*(6), 377-387. <https://doi.org/10.1007/s10357-013-2457-7>.
- Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(33), 19656-19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>.
- Seager, R., Hooks, A., Williams, A. P., Cook, B., Nakamura, J., & Henderson, N. (2015). Climatology, Variability, and Trends in the U.S. Vapor Pressure Deficit, an Important Fire-Related Meteorological Quantity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *54*(6), 1121-1141. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0321.1>.
- Seibert, S. P., & Auerswald, K. (2020). *Hochwasserminderung im ländlichen Raum: Ein Handbuch zur quantitativen Planung*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>.
- Spektrum. (1999): Vernalisation. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/vernalisation/69378>.
- Spicker, A. (2016). *Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare L.*) und Winterraps (*Brassica napus L.*) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen* [Technische Universität München]. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20161121-1292540-1-2>.
- Staben, N., Feller, M., Grobe, S., Nolte, C., Neskovic, M., Hein, A., Merkel, W., & Roepke, R. (2014). Sichere Wasserversorgung im Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsansätze. In S. Kaden, O. Dietrich, & S. Theobald, *Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von*

- Anpassungsmaßnahmen* (S. 524). oekom. <https://www.oekom.de/buch/wassermanagement-im-klimawandel-9783865814807>.
- Stadt Nürnberg. (2012). *Handbuch Klimaanpassung – Bausteine für die Nürnberger Anpassungsstrategie* [Handbuch]. Umweltamt. https://www.nuernberg.de/imperia/md/klimaanpassung/dokumente/klimaanpassung_handbuch_low.pdf.
- Stadtwerke Forchheim. (2020). „*STRUKTURKONZEPT“ ZU KLIMATISCHEN VERÄNDERUNGEN UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF DIE TRINKWASSERVERSORGUNG IM LANDKREIS FORCHHEIM.*
- StMELF. (2014). *Bayerischer Obstbauleitfaden* (S. 6-35) [Leitfaden]. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. <https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/gartenbau/dateien/2014-g4-11.pdf>.
- StMUV. (2016). *Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS)*.
- Strohmeier, P., & Bruckner, G. (2013). *Sedimentmanagement in Gewässereinzugsgebieten – Beispiel Ökosystem Wiesent* (Bezirk Oberfranken, Hrsg.).
- Szalatnay, D., Wieland, S., & Schweizer, S. (2018). *Massnahmen gegen Frost* (S. 4).
- Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Marx, A., Pan, M., Rakovec, O., Samaniego, L., Sheffield, J., Wood, E. F., & Zink, M. (2018). Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. *Environmental Research Letters*, 13(1), 014003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e35>.
- Thober, S., Marx, A., & Boeing, F. (2020). *Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland*. 20.
- Thomas, C. (2019, Juni 26). *StadtKlimaWandel in Bayreuth*. Stadtratssitzung, Bayreuth. https://www.bayreuth.de/wp-content/uploads/2019/07/Vortrag_SR_2019-06-26_StadtklimaWandel_ProfThomas_gesch.pdf.
- TUM. (2020). *Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern – Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung* [Leitfaden]. Technische Universität München. https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Berichte/180207_Leitfaden_ONLINE.pdf.

- UBA. (2016). *Klimalotse 2.0 – Offlineversion*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse>.
- UBA. (2017). *Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven* (Nr. 03/2018; CLIMATE CHANGE). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-12_climate-change_03-2018_politikempfehlungen-anhang-3.pdf.
- UBA. (2019). *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel – Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2019>.
- UBA. (2020). *Unsere Bäche und Flüsse: Renaturieren – Entwickeln – Naturnah unterhalten* (S. 52) [Fachbericht]. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/unserefluesse_online_04e.pdf.
- UFZ. (2020, Januar 1). *Dürremonitor Deutschland*. <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>.
- Ulloa-Torrealba, Y., Stahlmann, R., Wegmann, M., & Koellner, T. (2020). Over 150 Years of Change: Object-Oriented Analysis of Historical Land Cover in the Main River Catchment, Bavaria/Germany. *Remote Sensing*, *12*(24). <https://doi.org/10.3390/rs12244048>.
- Unterberger, C., Brunner, L., Nabernegg, S., Steininger, K. W., Steiner, A. K., Stabentheiner, E., Monschein, S., & Truhetz, H. (2018). Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate. *PLOS ONE*, *13*(7), e0200201. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200201>.
- VLK. (2019). *Klimawandel und Landwirtschaft: Anpassungsstrategien im Ackerbau* (2019 Fachinformationen, S. 16). Verband der Landwirtschaftskammern. <http://www.landwirtschaftskammern.de/pdf/klimawandel.pdf>.
- Walentowski, H., Falk, W., Mette, T., Kunz, J., Bräuning, A., Meinardus, C., Zang, C., Sutcliffe, L. M. E., & Leuschner, C. (2017). Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: A case study in southern Germany. *Annals of Forest Research*, *60*(1), 101-126. <https://doi.org/10.15287/afr.2016.789>.

