

Abb. 30: Sturmschadenrisiko für die Fichte in der Region Stuttgart nach Stadt- bzw. Landkreisen (Angaben in ha). Der Modellierung liegt ein „Standardbaum“ mit folgenden Merkmalen zugrunde: Höhe: 40 m, DBH (Durchmesser in Brusthöhe): 53 cm, H/D (Verhältnis Höhe/Durchmesser): 75 (Datengrundlage: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 2010).

### 2.2.2.3. Landwirtschaft

#### *Zielsetzung und Bewertungsmodell*

Gegenstand der Untersuchung ist eine vergleichende Bewertung der Empfindlichkeit ackerbaulich genutzter Flächen gegenüber den erwarteten Klimaänderungen in der Region Stuttgart. Als Bezugsgeometrie dienen Feldblöcke, worunter zusammenhängende landwirtschaftlich nutzbare Flächen verstanden werden, die von erkennbaren Außengrenzen wie Wegen, Fließgewässern und Flurstücken mit einer nicht ackerbaulichen Nutzung umgeben sind. Sie wurden aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) generiert. Es ergeben sich ca. 29.000 Flächen.

Um die Sensitivität der Ackerflächen einzuschätzen, werden die besonders wichtigen klimainduzierten Gefährdungsursachen betrachtet, wie sie für die Region Stuttgart im Rahmen der Expertenworkshops identifiziert wurden (siehe Abschnitt 2.2.13). Diese sind

- Bodenerosion durch Wasser (infolge häufigerer und intensiverer Starkniederschlagsereignisse sowie höherer Winterniederschläge bei gleichzeitig zunehmenden Lufttemperaturen im Winter),
- in Teilräumen der Region die Bodenerosion durch Wind (infolge von Bodenaustrocknung und häufigeren Sturm- bzw. Starkwindereignissen),
- mangelnde Wasserverfügbarkeit für die Kulturpflanzen bzw. eine erhöhte Trockenstressgefährdung des Standorts (bestimmt durch die zu erwartende deutliche Zunahme der Evapotranspiration sowie häufigere und längere Trockenperioden), und
- Hitzestress bei Pflanzen infolge häufigerer und länger andauernder Hitzeperioden, wodurch der Ertrag und die Qualität der Ernte erheblich beeinträchtigt werden können.

Das Risiko einer direkten Schädigung landwirtschaftlicher Kulturen durch Starkregen- und Hagelereignisse wird in das Verfahren nicht mit einbezogen, da aufgrund fehlender Datengrundlagen eine Operationalisierung dieses Aspektes nicht ohne weiteres möglich ist. Vor dem Hintergrund der berück-

sichtigen Gefährdungsursachen a bis d wurde ein indikatorgestütztes Bewertungsverfahren entwickelt, das in Abbildung 31 skizziert ist. Danach wird die „Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung“ eines Feldblocks durch die Hauptmerkmale „Erosionsgefährdung durch Wasser“, „Erosionsgefährdung durch Wind“ und die „Gefahr einer Schädigung der Kulturpflanzen“ bestimmt, die ihrerseits durch verschiedene Indikatoren bzw. Parameter beschrieben werden.

Es wird davon ausgegangen, dass Ackerstandorte, die schon heute eine vergleichsweise hohe Erosionsanfälligkeit durch Wind und/oder Wasser aufweisen, auf die erwarteten Veränderungen der meteorologischen Parameter besonders empfindlich reagieren und somit die Bodenfruchtbarkeit hier in besonderem Maße einer Gefährdung unterliegt. Feldblockbezogene Daten zur Erosionsgefährdung durch Wasser unter Berücksichtigung der aktuellen Nutzungsformen konnten dem Bodenzustandsbericht der Region Stuttgart entnommen werden (Analyse auf Grundlage der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung durch Waldmann 2007). Eine Einschätzung der Erosionsanfälligkeit durch Wind wurde auf Grundlage der digitalen Bodenkarte der Region Stuttgart 1: 50.000 und der Automatisierten Liegenschaftskarte nach dem Verfahren der AG Bodenkunde (1982) bzw. Schmidt in Marks et al. (1992) vorgenommen (siehe Tabelle A-10 in Anhang 4).

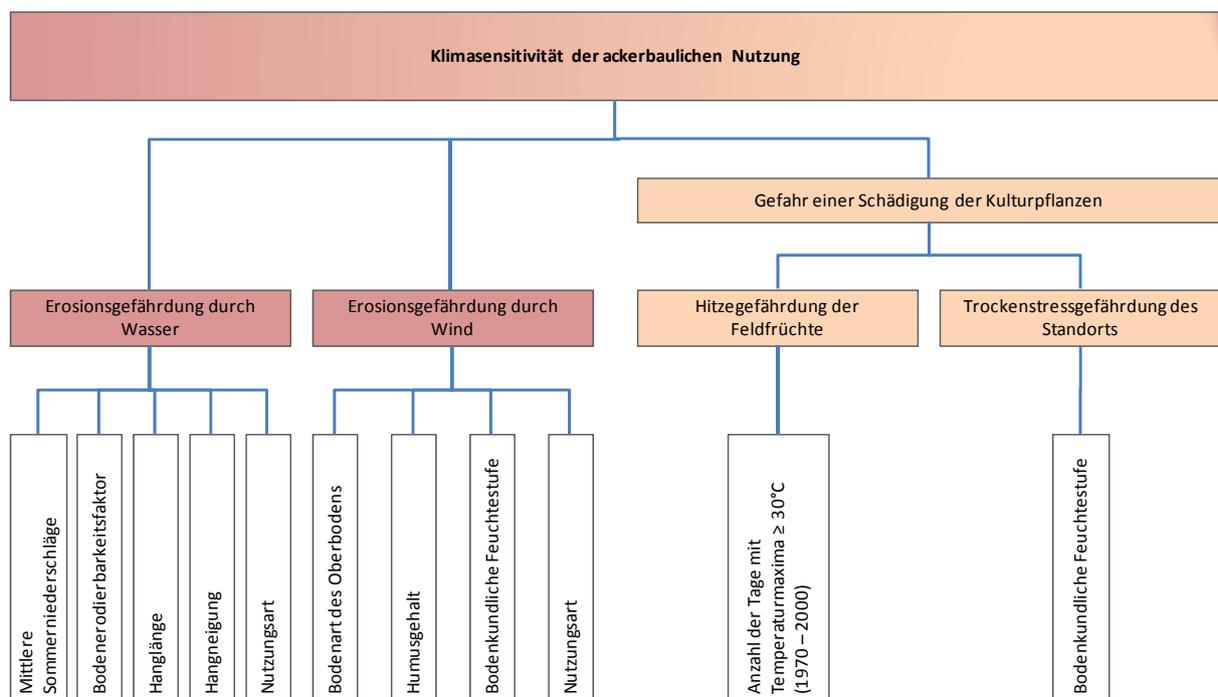


Abb. 31: Konzeptionelles Modell zur Einschätzung der Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung von Feldblöcken. In den weißen Kästen sind die verwendeten Indikatoren aufgeführt.

Die „Gefahr einer Schädigung der Kulturpflanzen“ wird im Bewertungsmodell anhand der Merkmale „Hitzegefährdung der Feldfrüchte“ und „Trockenstressgefährdung des Standorts“ bewertet. Als Indikator für die Einschätzung der Hitzegefährdung wurde ein Geodatensatz der LUBW herangezogen, welcher die mittlere Anzahl der heißen Tage bzw. Hitzetage für die Klimanormalperiode 1971 bis 2000 auf einem 1000m-Raster abbildet. Als Hitzetage bzw. heißen Tage werden Tage definiert, an denen das Tagesmaximum  $30^{\circ}\text{C}$  übersteigt. Dieser Schwellenwert ist für die vorliegenden Untersuchungen geeignet, da Lufttemperaturen von knapp über  $30^{\circ}\text{C}$  bei Pflanzen bereits zu erheblichem Hitzestress führen können (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Die Verwendung von Klimaprojektionen zur künftigen Zunahme der heißen Tage wäre wünschenswert gewesen, die Daten lagen jedoch zum Bearbeitungszeitpunkt nicht vor. Da jedoch zu erwarten ist, dass sich das Verteilungsmuster von Räumen mit einer relativ hohen bzw. niedrigen Anzahl heißer Tage in der Region auch zukünftig nicht wesentlich

verändern wird, sondern nur die absoluten Werte ansteigen, hat dies auf das Bewertungsergebnis keinen Einfluss<sup>5,6</sup>.

Die Trockenstressgefährdung eines Ackerstandortes, wird als weiteres Merkmal für die Bewertung der Gefahr einer Schädigung von Kulturpflanzen verwendet. Als Indikator wird hier auf die bodenkundliche Feuchtestufe zurückgegriffen, zu der mit der digitalen Bodenkarte der Region Stuttgart 1: 50.000 flächendeckende Angaben vorliegen. Es wird davon ausgegangen, dass schon heute relativ trockene Böden im Klimawandel eine hohe Disposition aufweisen. Eine Berücksichtigung der angebauten Kulturart erfolgte aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht, wäre aber vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.2.1.3 diskutierten Probleme ohnehin diffizil.

Die Ergebnisse der Einzelbewertungen wurden in drei Schritten durch logische Verknüpfungen aggregiert. Die Verknüpfungsregeln sind in Abbildung 32 aufgeführt. Die Bewertungsklassen werden in Tabelle 6 beschrieben. Die Skalierungen der Einzelkriterien sind im Anhang 4 aufgeführt.

---

<sup>5</sup> An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es im Rahmen von Vulnerabilitätsuntersuchungen bislang nicht möglich ist, die „absolute“ Vulnerabilität eines Objektes zu bestimmen. Vulnerabilitätsskalen sind in der Regel Relativskalen, und die Aussage, dass ein Objekt eine hohe Vulnerabilität aufweist, bedeutet in erster Linie, dass innerhalb des untersuchten Raums dieses Objekt im Vergleich zu anderen Objekten des Raums eine vergleichsweise hohe Verwundbarkeit zeigt. Anders ausgedrückt: Die Wahrscheinlichkeit, dass bei entsprechenden Klimaänderungen bei diesem Objekt deutliche Beeinträchtigungen auftreten, ist im Vergleich zu anderen Objekten höher.

<sup>6</sup> Die Erwartung, dass sich das räumliche Verteilungsmuster von Räumen mit relativ hoher bzw. niedriger Anzahl heißer Tage grundsätzlich nicht verändern wird, bestätigt ein kartographischer Vergleich der Hitzetage (1971 bis 2000) mit den vorliegenden REMO-Ergebnissen zum Anstieg der Wärmebelastung (gefühlte Temperatur > 32°C) in der Klimanormalperiode 2071 bis 2100.

Erosionsgefährdung des Ackerbodens (EA)							Gefahr einer Schädigung der Kulturpflanzen (SK)							
WEro	Def	sehr groß	groß	mittel	gering	sehr gering	ohne	Feu	Hitz	sehr hoch	hoch	mittel	gering	sehr gering
	äußerst hoch	-	5	5	-	5	5		sehr trocken	5	5	5	5	-
sehr hoch	5	5	4	-	4	4	trocken	5	5	5	5	5		
hoch	5	4	4	-	3	3	mäßig trocken und wechselfeucht	5	5	4	4	4		
mittel	5	4	3	-	2	2	frisch und mäßig frisch	5	4	3	2	2		
gering u. sehr gering	5	4	3	2	1	1	mäßig feucht und wechselfeucht	5	4	3	2	-		
							feucht	-	4	3	1	-		

Relative Sensitivität der ackerbaulichen Nutzung					
EA \ SK	5	4	3	2	1
5	5	5	5	5	5
4	5	5	4	4	4
3	5	4	3	3	2
2	5	4	3	2	1
1	-	-	-	1	1

Def	Erosionsgefährdung durch Wind (Deflation)
WEro	Erosionsgefährdung durch Wasser
EA	Erosionsgefährdung des Ackerbodens
Hitz	Mittlere Anzahl der Hitzetage 1971-2000 (als Indikator für die Hitzestressgefährdung der Feldfrüchte im Klimawandel)
Feu	Langjährige mittlere Bodenfeuchte (als Indikator für Trockenstreugefährdung des Standorts im Klimawandel)
SK	Gefahr einer Schädigung der Kulturpflanzen
-	nicht existierende Kombination

Abb. 32: Verknüpfungsregeln zur Aggregation der Einzelkriterien (Landwirtschaft). Die Bewertungsklassen werden in Tabelle 6 beschrieben.

Tab. 6: Bewertungsklassen (Erosionsgefährdung, Gefahr einer Schädigung der Kulturpflanzen, Sensitivität der ackerbaulichen Nutzung).

Stufe	Beschreibung
5	sehr hoch
4	hoch
3	mittel
2	gering
1	sehr gering

### Ergebnisse

In den Abbildungen 33 bis 48 werden die Befunde der quantitativen Vulnerabilitätsuntersuchung im Bereich Landwirtschaft anhand von Karten und Diagrammen aufbereitet.

Die kartographischen Darstellungen in den Abbildungen 33 bis 41 beschreiben die Ausprägungen der herangezogenen Einzelparameter des Vulnerabilitätsmodells, die mitunter durch Szenariobetrachtungen ergänzt werden. Im Hinblick auf die Erosionsgefährdung durch Wasser (Abbildung 33) werden unter den Bedingungen der heutigen Nutzung etwa 53 % der gesamten Ackerfläche in der Region Stuttgart als hoch- bis äußerst hoch erosionsgefährdet eingestuft. Nahezu 20 % der Fläche werden sogar eine sehr hohe bis äußerst hohe Gefährdung zugeschrieben. Aufschlussreich sind die in den Abbildungen 34 und 35 dargestellten Überlagerungen der Erosionsanfälligkeit mit Klimaprojektionen zur Veränderung der sommerlichen Starkniederschläge und der Summe der Winterniederschläge. Bereiche, in denen hohe Erosionsgefährdungen mit einer signifikanten Zunahme der Starkniederschläge und einem deutlichen Anstieg der Winterniederschläge zusammenfallen, könnten als besonders klimaverletzlich angesehen werden. Allerdings wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Modellierungen der zukünftigen Niederschlagsverteilung und insbesondere Projektionen zu Extremereignissen erheblichen Unsicherheiten unterliegen. Hinzu kommt ein Maßstabsproblem: Die Klimaprojektionen wurden von der Landesebene Baden-Württemberg auf die regionale Ebene „heruntergebrochen“, womit ihre Belastbarkeit im regionalen Maßstabbereich eingeschränkt ist. Aus diesen Gründen wurde darauf verzichtet, die Ergebnisse regionaler Klimamodellrechnungen direkt in das Vulnerabilitätsmodell zu integrieren.

Die Deflationsanfälligkeit der Ackerflächen illustriert Abbildung 36. Bereits in Abschnitt 2.2.1.3 wurde dargelegt, dass bedenkliche Dispositionen erfahrungsgemäß nur in einigen Bereichen der Region vorliegen. Mit einer mittleren bis sehr großen Anfälligkeit gegenüber Winderosion werden etwa 5 % der Ackerfläche bewertet, eine große bis sehr große Disposition weisen knapp 3 % der Fläche auf. Wie die kartographische Darstellung zeigt, liegt dabei der Schwerpunkt auf den sandigen Keuperböden im Nordosten der Region. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Abnahme der Bodenfeuchte im Zuge des Klimawandels die Deflationsanfälligkeit ackerbaulich genutzter Flächen zunimmt. Unter der vereinfachten Annahme, dass es zu einer Verminderung der heutigen Bodenfeuchte um eine Stufe kommt (Abbildung 37), wurden die Auswirkungen auf die Anfälligkeit gegenüber Winderosion neu bewertet. Die in Abbildung 38 präsentierten Ergebnisse zeigen, dass nur wenige zusätzliche Ackerflächen eine signifikante Anfälligkeit aufweisen würden. Allerdings erhöht sie sich auf schon heute gefährdeten Ackerflächen oft um eine weitere Stufe.

Die Anzahl der Hitzetage für die meteorologische Messreihe 1971-2000, die als Indikator für die Hitzegefährdung der Feldfrüchte herangezogen wird, zeigt Abbildung 39. Das räumliche Muster wird wesentlich durch die Höhenlage und die Reliefsituation geprägt. So zeigen beispielsweise die Schwäbische Alb und die Schwäbisch-Fränkischen Waldberge geringe Belastungen, wohingegen vor allem das nördliche Neckarbecken, das Neckartal und das Albvorland durch eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an Hitzetagen gekennzeichnet ist. Wie bereits diskutiert wurde, ist nicht zu erwarten, dass sich

das gegenwärtige räumliche Muster im Klimawandel verändern wird. Den Klimaszenarien zufolge wird sich aber die absolute Zahl der Hitzetage deutlich erhöhen.

Die langjährige mittlere Bodenfeuchte unter den gegenwärtigen klimatischen Verhältnissen stellt Abbildung 40 dar. Vor allem im Muschelkalk und Jura auf den schon heute relativ trockenen Rendzinen und Pararendzinen sowie im Keuper auf sandigen Braunerden, könnten Veränderungen des Bodenwasserhaushalts zu erheblichen Problemen in der Landwirtschaft führen. Wie bereits dargestellt wurde, haben mäßig trockene, trockene und sehr trockene Böden in der Region Stuttgart einen Anteil von nahezu 30 % an der gesamten ackerbaulich genutzten Bodenfläche. Abbildung 41 unterstreicht diese Problematik, indem Klimamodellrechnungen zur Veränderung der sommerlichen Niederschlagssummen zusammen mit Ackerflächen relativ geringer Bodenfeuchte visualisiert werden. Unter Berücksichtigung der schon erwähnten Vorbehalte gegenüber der Zusammenführung von Klimamodellrechnungen mit großmaßstäbigeren, nicht-klimatischen Daten, zeichnet sich ab, dass es vor allem in den östlich des Neckars gelegenen Teilen der Region zu einer Verschärfung der Wasserverfügbarkeit für Feldfrüchte kommen könnte.

Die zentrale Ergebniskarte der integrierten Sensitivitätsbewertung für die ackerbauliche Nutzung wird in Abbildung 42 vorgestellt, einen Überblick über die Verteilung der Flächengrößen pro Sensitivitätsstufe gibt Abbildung 43. Über 55 % der gesamten Ackerfläche in der Region Stuttgart wird eine relativ hohe bis sehr hohe Sensitivität gegenüber den betrachteten Gefährdungsursachen zugeschrieben, wobei sich eine mehr oder weniger geschlossene Zone hoher Empfindlichkeiten manifestiert, welche in der Hotspot-Analyse besonders deutlich erkennbar wird (Abbildung 44). Sie erstreckt sich über die mittleren bis nördlichen Bereiche des Neckarbeckens sowie über Strom- und Heuchelberg bis in den nordöstlichen Teil der Region in die Schwäbisch-Fränkischen Waldberge und die nördlichen Teile des Welzheimer Waldes. Von dort verläuft sie in südliche Richtung durch das Keuperstufenland des Neckarbeckens, den Schurwald, das Mittlere Albvorland und schneidet die östlichen Teile der Fildern. Nach Südosten erstreckt sich ein Ausläufer in die Filsalb und im Westen ein solcher in die Mittlere Voralb. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden die Ausprägungen der Einzelkriterien für die identifizierte Zone in Abbildung 45 separat dargestellt.