- Wang, X., Thompson, D. K., Marshall, G. A., Tymstra, C., Carr, R., & Flannigan, M. D. (2015). Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*, *130*(4), 573-586. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1375-5>.
- Wauer, A., Kubatta-Große, M., & Lutze, M. (2013). *LWF Wissen 71: Verfahren der Rundholzlagerung*. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/w71_rundholzlagerung_gesamtheft_bf.pdf.
- Weber, R. W. S. (2014). *Anpassung des Obstbaus der Niederelbe an den Klimawandel* (Teil 2; Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung – Forschungsergebnisse zur Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel). <https://www.ndr.de/ratgeber/klimawandel/obstanbau104.pdf>.
- Weigel, H.-J. (2011). Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. *Landbauforsch SH*, *354*, 9-28.
- Werth, J., Kitemann, D., Beck, M., Reinhard, F., Wilhelm, U., Gleichauf, K., Buchleither, S., Zoth, M., Scheer, C., Kuster, T., Bravin, E., Altherr, K., Raabe, C., Röser, K., & Höfert, U. (2020). *Leitfaden zur Beikrautregulierung im Apfelanbau* (S. 120). Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. https://www.hswt.de/fileadmin/download/Forschung/Forschungsprojekte/1077_Beikrautregulierung/Leifaden_Beikraut_final_interaktiv_V3-komp.pdf.
- Wiebusch, J.-H. (2019). Sonnenbrand an Äpfeln. *Mitt. OVR*, *74*, 165-169.
- Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Franko, M., & Kögel-Knabner, I. (2020). CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes Series 2020/1*, 1-19. <https://doi.org/10.20387/BONARES-F8T8-XZ4H>.
- Woolway, R. I., Jennings, E., Shatwell, T., Golub, M., Pierson, D. C., & Maberly, S. C. (2021). Lake heatwaves under climate change. *Nature*, *589*(7842), 402-407. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03119-1>.
- Wuest, M., Bresch, D., & Corti, T. (2011). The hidden risk of climate change: An increase in property damage from soil subsidence in Europe. *Swiss Re*, *7*(11).
- Zahnt, N., Eder, M., & Habersack, H. (2018). Herausforderungen durch pluviale Überflutungen – Grundlagen, Schäden und Lösungsansätze. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, *70*(1), 64-77. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0451-7>.

- Zimmermann, L., Raspe, S., Dietrich, H.-P., & Wauer, A. (2020). *Dürreperioden und ihre Wirkung auf Wälder – LWF aktuell 126* (Nr. 126; LWF aktuell 126). <http://www.lwf.bayern.de/boden-klima/wasserhaushalt/252285/index.php>.
- Zimmermann, L., Raspe, S., Schulz, C., & Grimmeisen, W. (2008). Wasserverbrauch von Wäldern: Bäume und Bestände verdunsten unterschiedlich stark. In LWF, *Wald und Wasser* (S. 63). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a66_wasser_web.pdf.
- Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., & Marx, A. (2016). The German drought monitor. *Environmental Research Letters*, *11*(7), 074002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074002>.
- Zohner, C. M., Mo, L., Renner, S. S., Svenning, J.-C., Vitasse, Y., Benito, B. M., Ordonez, A., Baumgarten, F., Bastin, J.-F., Sebold, V., Reich, P. B., Liang, J., Nabuurs, G.-J., Miguel, S., Alberti, G., Antón-Fernández, C., Balazy, R., Brändli, U.-B., Chen, H. Y. H., ... Crowther, T. W. (2020). Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(22), 12192–12200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920816117>.

8 Anhang

8.1 Datengrundlage der Analyse zu Klimaänderungen im Landkreis Forchheim

Tabelle 2: Untersuchte Parameter, Art der Daten, Datentyp und Datenquelle der Analyse zu Klimaänderungen im Landkreis Forchheim (Maier, 2020).

Parameter	Art	Datentyp	Datenquelle
Lufttemperatur	Beobachtungen	Punktdaten	(DWD, 2020b; LfL, 2020)
	Projektion	Rasterdaten	(LfU, 2020b)
Niederschlag	Beobachtungen	Punktdaten	(DWD, 2020b)
	Projektion	Rasterdaten	(LfU, 2020b)
Starkniederschlag	Beobachtungen	Rasterdaten	(DWD, 2020a)
Erosivität	Beobachtungen	Rasterdaten	(Fischer et al., 2018)
	Projektion		(Auerswald et al., 2020)
Sonnenscheindauer	Beobachtungen	Punktdaten	(DWD, 2020b; LfL, 2020)
Frostereignisse	Beobachtungen	Punktdaten	(DWD, 2020b; LfL, 2020)
Phänologie	Beobachtungen	Punktdaten	(DWD, 2020b)
Windgeschwindigkeit	Beobachtungen	Punktdaten	(DWD, 2020b)
Abfluss	Beobachtungen	Punktdaten	(LfU, 2020a)
Wasserstand Fließgewässer	Beobachtungen	Punktdaten	(LfU, 2020a)
Grundwasserstand	Beobachtungen	Punktdaten	(LfU, 2020a)
Akkumulierte aktuelle Evapotranspiration	Beobachtungen	Rasterdaten	(DWD, 2020b)
Bodenfeuchteindex ("Dürremonitor")	Beobachtungen	Rasterdaten	(UFZ, 2020; Zink et al., 2016)
Pflanzenverfügbares Wasser	Beobachtungen	Rasterdaten	(UFZ, 2020)

8.2 Ergänzungen zu Klimaanpassungsmaßnahmen

Tabelle 3: Bauplanerische Instrumente (Auszug) zur Klimaanpassung in Siedlungs- und Kommunalfächern (TUM, 2020)