Die Abbildungen 46 und 47 geben die absolute und prozentuale Verteilung der Flächengrößen pro Sensitivitätsstufe nach Stadt- bzw. Landkreisen an. Hier wird ersichtlich, dass die ackerbauliche Produktion der Kreise in sehr unterschiedlichem Ausmaß von der erwarteten Klimaänderung betroffen sein könnte. So liegt etwa im Kreis Böblingen der Anteil hoch bzw. sehr hoch sensibler Ackerflächen bei circa 30 %, wohingegen er in den Kreisen Göppingen und Ludwigsburg ungefähr 65 % beträgt. Die Unterschiede stehen in Verbindung mit den naturräumlichen Gegebenheiten in einem Kreis beziehungsweise den Anteilen von Naturräumen, in denen die Ackernutzung unter den Bedingungen des Klimawandels tendenziell eine vergleichsweise hohe Verletzlichkeit aufweist (Abbildung 48).

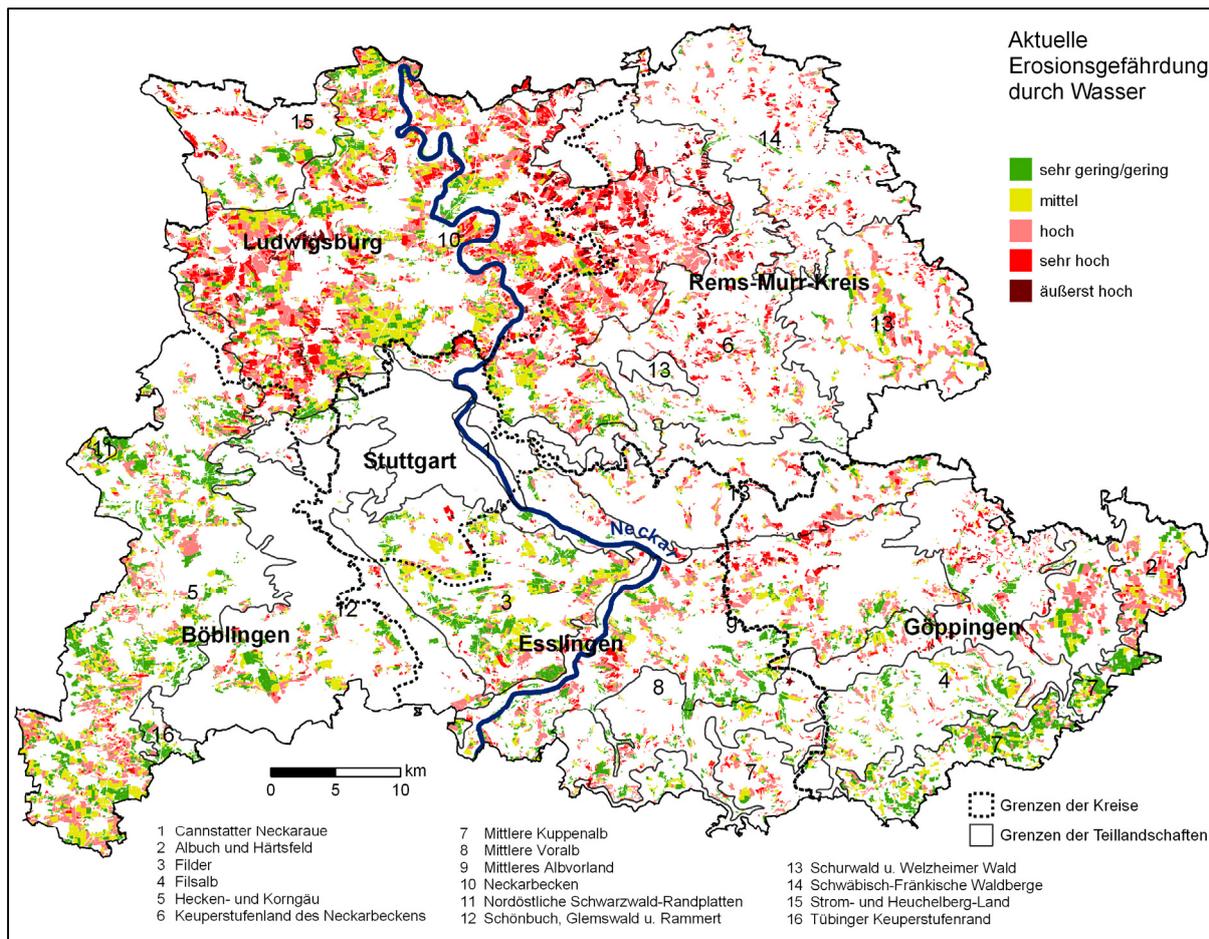


Abb. 33: Aktuelle Erosionsgefährdung durch Wasser auf Feldblockbasis (Datengrundlage: Waldmann 2007).

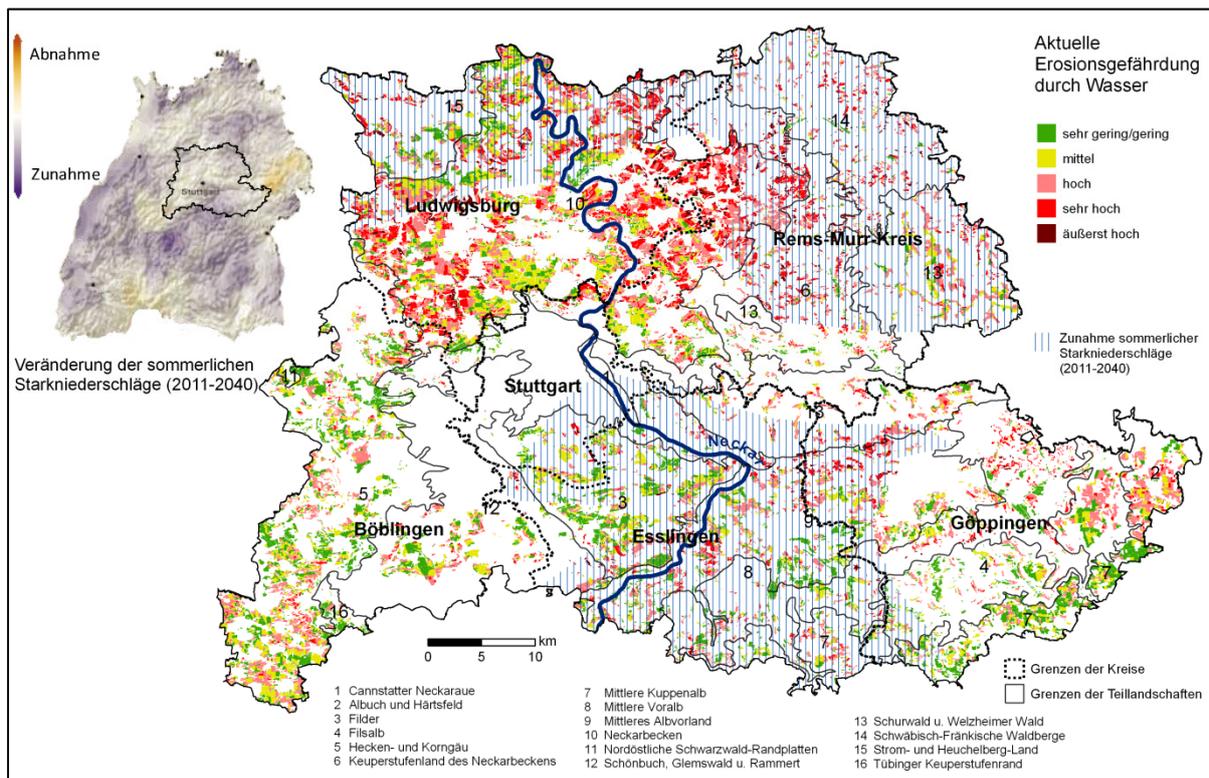


Abb. 34: Aktuelle Erosionsgefährdung durch Wasser und künftige Veränderung sommerlicher Starkniederschläge. Die Nebenkarte stellt für Baden-Württemberg dar, wo mit hoher Wahrscheinlichkeit sommerliche Starkniederschläge zu- oder abnehmen. Quelle: IMK-TRO/KIT 2010 (entnommen aus Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg & Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg 2010: 9). Die Hauptkarte beschreibt für die Region Stuttgart die Erosionsgefährdung durch Wasser auf Feldblockbasis und kennzeichnet außerdem Bereiche, in denen es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer starken Zunahme sommerlicher Starkniederschläge kommt (Datengrundlagen: Waldmann 2007, ebenda).