Ziel	Verweis	Inhalt	
GRÜNFLÄCHEN SCHAFFEN UND ERHALTEN	Allgemeine Vorschriften BauGB	§ 1 (5) BauGB	Aufgabe der Bauleitplanung ist es, den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern
		§ 1 (6) Nr. 7 BauGB	Bei der Aufstellung der Bauleitpläne sind die Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Luft, Klima und das Wirkungsgefüge zwischen ihnen zu berücksichtigen
		§ 1a (5) BauGB	Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden
		§ 1a (3) BauGB § 135a BauGB	Ausgleichsflächen oder Ersatzmaßnahmen auf Grundlage vom Bundesnaturschutzgesetz § 19 (2) BNatSchG
		§ 2 (4) BauGB	Forderung nach Umweltprüfung
	Vorbereitende BLP:	§ 5 (2) Nr. 2b BauGB	Ausstattung mit Anlagen, die dem Klimawandel entgegenwirken, insbesondere Flächen für die Erzeugung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien
		§ 5 (2) Nr. 2c BauGB	Ausstattung mit Anlagen, Einrichtungen oder sonstigen Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen
	Darstellungen im Flächennutzungsplan	§ 5 (2) Nr. 5 BauGB	Grünflächen wie Parkanlagen, Dauerkleingärten, Sport-, Spiel-, Zelt- und Badeplätze, Friedhöfe
		§ 5 (2) Nr. 7 BauGB	Wasserflächen, für die Wasserwirtschaft vorgesehenen Flächen sowie die Flächen, die im Interesse des Hochwasserschutzes und der Regelung des Wasserabflusses frei zu halten sind
		§ 5 (2) Nr. 9 BauGB	Flächen für Landwirtschaft und Wald
		§ 5 (2) Nr. 10 BauGB	Flächen für Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Boden, Natur und Landschaft
	Verbindliche BLP: Festsetzungen im Bebauungsplan oder im Vorhabens- und Erschließungsplan	§ 9 (1) Nr. 10 BauGB	Freihaltung von Flächen (Versiegelungsgrad) und Nutzung der freizuhaltenen Flächen, um z. B. Biotope zu erhalten und zu vernetzen
		§ 9 (1) Nr. 14 BauGB	Flächen für die Rückhaltung und Versickerung von Niederschlagswasser
		§ 9 (1) Nr. 15 BauGB	Grünflächen wie Parks, Dauerkleingärten, Sport-, Spiel-, Zelt- und Badeplätze
		§ 9 (1) Nr. 18 BauGB	Flächen für Landwirtschaft und Wald
		§ 9 (1) Nr. 20 BauGB	Flächen oder Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Boden, Natur und Landschaft
		§ 9 (1) Nr. 25a BauGB § 9 (1) Nr. 25b BauGB	Anpflanzen von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen Bindungen für Bepflanzungen und für die Erhaltung von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen sowie von Gewässern
	Landschaftsplan und Grünordnung	§ 9 (3) Nr. 4e BNatSchG § 4 (2) BayNatSchG	Konkretisierung der Ziele zum Schutz, zur Qualitätsverbesserung und zur Regeneration von Böden, Gewässern, Luft und Klima In Bayern sind Landschaftspläne Pflicht. Sie sind die wichtigste Basis für die Erfordernisse des Naturschutzes und der Landschaftspflege
	Bundesnaturschutz	§ 1 (3) Nr. 4 BNatSchG	Luft und Klima sind zu schützen; dies gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen
	Städtebauliche Verträge	§ 11 BauGB	z.B. Verträge mit Investoren oder Eigentümern über Grün- und Freiflächen im Quartier zur Verbesserung des Mikroklimas und der Freiraumqualität
Rahmenplanung und Städtebauliche Entwürfe	§ 1 (6) Nr. 11 BauGB § 140 BauGB als Rahmenplanung	Städtebauliche Entwicklungskonzepte oder eine sonstige beschlossene städtebauliche Planung (Klimaschutzkonzepte etc.) sind bei der Bauleitplanung zu berücksichtigen. Dazu zählen z. B. auch Konzepte für Klimaschutz und -anpassung. Leitbilder untermauern die strategische Ausrichtung und können einen Beitrag zur referatsübergreifenden Zusammenarbeit leisten	
Besonderes Städtebaurecht, Städtebauförderung und Verfügungsfonds	§ 136 BauGB § 171a, 171b BauGB Städtebauförderung § 171e BauGB (Soziale Stadt)	Stadtsanierung/Stadtumbau/Stadtentwicklung: wenn „städtebauliche Missstände“ vorliegen. Planungen, die dem städtischen Wärmeineffekt entgegenwirken, können als städtebaulicher Grund anerkannt werden. Auch solche Gebiete, in denen gegebenenfalls keine städtebaulichen aber energetischen Missstände vorliegen, können im Rahmen von Stadtumbauaßnahmen nach § 171a-d BauGB oder Gebäudemodernisierungen aufgewertet werden. Verfügungsfonds zielen darauf ab, private Finanzressourcen für die Entwicklung von Fördergebieten zu aktivieren	
Städtebauliche Gebote	§ 178 BauGB	z. B. Pflanzgebot für private Grundstückseigentümer per Bescheid	
Satzungsrecht	Art. 28 (2) GG	Gestaltungssatzung zur Begrünung und gärtnerische Gestaltung baulicher Anlagen Freiflächengestaltungssatzung (z.B. Lage, Beschaffenheit und Größe von Kinderspielplätzen) Baumschutzsatzung § 12 (2), § 37 (2) Nr. 3, § 45 (1) Nr. 4 BayNatSchG	
Vorkaufsrecht	§ 24 BauGB § 25 BauGB	Zugriff auf Flächen sichern, vor allem um im Bestand Einfluss auf klimagerechte Stadtentwicklung nehmen zu können	
Wettbewerbe	Anreize	Sensibilisierung, Motivation, Qualitätssicherung innerhalb von Quartieren und interkommunal	
Förderprogramme	Anreize	z.B. Fassadengestaltung, Hofbegrünungen, Dachgärten	
Gesplittete Niederschlagsgebühren	Anreize	Abkopplung des Regenwassers von der Niederschlagsgebühr. Entlastet private Haushalte und schafft Anreize für private Begrünungsmaßnahmen	

8.3 Zusammenfassende Darstellung der Klimaanpassungsmaßnahmen

8.3.1 Wasserwirtschaft und Trinkwasserversorgung

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten ³⁰
Hochwasserminderung						
HWM01	Vermeidung (und ggf. Rückbau) von Flächenversiegelung, Verrohrungen u. Gräben, Hangeinschnitten und Verlust landschaftlicher Vielfalt	hoch	mittel bis hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
HWM02	Bodenbedeckung von mindestens 30 %, z.B. durch Mulchdirektsaat, Strip Tillage, Zwischenfrüchte oder Untersaat	mittel bis hoch	hoch	gering (flächenhafte Anwendung) bis praktikabel (Schlagebene)	kurzfristig	gering
HWM03	begrünte Abflussmulden statt Gräben und Verrohrungen	mittel	mittel	gering (flächenhafte Anwendung) bis praktikabel (Schlagebene)	kurz- bis mittelfristig	mittel
HWM04	multifunktionale Rückhaltebecken	hoch (bei ausreichender Anzahl)	mittel bis hoch	gering (flächenhafte Anwendung) bis praktikabel (Schlagebene)	kurz- bis mittelfristig	gering (im Zuge von Wegebau) bis mittel

³⁰ Da die Kosten zusätzlich zum eigentlichen Betrieb anfallen, kann unter Kosten genauso Zusatzkosten verstanden werden, die nun klimawandelbedingt anfallen.

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten ³⁰
HWM05	hochwassermindernde Flurgliederung, z.B. durch längliche, hangparallele Flurstückformen und Schlaggrößen von max. 5 ha	mittel bis hoch	mittel	Einzelfallprüfung (Schlagunterteilung z.B. praktikabel)	mittelfristig	gering bis hoch
HWM06	Streifenbearbeitung, Terrassierung und Bearbeitung quer zum Hang	mittel	mittel	praktikabel (bei entsprechendem Flächenzuschnitt)	kurz- bis mittelfristig	gering (Streifenbearbeitung) bis hoch (Terrassierung)
HWM07	Anlegen breiter, flacher, langer u. hydraulisch rauher Gräben, idealerweise quer zum Hauptgefälle	mittel bis hoch	mittel	gering (flächenhafte Anwendung) bis praktikabel (Schlagebene)	kurz- bis mittelfristig	mittel
HWM08	Grünland in Form von schmalen Streifen entlang der Hangmulden in ackerbaudominierten Gebieten bzw. Grünland entlang von Gewässern	mittel	mittel	gering (flächenhafte Anwendung) bis praktikabel (Schlagebene)	kurzfristig	mittel
HWM09	hHeterogene Landnutzung durch weite Fruchtfolge und Nutzungswechsel	hoch	mittel	gering (flächenhafte Anwendung) bis praktikabel (Schlagebene)	mittelfristig	-

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Trink- und Grundwasser						
TV01	Maßnahmen zur Förderung und dem Erhalt der Grundwasserneubildung (→ siehe dazu Maßnahmen zur Hochwasserminderung im ländl. Raum)	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
TV02	Schaffung von Trinkwasserverbänden	sehr hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	hoch
TV03	Vermeidung von Wasserverlusten im Leitungssystem	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	hoch
TV04	ökologisches Grundwassermanagement und Aufstellung eines Grundwasserbewirtschaftungsplans mit Festlegung wasserrechtlich zulässiger Fördermengen	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
TV05	Optimierung bestehender Wasserversorgungsanlagen, z.B. mittels tieferer Brunnen und leistungsfähigerer Pumpenanlagen	hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	hoch

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
TV06 (→ TV05)	Schaffung größerer Speicherkapazitäten in Wassernetzen und -werken	hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	hoch
TV07 (→ TV05)	Sicherstellung weiterer Entnahmeoptionen	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	hoch
TV08	weitere Verfahrensstufen der Wasseraufbereitung (z.B. Aktivkohlefilter, Desinfektion mit UV-Licht, etc.)	hoch	mittel	praktikabel	mittel- bis langfristig	hoch
TV09	Gewährleistung eines regelmäßigen Durchflusses mit spülender Wirkung im Trinkwasserverteilnetz	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
TV10	Fortführung und ggf. Intensivierung des mikro-biologisch-hygienischen Monitorings des Trinkwassers	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
TV11	Planung und Management des Trinkwasserverteilnetzes, z.B. das Rohrmaterial, die Rohrleitungstiefe und der Durchfluss	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
TV12 (→ TV08)	vorsorgende Maßnahmen im Ressourcenschutz (Nitrat-, PBSM-Problematik)	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	hoch
TV13	Nutzung von gesammeltem bzw. gespeichertem Regenwasser in Privathaushalten, Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und der Industrie	hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	hoch
TV14	Nutzungseinschränkungen	hoch	niedrig bis mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
Gewässerqualität und -struktur						
GQ01	erhöhte Anforderungen an die Abwasserbehandlung und -einleitung, z.B. Belüftung des Abwassers	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	hoch
GQ02	Überprüfung der Grenzwerte von Wasserentnahmen und Wassereinleitungen in Gewässern hinsichtlich der Menge und Temperatur	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
GQ03 (→ GQ02)	Festlegung von Mindestwasserabflüssen b. Kraftwerksausleitungen	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
GQ04 (→ TW01)	Wasserrückhalt in der Landschaft zur Sicherung des grundwasserbürtigen Basisabflusses	niedrig (lange Trockenperiode) bis mittel (kurze Trockenperiode)	mittel	gering (da flächenhafte Anwendung notwendig)	mittelfristig	-
GQ05	Gewässerrandstreifen mit autotypischen Gehölzsäumen am Gewässerrand	hoch (bei kleinen Gewässern)	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
GQ06 (→ GQ05)	Gewässerrandstreifen entlang des sekundären Gewässernetzes und Wiederbegrünung von Hangmulden, in denen sich der Abfluss konzentriert	hoch	mittel	gering (da flächenhafte Anwendung notwendig)	mittelfristig	mittel
GQ07	reichhaltige morphologische Gewässerstruktur und -dynamik, inkl. einer natürlichen Überflutungsdynamik	hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
GQ08	Niedrigwassergerinne	mittel	hoch	praktikabel	mittelfristig	mittel
Wasserkraft						
WK01	Festlegung von Mindestwasserabflüssen	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
WK02 (→ WK01)	Effizienzsteigerung der Anlagen durch den Einsatz von Turbinen mit gestaffeltem Ausbaugrad und verbessertem Wirkungsgrad	mittel	hoch	praktikabel	mittelfristig	mittel bis hoch
WK03 (→ WK01)	Optimierung bestehender Wasserkraftanlagen auf Grundlage regionalisierter Mittel- und Niedrigwasserkennwerte	mittel	hoch	praktikabel	mittelfristig	gering bis mittel