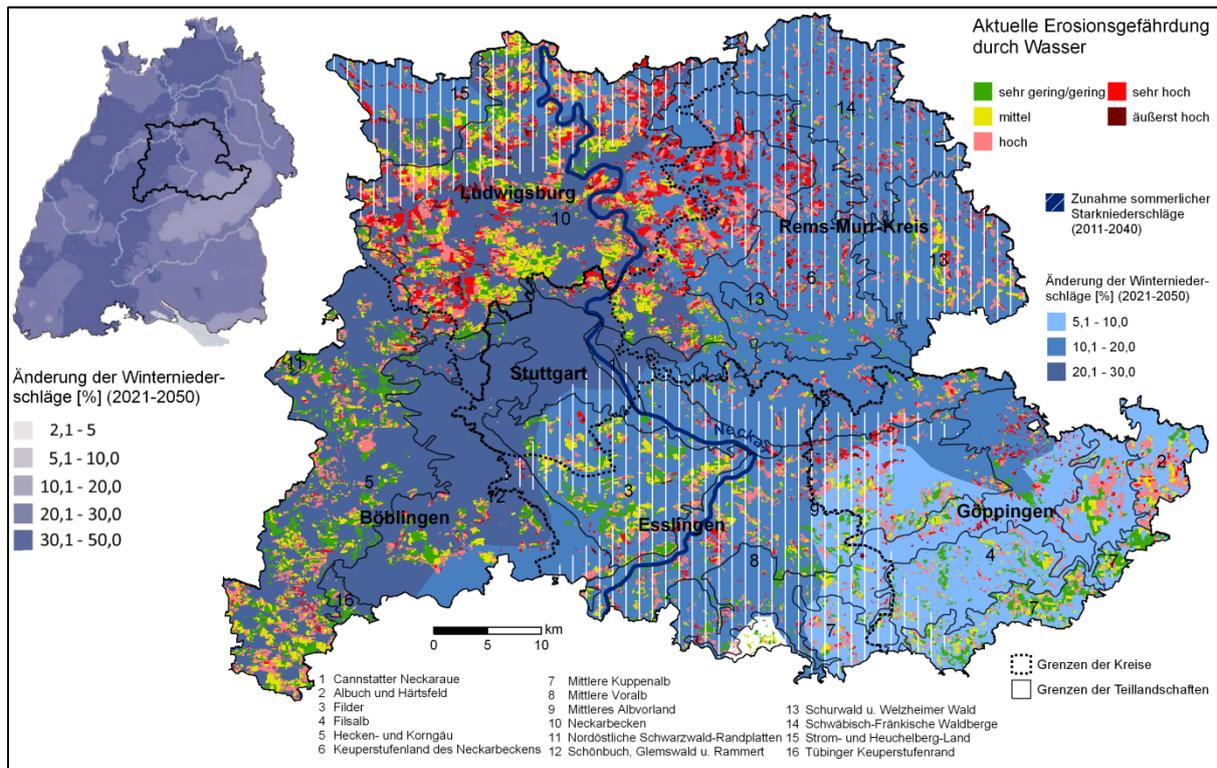


Abb. 35: Aktuelle Erosionsgefährdung durch Wasser und künftige Veränderung des Niederschlagsregimes. Die Nebenkarte stellt für Baden-Württemberg die prozentuale Änderung der Wintersumme (Nov.-Apr.) des Niederschlags dar. Es wurde der Zeitraum 2021 bis 2050 in Bezug auf 1971 bis 2000 simuliert. Quelle: LUBW 2007 (entnommen aus Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg & Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg 2010: 19). Die Hauptkarte beschreibt für die Region Stuttgart die Erosionsgefährdung durch Wasser auf Feldblockbasis und stellt gleichzeitig die Veränderung der Winterniederschläge und der sommerlichen Starkniederschläge dar. (Datengrundlagen: Waldmann 2007, ebenda).

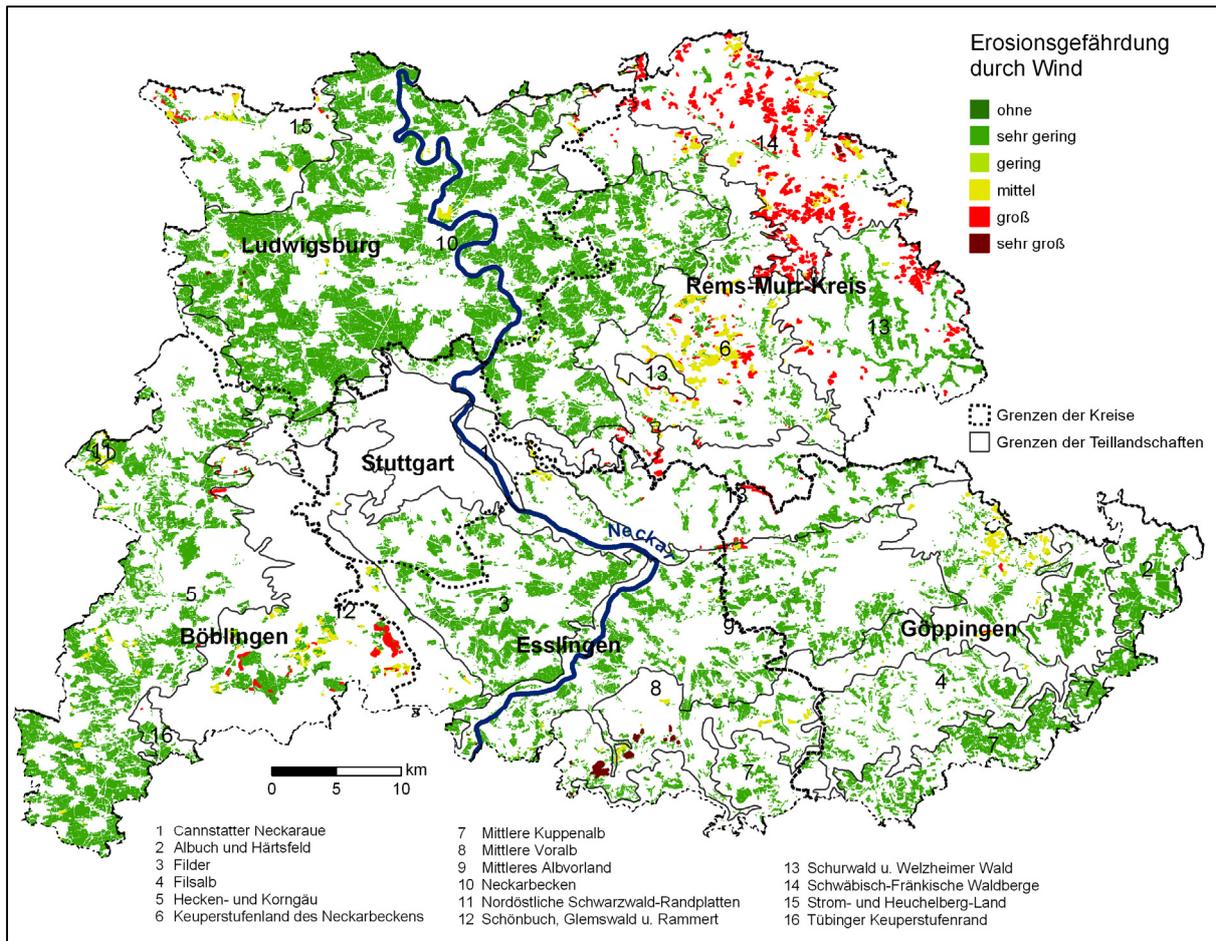


Abb. 36: Erosionsgefährdung durch Wind auf Feldblockbasis (eigene Analyse auf Grundlage von BK 50 und ALK).

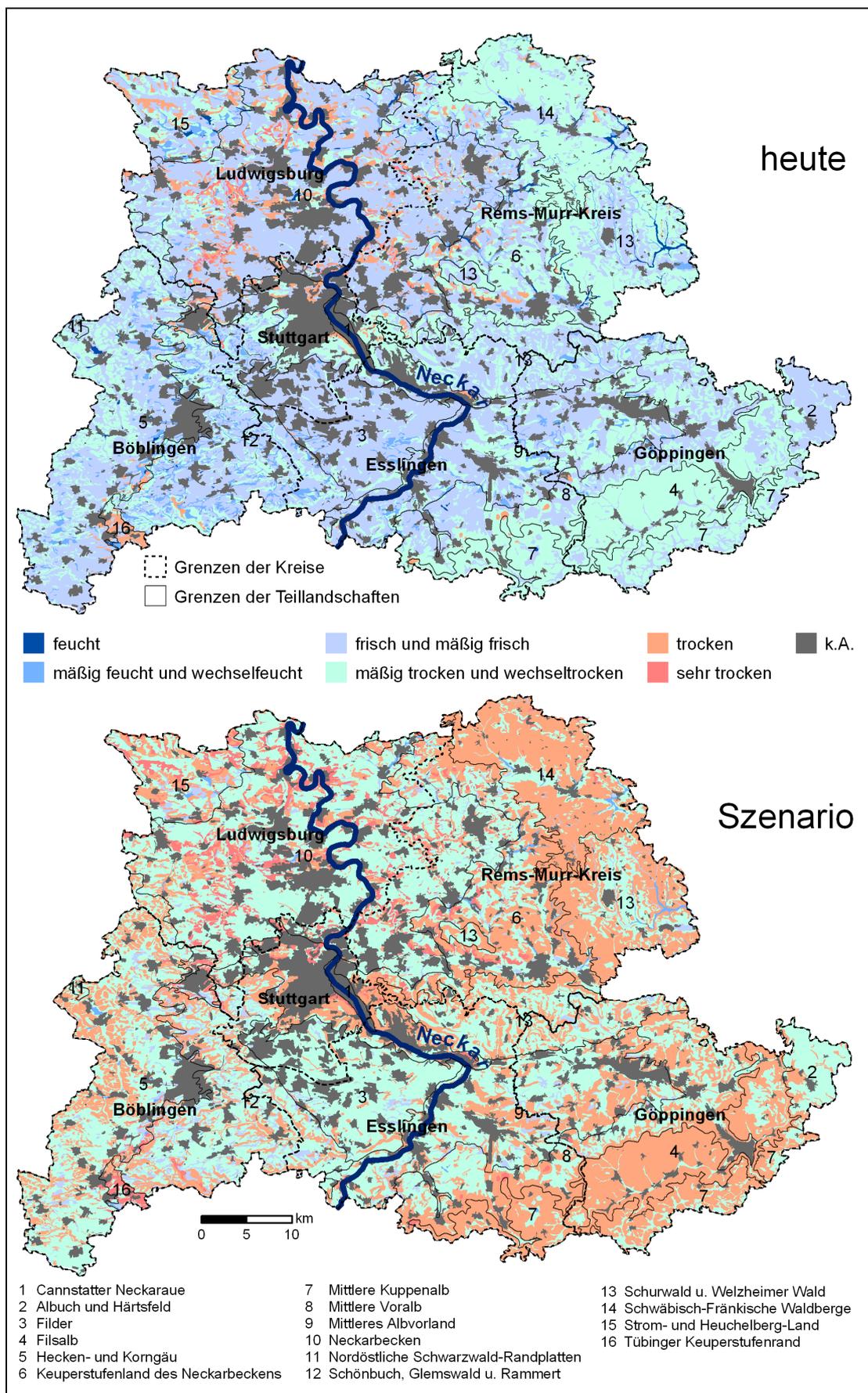


Abb. 37: Langjährige mittlere Bodenfeuchte heute und in einem Zukunftsszenario. Letzterem liegt die Annahme zugrunde, dass es im Klimawandel zu einer Abnahme der mittleren Bodenfeuchte kommt. Für das Szenario wurde eine pauschale Minderung der heutigen Bodenfeuchte um eine Stufe definiert.

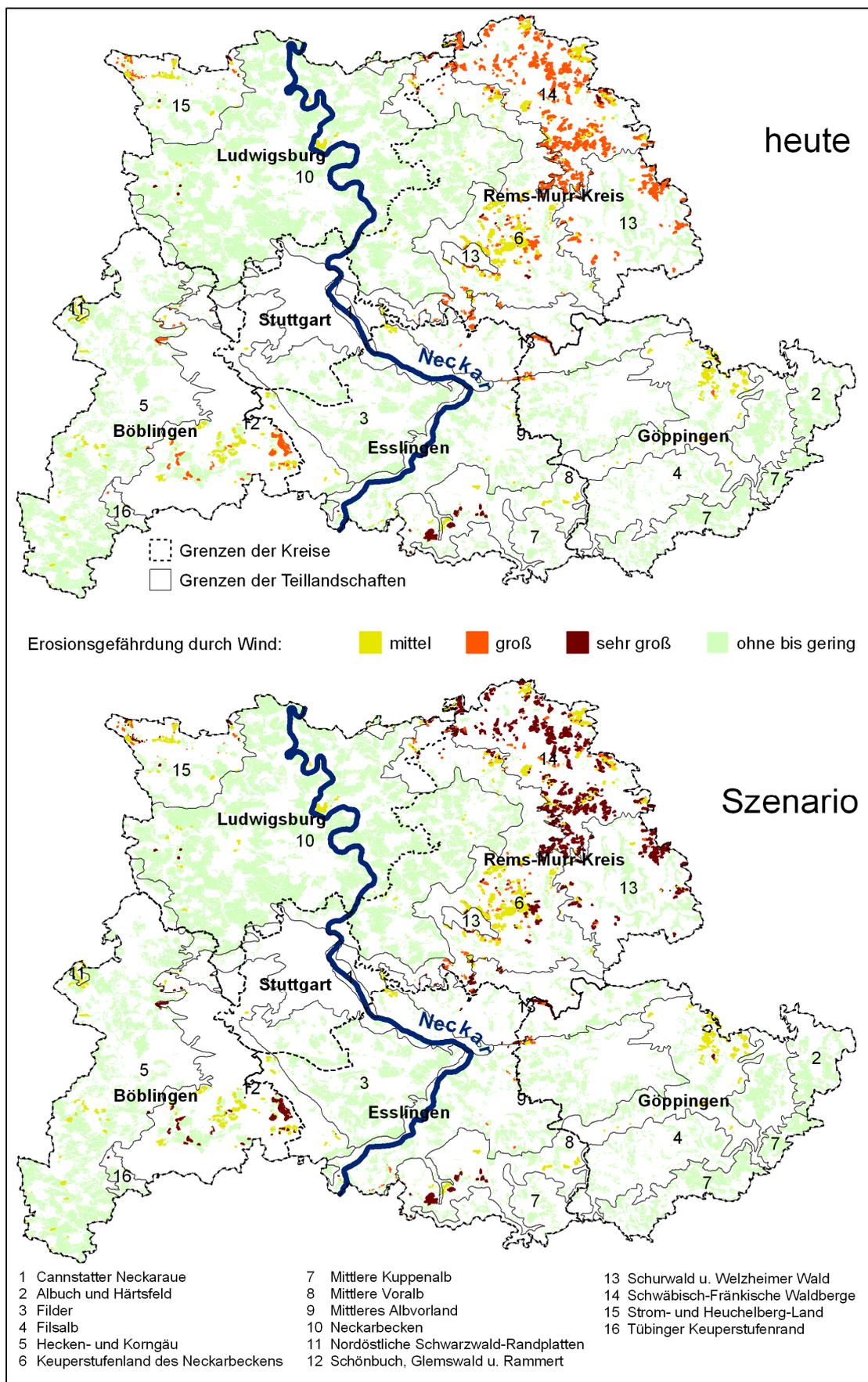


Abb. 38: Zukünftige Veränderung der Erosionsgefährdung ackerbaulich genutzter Flächen durch Wind unter der Annahme, dass die langjährige mittlere Bodenfeuchte abnimmt. Im Szenario wurde von einer pauschalen Minderung der heutigen Bodenfeuchte um eine Stufe ausgegangen (vgl. Abbildung 23).

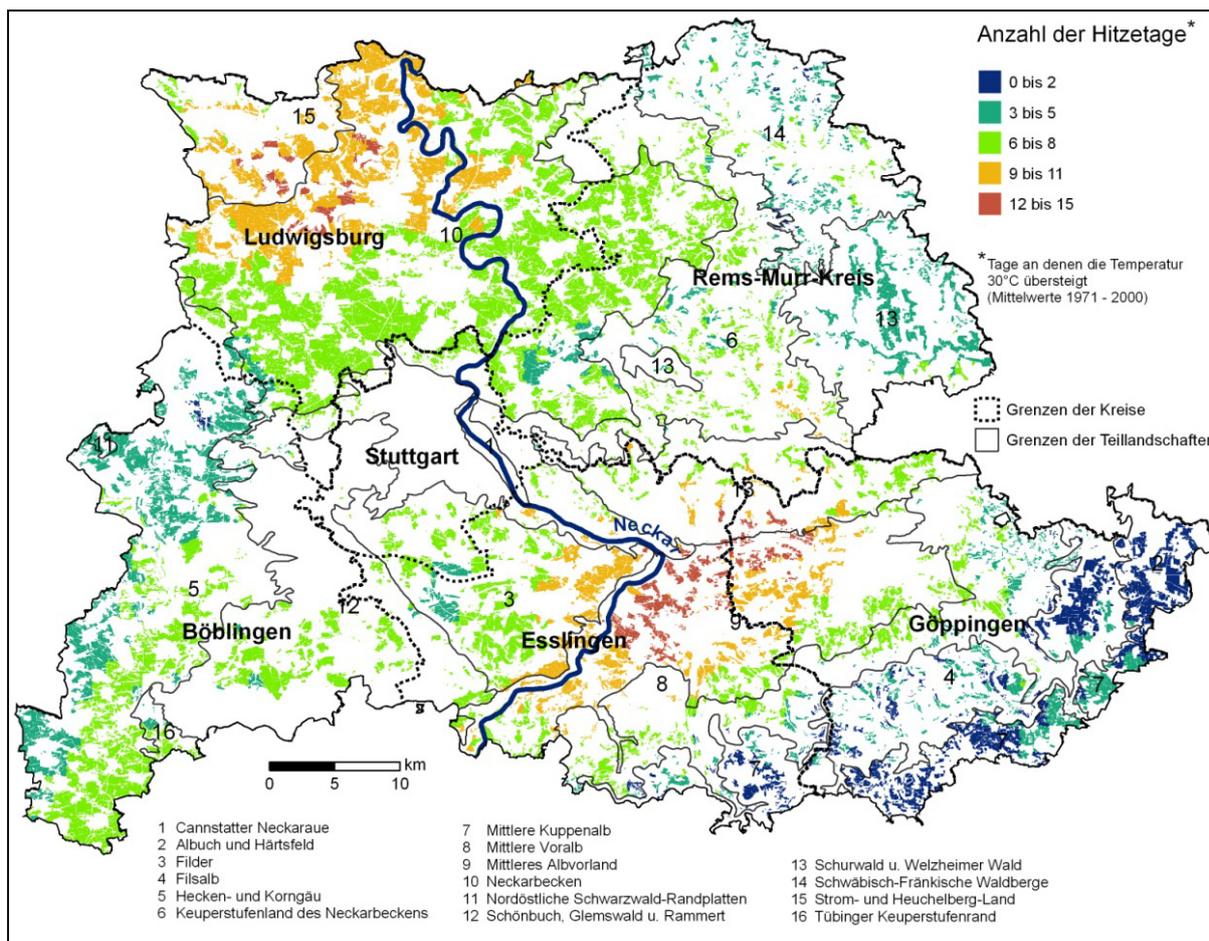


Abb. 39: Anzahl der Hitzetage (1971 – 2000) als Indikator für die Hitzegefährdung von Feldfrüchten (Daten-grundlage: Räumliches Informations- und Planungssystem, Baden-Württemberg).