8.3.2 Obstbau

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Allgemein						
OB01	breitere Risikostreuung (Diversifizierung) hinsichtlich Kulturarten, Sorten, Sortentypen, Standorten und Nutzungssystemen, um das totale bzw. teilweise Verlustrisiko zu vermindern	hoch	mittel	gering bis mittel	kurz- bis mittelfristig	mittel
OB02	angepasste Standort-, Kulturarten- und Sortenwahl (inkl. Sortenerhalt)	mittel bis hoch	mittel	gering bis mittel	mittelfristig	gering bis mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Trockenheit, Hitze und Strahlung						
OB03	Bewässerung kann in Form von flexibler oder stationärer Tropfbewässerung effizient Wasserdefizite bei Trockenstress ausgleichen. Dabei sollte nach Möglichkeit Grundwasser durch Niederschlagswasser substituiert werden.	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	sehr hoch
OB04	organische Düngung (z.B. Kompost oder Gründüngung)	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
OB05	Bodenbedeckung (z.B. Strohmulch)	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering bis mittel
OB06	tiefwurzelnde Zwischenfrüchte	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
OB07	flache Bodenbearbeitung	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel bis hoch
OB08	Begrünungsmanagement, das insb. während der Vegetationsperiode die Begrünung um die Obstkulturen kurzhält und den Beikrautbewuchs reguliert	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
OB09	konsequente Fruchtausdünnung	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	mittel
OB10	Reduktion der Blatt- fläche auf der sonnen- abgewandten Seite	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	mittel
OB11	nur die sonnenabge- wandte Seite entblät- tern, sodass auf der sonnenzugewandten Seite die Früchte ggf. durch Decklaub ge- schützt werden	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
OB12	angepasster Zeitpunkt für Ausdünnungs- oder Sommerschnittmaß- nahmen	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
OB13	gute Durchlüftung der Obstanlage	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
OB14	klimatisierende Bereg- nung	hoch	hoch	praktikabel	mittelfrist- ig	sehr hoch
OB15	Kaolin-Spritzung oder Fruchtkalk-Ausbringung	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	niedrig
OB16 (→ OB02)	Wasserhaltevermögen des Standorts	hoch	hoch	gering bis praktikabel	kurzfristig	gering
OB17 (→ OB02)	Bewässerungsmöglich- keiten am Standort	hoch	hoch	gering bis praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
OB18	Ausgleich von Standortnachteilen durch geeignete Unterlagen	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel
OB19 (→ OB02)	dem Standort angepasste, hitze- und trockenheitsresistente Obstkulturen und -sorten	hoch	mittel	gering bis praktikabel	mittelfristig	mittel
Spätfrost						
OB20	Standortwahl	Vermeidung von Tal- und Muldenlagen	hoch	gering bis praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
OB21	Verwirbelung von Luftmassen mit Windmaschinen oder Hub-schrauberflügen	gering (Advektionsfrost) bis hoch (Strahlungsfrost)	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel bis hoch
OB22	Frostschutzberegnung	hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	sehr hoch
OB23	Aufstellen und Entzünden von Kerzen oder das Verbrennen von Gas	gering (Advektionsfrost) bis hoch (bei Temperaturen um 0 °C)	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	hoch
OB24	Verzögerung des Austriebs der Knospen mit Pflanzenölen	hoch	-	nicht praktikabel (noch nicht zugelassenes Verfahren)	mittel- bis langfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
OB25	Obstart- und Sortenwahl unter Berücksichtigung von Spätfrosttoleranz und Blühbeginn	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
OB26	hohe Blütenzahl	gering bis mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
OB27	unbearbeiteter, unbewachsener Boden bzw. ein Boden mit relativ kurzer Vegetation	gering bis mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
OB28	Reduktion der Windgeschwindigkeit	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
OB29	Einfluss d. Unterlage und des Erziehungssystems auf die Frostempfindlichkeit: geringere Empfindlichkeit von Halb- und Hochstamm	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
OB30	Weißeln von Obstbäumen	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
OB31	Frostversicherung	niedrig (rein finanzielle Absicherung)	mittel	praktikabel	mittelfristig	hoch

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Sturm						
OB32	Wahl der Unterlage: Relativ hohe Standfestigkeit bei Mittel- und Hochstamm	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	gering
OB33	Stützpfähle	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
OB34	Windschutzstreifen und -hecken	mittel	mittel	praktikabel	mittelfris- tig	mittel bis hoch
Schädlinge						
OB35	frühzeitiges Erkennen eines neuen Schad- erregers und seine Be- kämpfung unter Berücksichtigung des integrierten Pflanzenschutzes	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
OB36	präventive Maßnahmen	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering bis hoch
OB37	Verwendung von Nütz- lingen	mittel	mittel	praktikabel	mittelfris- tig	mittel

8.3.3 Forstwirtschaft

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Hitze und Trockenheit						
FW01	Waldumbau von reinen Nadelwäldern in Mischwälder: Erhaltung o. Einbringen von mind. vier Baumarten in angemessenen Anteilen (mind. 5 %) je Waldbestand, wovon mindestens drei Baumarten klimatolerant sein müssen	sehr hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfristig (Dauer allerdings sehr lange)	mittel bis hoch
FW02	Naturverjüngung: Einbringung der Mischbaumarten ggf. durch Voranbau bzw. Belassen von Mischbaumarten als Samenbäume im Bestand	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering (Mischbaumarten bereits vorhanden) bis hoch (Voranbau)
FW03	Schutz der Naturverjüngung vor Schalenwildverbiss durch ein konsequentes Jagdmanagement	sehr hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
FW04	Rechtzeitige und selektive Durchforstung	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
FW05	Vermeidung einer Überbestockung	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
FW06	Vermeiden von Kahl- schlägen und Ge- schlossenhaltung der Bestände soweit möglich	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
FW07	Etablieren einer Vo- rausverjüngung bereits vor einer möglichen Be- standsauflösung	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	gering bis hoch
FW08	gestufte, dichte Wald- ränder mit hitze- und trockentoleranten Baum- u. Straucharten	mittel	gering bis mittel	gering (Eta- blierung be- nötigt lange Dauer)	kurz- bis mittelfris- tig (Etablie- rung benö- tigt lange Dauer)	mittel
Sturmschäden						
FW09	Waldumbau von Rein- beständen in weniger anfällige Mischwälder mit sturmstabilen Pfahl- und Herzwurzlern wie Eiche und Buche	sehr hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig (Dauer allerdings sehr lange)	mittel bis hoch
FW10	Verkürzung der Ziel- durchmesser windwurf- gefährdeter Baumarten	hoch	hoch	praktikabel	mittelfris- tig	gering
Schädlinge						
FW11	Diversifizierung: Um- wandlung von Rein- beständen in Misch- waldbestände	hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig (Dauer sehr lange)	mittel bis hoch

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
FW12	Anpassung und Intensivierung von Risikomanagementmaßnahmen sowie Entwicklung von Strategien und Behandlungskonzepten für neu auftretende Schädlinge	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
FW13	Buchdrucker: Frühzeitiges Erkennen von Infektionsherden und Entnehmen bzw. Entrinden befallener Bäume	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
FW14	Eichenprozessions- spinner: Förderung spezialisierter, natürlicher Gegenspieler durch resiliente Mischwälder	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	hoch
FW15	Einholen von Fachpersonal	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
FW16	Holzlagerkonzepte als Teil rechtzeitiger Katastrophenvorsorge	hoch	gering	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	hoch

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Spätfrost						
FW17	Anbau und Förderung frosttoleranter Baumarten in typischen Frostlagen, insb. Geländesenken	hoch	hoch	praktikabel	mittelfristig	gering bis mittel
FW18	Schutz frostempfindlicher Verjüngungspflanzen unter dem Schirm von Altbäumen bzw. Pionierbaumarten	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
Bodenschutz						
FW19	Maschineneinsatz bei möglichst geringem Bodenwassergehalt; Vermeiden von Maschineneinsatz während zu feuchter Bedingungen	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
FW20	Herabsetzung des Kontaktflächendrucks der Maschinen, z.B. durch eine Erhöhung der Radzahl, durch das Absenken des Reifeninnendrucks und durch erhöhte Reifenbreite	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	gering bis hoch
FW21	angepasstes Feinerschließungssystem	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering

8.3.4 Landwirtschaft

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Erosions-, Boden- & Gewässerschutz						
LW01	Bodenbedeckung von mindestens 30 %	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
LW02	konservierende Bodenbearbeitung, wobei v.a. d. Mulchdirektsaat ein sehr wirkungsvolles Instrument ist, aber auch z.B. die Streifenbearbeitung („Strip Tillage“)	sehr hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	anfangs hoch, nach Etablierung Kosteneinsparung
LW03	Minimierung der Zeitspannen ohne Bodenbedeckung, u.a. durch Fruchtfolgegestaltung, Fruchtartenauswahl, Zwischenfruchtanbau, Untersaaten oder Strohmulch	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
LW04	Fruchtfolgegestaltung: Mehrjährige Futterpflanzen bzw. Zwischenfrüchte (hoher) Leguminosenanteil	hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	gering
LW05	Vermeidung bzw. Beseitigung infiltrationshemmender Bodenverdichtungen und Vermeidung hangabwärts gerichteter Fahrspuren	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
LW06	wassererosionsmin- dernde Flurgestaltung, insb. die Anlage längl. Schläge quer zum Ge- fälle, abflussbremsen- der Grasstreifen, be- grünter Hangmulden (grassed water-ways) o. Anlage von Ero- sionsschutzstreifen (Hecken oder Agro- forstsysteme)	mittel bis hoch	mittel	Einzelfallprü- ung (Schlag- unterteilung z.B. prakti- kabel)	mittel- bis langfristig	gering (Schlag- unterteil- ung) bis hoch (z.B. Anpflan- zung)
LW07 (→ LW04)	Humusaufbau bzw. Erhalt des Humus- gehaltes (ausgeglichen es Verhältnis v. Humus- zehrern und Humus- mehrern innerhalb einer Fruchtfolge im Ackerbau)	mittel (lehmige Böden) bis hoch (sandige Böden)	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
LW08	Maschineneinsatz bei möglichst geringem Bodenwassergehalt; Vermeiden von Maschi- neneinsatz während zu feuchter Bedingungen	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
LW09	Herabsetzung des Kontaktflächendrucks der Maschinen, z.B. durch eine Erhöhung der Radzahl, durch das Absenken des Reifeninnendrucks und durch eine erhöhte Reifenbreite	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering (Absenken des Reifeninnendrucks) bis hoch (Erhöhung Radzahl)
Beeinträchtigung der Gewässerqualität						
LW10	Vermeidung und Verminderung von Bodenabtrag	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	niedrig bis mittel
LW11	Rückhaltebecken zur Abpufferung von Schadstoffkonzentrationspitzen	mittel	mittel bis hoch	praktikabel	mittelfristig	mittel
LW12	effektiver Dünger- und PBSM-Einsatz, z.B. durch Precision-Farming Technologie	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel bis hoch
LW13	Wiederherstellung bzw. Erhalt von Grünland in feuchten Tallagen	hoch	niedrig	gering	kurzfristig	gering bis mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
LW14	Pflanzenbedarfsorientierte zusätzliche Wasserversorgung zur Stabilisierung der Ertragsbildung; nach Möglichkeit sollte Grundwasser durch Niederschlagswasser substituiert werden	hoch	hoch	praktikabel	mittelfristig	sehr hoch
LW15	Steigerung der Bewässerungseffizienz durch auf Bodenfeuchte basierende Bewässerungsverfahren	hoch	hoch	praktikabel	mittelfristig	sehr hoch
LW16	Priorisierung der Bewässerung: 1) Gemüsebau, 2) Obstbau, 3) Kartoffeln, 4) Sonderkulturen, 5) Ackerfrüchte in Fruchtfolgen d.oben genannten Kulturarten	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
Förderung hitze- und trockenheitstoleranter Arten, Sorten und Anbausysteme im Pflanzenbau						
LW17	Diversifizierung zur Risikostreuung (z.B. Anbau verschiedener Sortentypen mit unterschiedlichem Abreifeverhalten)	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
LW18	standortangepasste, wärme- bzw. hitze- und trockenheitstolerante Arten mit hoher Wassernutzungseffizienz	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	mittelfristig	mittel
LW19	Sortentypen mit ausgedehntem Wurzelsystem	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
LW20	angepasster Saatzeitpunkt und angepasste Reife zur Vermeidung v. Witterungsextremen	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
LW21	Zweinutzungssysteme	gering bis mittel	gering bis mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
LW22	Reduktion der Aussaatstärke	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
Förderung hitze- und trockenheitstoleranter Arten, Sorten und Anbausysteme im Grünlandanbau						
LW23	standortangepasste, wärme- bzw. hitze- und trockenheitstolerante Arten und Sorten	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig (standortangepasst) bis mittelfristig (trocken-tolerant)	gering
LW24	Narbenerhaltung und -verbesserung durch gezielte Nachsaaten mit standortangepassten Arten und Sorten	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
LW25	Nutzungstiefe von 6 bis 8 cm um eine ausreichende Restblattfläche zu erhalten	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
LW26	zunehmende Bedeutung von Leguminosen in gräserreichen Beständen	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	gering
LW27	regelmäßige Ermittlung der Bodennährstoffversorgung u. darauf basierende Nährstoffzufuhr	mittel	mittel	praktikabel	mittelfristig	mittel
Windschutz						
LW28	Windschutzstreifen, z.B. Hecken oder Agroforstsysteme (Durchlässigkeit des Windschutzstreifens: 30 bis 60 %)	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig (Dauer allerdings bei Hecken sehr lange)	hoch
Pflanzenschutz						
LW29	Einsatz von Pflanzenschutzmitteln unter Berücksichtigung des integrierten Pflanzenschutzes	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
LW30	vorbeugende Maßnahmen, z.B. eine weite Fruchtfolge	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	niedrig