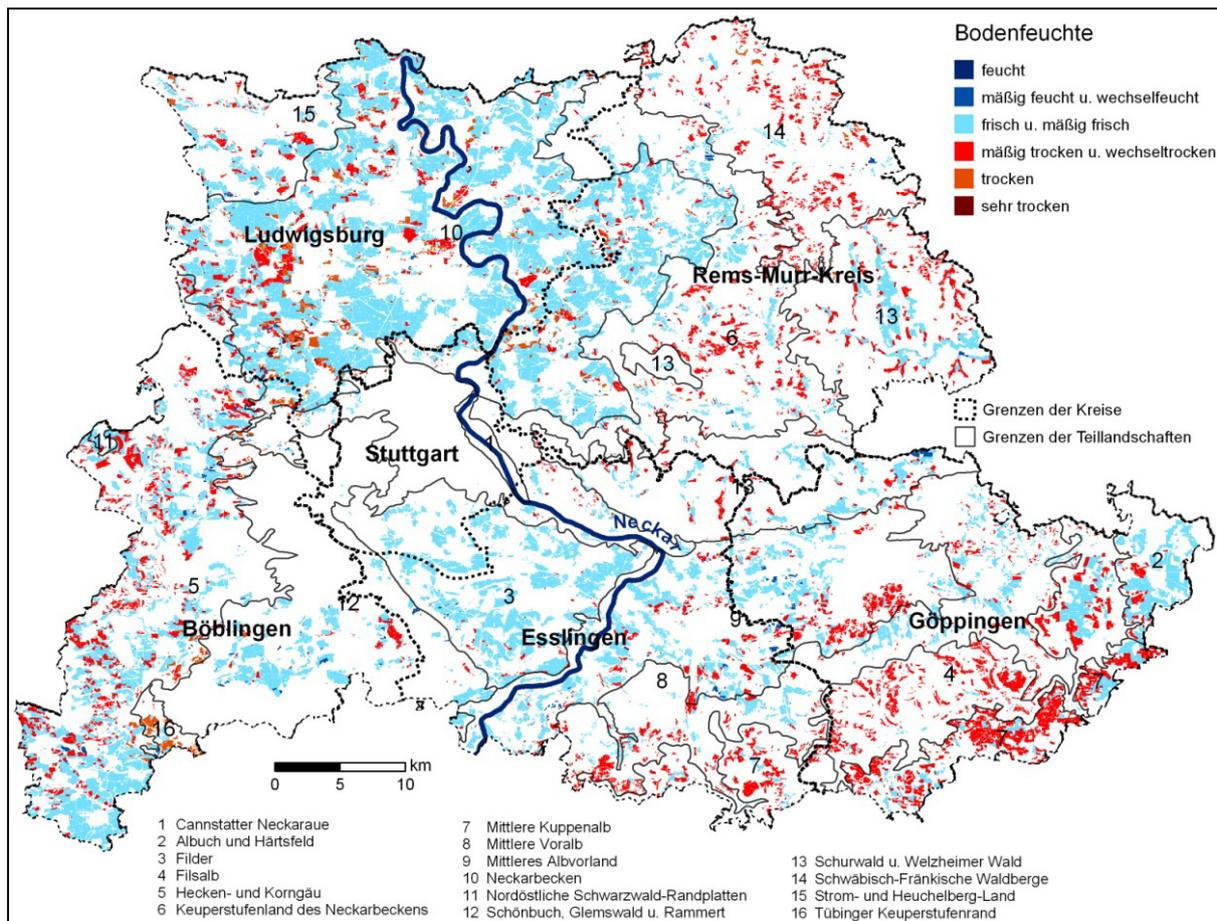


Abb. 40: Bodenfeuchtestufen als Indikator für die Trockenstressgefährdung ackerbaulicher Nutzung (Datengrundlage BK 50).

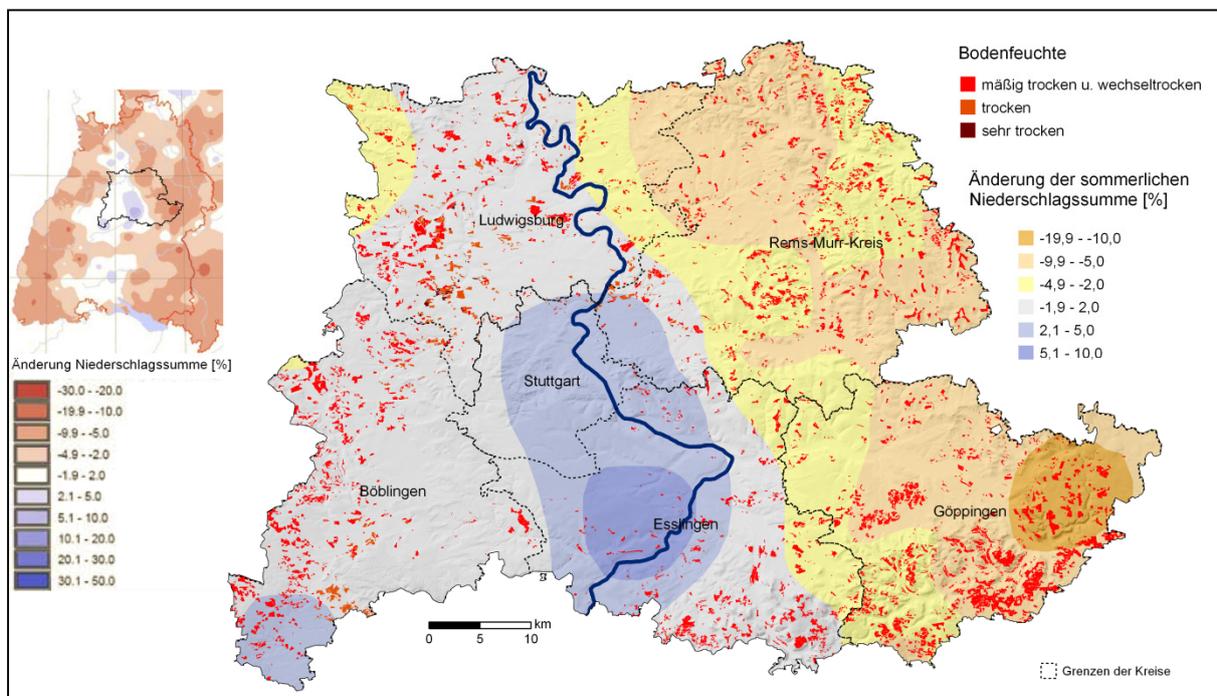


Abb. 41: Ackerbaulich genutzte Standorte mit relativ geringer mittlerer Bodenfeuchte und künftige Veränderung der sommerlichen Niederschlagssumme (2021-2050). Die Nebenkarte stellt für Baden-Württemberg die prozentuale Änderung der sommerlichen Niederschlagssumme gegenüber der Ist-Periode 1971-2000 dar. Quelle: KLIWA 2005. Die Hauptkarte stellt für die Region Stuttgart die ackerbaulich genutzten Standorte mit geringer

mittlerer Bodenfeuchte dar und beschreibt gleichzeitig die Veränderung der Sommerniederschläge (Datengrundlagen: digitale Bodenkarte der Region Stuttgart, ebenda).