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
LW31	Precision Farming	hoch	mittel	praktikabel	mittelfris- tig	mittel bis hoch
LW32	laufendes Monitoring zur Befallserfassung von Krankheiten	mittel	mittel	begrenzt durch personelle Kapazität	kurzfristig	mittel
Tierhaltung						
LW33	Futtermittelstrategie basierend auf Vorrats- wirtschaft und Schutz von Futtermitteln	mittel	mittel	praktikabel	langfristig	hoch
LW34	Tierhaltungsstrategie: bauliche Anpassungs- maßnahmen im Inter- esse des Tierschutzes	hoch	mittel	praktikabel	mittelfris- tig	hoch
Teichwirtschaft						
TW01	Offenhalten der Teiche in Hauptwindrichtung zur Anreicherung mit Sauerstoff	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	niedrig
TW02	Beschattung durch nord-exponierte Vegetation	mittel (bei kl. Teichen)	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
TW03	angemessener Fischbesatz	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
TW04	Belüftungsmanage- ment	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
TW05	Desinfektionsmaß- nahmen	hoch	mittel	praktikabel	mittelfris- tig	mittel

8.3.5 Stadt- und Kommunalplanung

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Hitze						
SP01	Vermeiden weiterer Versiegelung von Freiflächen	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
SP02	Reduktion der Überhitzung von Gebäuden durch einen reduzierten Eintrag von Solarstrahlung in das Innere des Gebäudes (v.a. durch einen außenliegenden Sonnenschutz), Lüftungssysteme und ausreichende Isolation	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel bis hoch
SP03	Schaffung von Freiflächen durch Begrünung und Entsiegelung "trotz" Nachverdichtung	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
SP04	Ersetzen klimasensitiver Baumarten durch klimaresistente Arten	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
SP05	Schaffung und Erhalt kühler Rückzugs- und Erholungsorte im Stadt- und Siedlungsgebiet durch Begrünung (Bäume, Dach- u.Fassadenbegrünung, Parks u. Grünflächen) und Wasserflächen	hoch	mittel	praktikabel	kurz- (Erhalt) bis mittelfris- tig (Schaf- fung)	gering (Erhalt) bis hoch (Schaf- fung)
SP06	Freihaltung und Berücksichtigung i.d. Planung von Kaltluftentstehungsgebieten und Kaltluftzufuhrschneisen	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
SP07	Beschattete Rastplätze und Verwendung des Gestaltungselementes Wasser (z.B.Wasserbrunnen) bei Planvorhaben	mittel	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	mittel
SP08	Errichtung eines Netzes aus öffentlichen Trinkwasserspendern an zentralen Orten/Plätzen	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	mittel
SP09	Bau oder Sanierung von Freibädern o.ä.Erfri- schungsmöglichkeiten	hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfris- tig	mittel bis hoch

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Starkniederschläge						
SP10	Vermeidung/Untersagung der Bebauung hochwassersensibler Flächen	sehr hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
SP11	Objektschutz, z.B. durch Lichtschachterhöhung, etc	mittel	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel bis Hoch
SP12	Barrieren zwischen Siedlungen u. Außengebieten	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel bis hoch
SP13	Herstellung u. Sicherung von Notwasserwegen inkl. Entlastungsgräben/Retentionsbecken	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel bis hoch
SP14	regelmäßige Wartung und Inspektion d. Entwässerungssysteme	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering bis mittel
SP15	Durchführung von Gefährdungsabschätzungen u. Erstellung von Starkregenisikokarten	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
SP16	Multifunktionale Retentionsbecken inner- und außerhalb von Städten und Siedlungen (z.B. Spiel- oder Parkplätze)	hoch (bei ausreichender Anzahl u. Kapazität)	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel bis hoch

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
SP17	Bau von Zisternen	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel
SP18	begrünte Dächer	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel
SP19	Schaffung von Versickerungsflächen	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	mittel

8.3.6 Menschliche Gesundheit

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Allgemein						
MG01	Befähigung zur Selbsthilfe und Sensibilisierung der Bevölkerung	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
Hitze						
MG02	Beachtung des Warnsystems des DWD	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
MG03	Information und Aufklärung der Bevölkerung und des medizinischen Fach- und Pflegepersonals über die gesundheitlichen Folgen von Hitze und mögl. Präventionsmaßnahmen	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
MG04	Beschränkung der Aktivitäten im Freien auf die Morgen- und Abendstunden	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
MG05	Vermeiden von körperlichen Anstrengungen, auch Sport	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
MG06	Aufenthalt bzw. Pausen an möglichst kühlen Orten	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering bis mittel
MG07	ausreichende Flüssigkeitszufuhr (Erinnerung/Kontrolle durch Trink-Apps möglich)	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
MG08	Meiden von Alkohol und sehr kalten Getränken	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
UV-Strahlung						
MG09	Beachtung des Warnsystems des DWD	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
MG10	Aufenthalt bzw. Pausen in/an möglichst kühlen Räumen/ Orten	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering bis mittel
MG11	Tragen von Sonnenhut und Sonnenbrille	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
MG12	Tragen von Sonnenschutz in Form von Kleidung oder Auftragen von Mitteln mit Lichtschutzfaktor 15 oder höher	hoch	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
Vektorvermittelte Infektionskrankheiten und Ausbreitung von Allergenen						
MG13	Aufklärungs- und Vorsorgemaßnahmen	mittel	mittel	praktikabel	mittel- bis langfristig	gering

8.3.7 Katastrophenschutz

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Allgemein						
K01	Auseinandersetzung mit dem Themenfeld „Klimawandel“ in d. Organisationen vor Ort	mittel bis hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering
K02	Bereitstellung eines zugeschnittenen Informationsangebots für den Bevölkerungsschutz	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
K03	Anpassung der Einsatzplanung und -vorbereitung, Ausbildungen und Schulungen sowie der Ausstattung; gezielt für bestimmte Extremwetterereignisse auf Basis einer planmäßigen Risikoanalyse	mittel	hoch	praktikabel	mittelfristig	gering bis hoch (Ausstattung)
K04	Weiterführung und ggf. Harmonisierung des Monitorings	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering
Eigene Betroffenheit						
K05	Bereitstellung von Informationen über die Gefahren einer Hitzewelle und hitzeangepasstes Verhalten	mittel	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering
K06	Schaffung der Rahmenbedingungen für die Umsetzung einer hitzeangepassten Arbeitsweise etwa durch häufigere Pausen bis zur Planung für möglichen Personalausfall	hoch	mittel	praktikabel	mittelfristig	gering

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
K07	Erleichterung der Arbeit unter Hitze, etwa durch Kühlung d. Räume bzw. Klimatisierung der Einsatzfahrzeuge, die Bereitstellung von ausreichend Mineralwasser, reduzierte Einsatzdauer, Sonnen- und Insektenschutz und angepasste Einsatzkleidung	hoch	hoch	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering bis mittel
K08	Überprüfung, inwiefern eigene Liegenschaften v. d Auswirkungen extremer Wetterereignisse betroffen sein können; ggf. Ergreifen von Maßnahmen	mittel	hoch	praktikabel	kurz- (Überprüfung) bis langfristig (Maßnahmen)	gering (Überprüfung) bis hoch (Maßnahmen)
K09	systematische Bestandsaufnahme der eigenen Infrastrukturabhängigkeit u. ggf. Ergreifen von Maßnahmen	mittel	mittel	praktikabel	kurz- (Bestandsaufnahme) bis mittelfristig (Maßnahmen)	niedrig bis hoch (Maßnahmen)
K10	Stärkung d Selbsthilfekapazität der Bevölkerung	mittel	mittel	praktikabel	kurzfristig	gering

8.3.8 Naturschutz und Landschaftsplanung

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
Naturschutz und Landschaftspflege						
NL01	Einsatz ökosystembasierter Ansätze im Sinne des Naturschutzes als wichtiger Beitrag zur Klimaanpassung (u. zum Klimaschutz), z.B. Erhalt und ggf. Ausweitung der Wasserwiesen als Retentionsflächen und Kohlenstoffspeicher im Landkreis	mittel bis hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering bis hoch
NL02	Erhalt der landschaftlichen und funktionellen Vielfalt ökologischer Systeme und ihrer Strukturvielfalt	mittel bis hoch	mittel	gering (da flächenhafte Anwendung notwendig)	kurzfristig	gering
NL03	Vergrößerung und Vernetzung v. Habitaten zur Schaffung von Wandermöglichkeiten; wichtig dafür: Rückbau bzw. die Umgestaltung von Ausbreitungsbarrieren, wie Fließgewässerverbauungen, Verkehrsflächen u. intensiv genutzten Flächen	mittel	mittel	gering (da flächenhafte Anwendung notwendig)	kurz- bis mittelfristig	mittel

Maßnahmen-ID	Beschreibung	Wirksamkeit	Akzeptanz	Praktikabilität	Umsetzung	Kosten
NL04	Erhalt und ggf. Wiederherstellung der Kultur- und Agrarlandschaft als Lebensraum	hoch	mittel	praktikabel	kurz- bis mittelfristig	gering (Erhalt) bis mittel (Wiederherstellung)
NL05	Erhaltung ausreichend großer Populationen heimischer Arten, inkl. deren Beobachtung	mittel	mittel	z.T. wenig praktikabel (klimasensitive Arten)	kurz- bis mittelfristig	mittel
NL06	Erhalt u. Förderung der Vielfalt von Habitaten, Lebensräumen sowie landschaftlicher Strukturen und damit einhergehend auch der landschaftlichen Vielfalt	hoch	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel
NL07	Förderung des Konzepts der differenzierten Landnutzung	mittel	hoch	praktikabel	kurzfristig	mittel