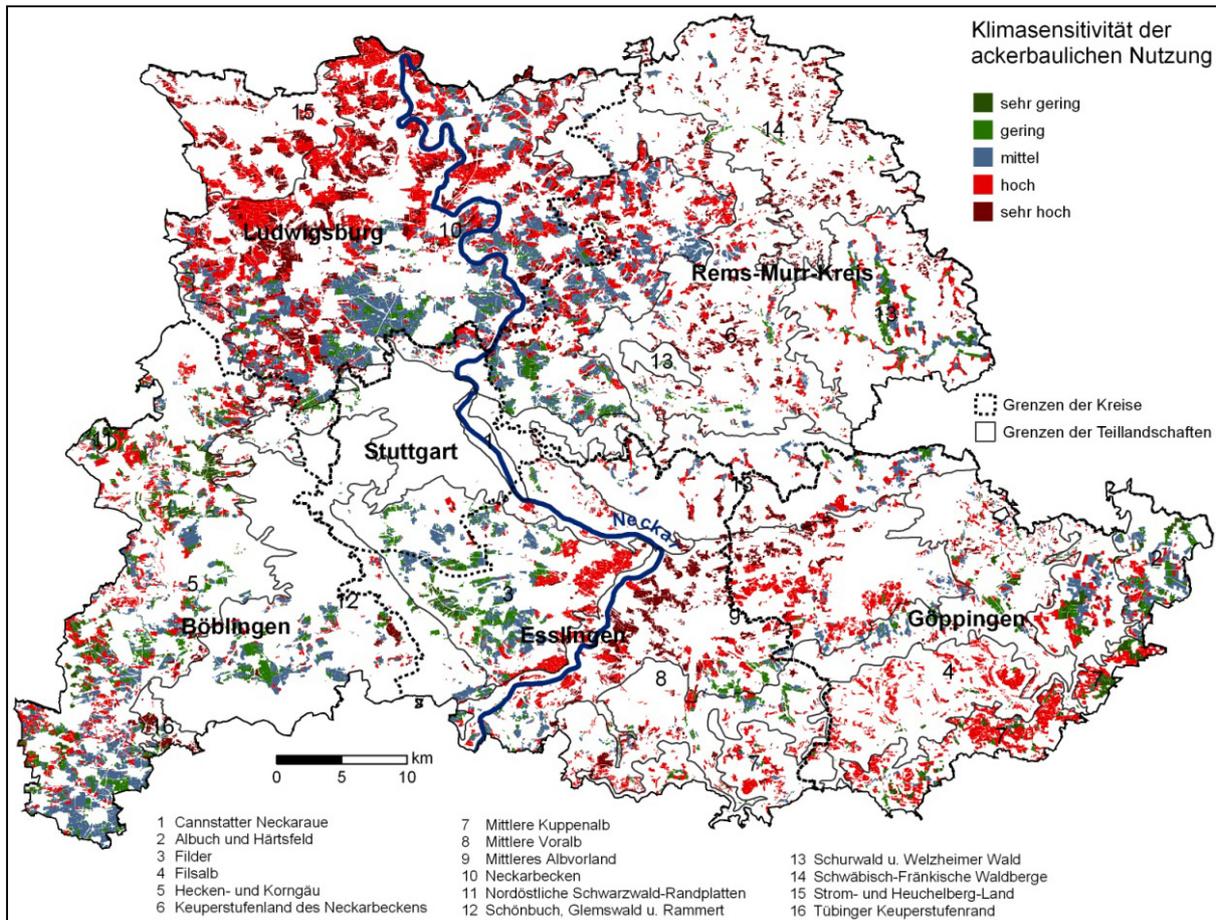


Abb. 42: Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung.

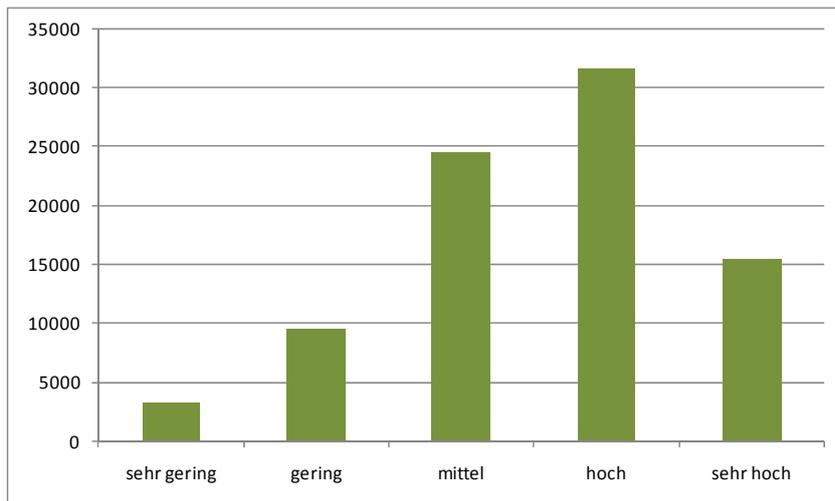


Abb. 43: Verteilung der Flächengrößen (in ha) pro Sensitivitätsstufe in der Region Stuttgart (Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung).

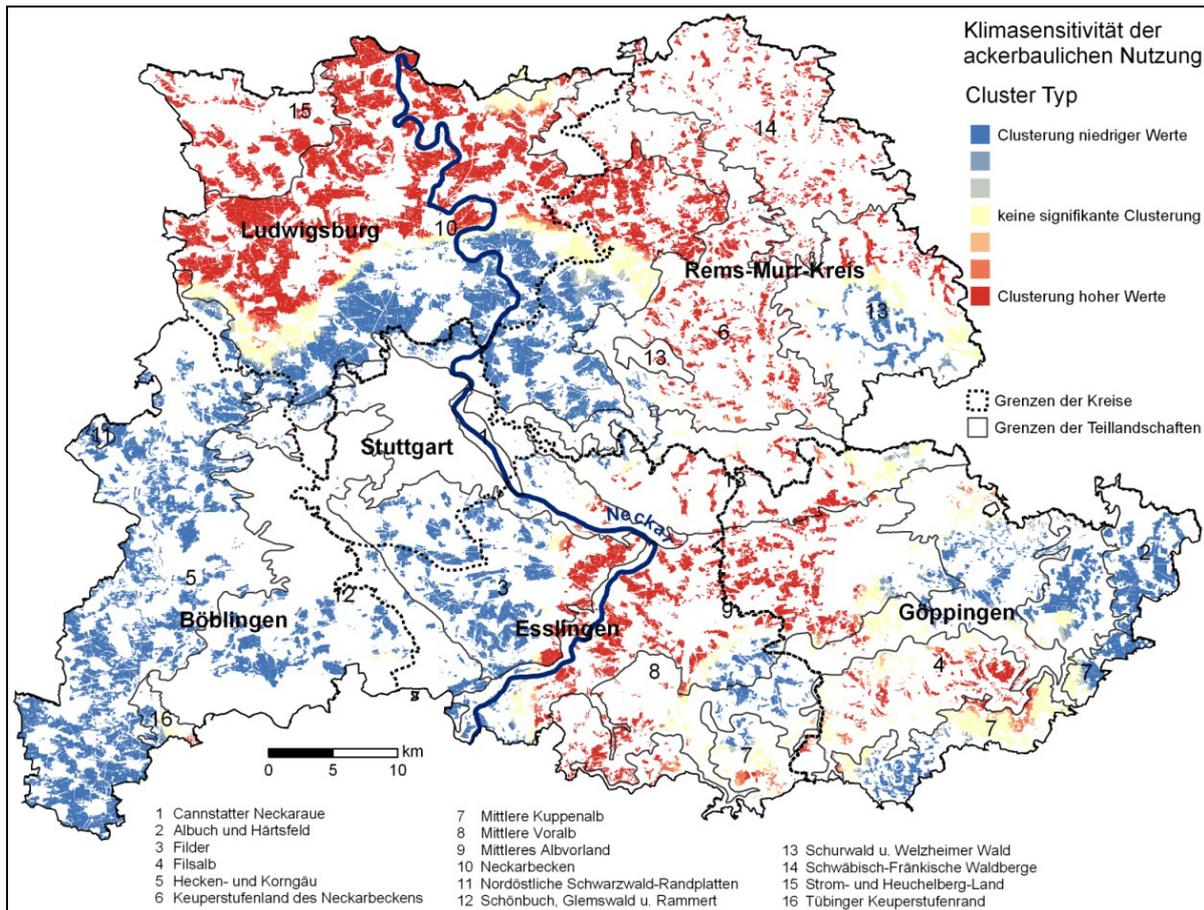


Abb. 44: Räumliche Cluster der Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung.

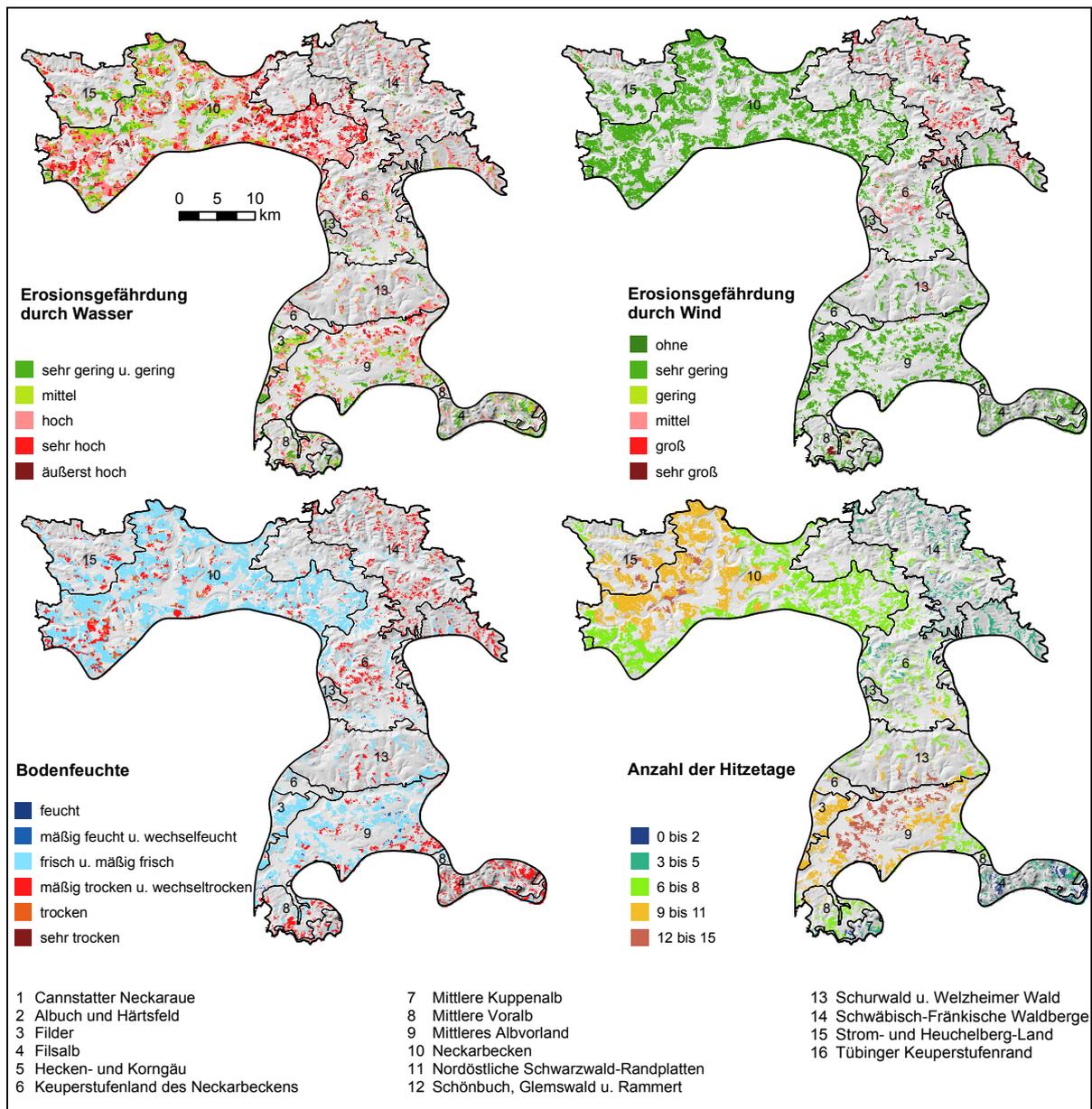


Abb. 45: Ausprägungen der Einzelkriterien des Vulnerabilitätsmodells für den identifizierten Hotspot mit hohen Sensitivitäten der ackerbaulichen Nutzung (vgl. Abb. 44).

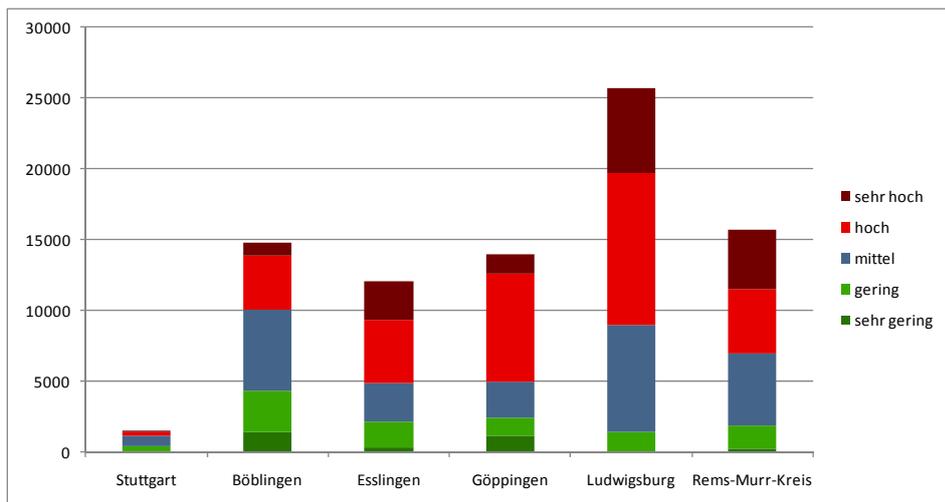


Abb. 46: Verteilung der Flächengrößen (in ha) pro Sensitivitätsstufe nach Stadt- bzw. Landkreisen der Region Stuttgart (Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung).

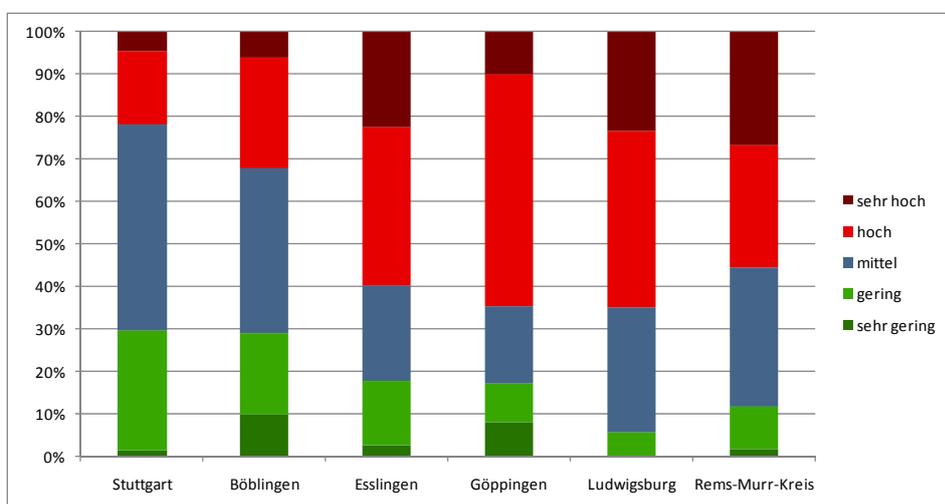


Abb. 47: Prozentuale Verteilung der Flächengrößen pro Sensitivitätsstufe nach Stadt- bzw. Landkreisen der Region Stuttgart (Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung).

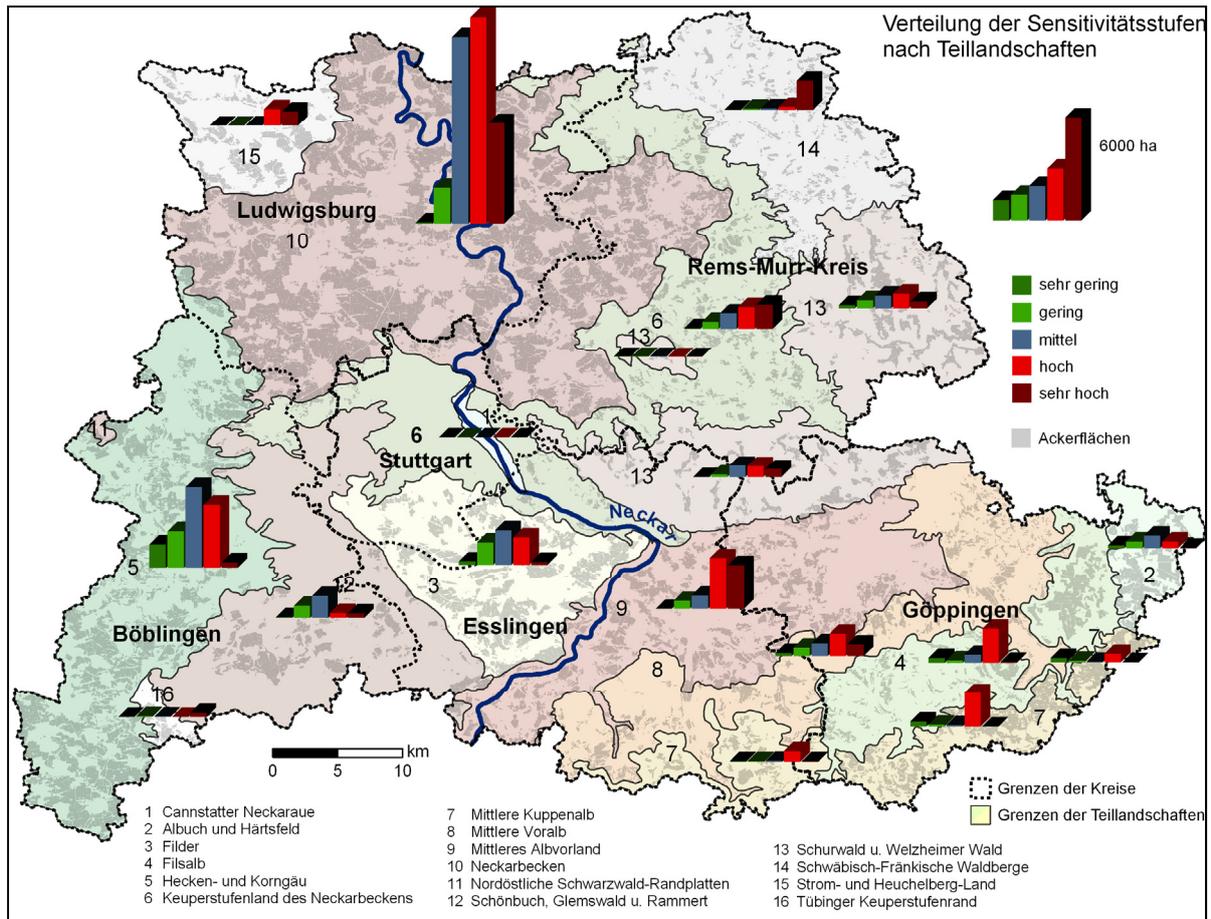


Abb. 48: Verteilung der Sensitivitätsstufen nach Teillandschaften (Klimasensitivität der ackerbaulichen Nutzung).

### 2.3. Empfehlungen für Folgeprojekte und methodische Anmerkungen

In Abschnitt 2.2.1.1 wurde dargestellt, dass Anpassungsreaktionen an den Klimawandel und Maßnahmen zum Klimaschutz bereits gegenwärtig als Gefährdungsgrößen für die biologische Vielfalt auftreten. Die Arbeitsgruppe ist der Auffassung, dass dieser Problemkomplex zukünftig erheblich an Bedeutung gewinnen wird und in einem Zusammenspiel mit anderen raumrelevanten Entwicklungen schon in den nächsten Jahren zur einer äußerst bedenklichen Beschleunigung des landschaftlichen Wandels führen könnte, welcher die Biodiversität, die Eigenart der Kulturlandschaft sowie die Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen (inklusive der sozialen Funktionen der Landschaft) erheblich unter Druck setzen könnte. Es wird daher empfohlen, in einem Folgeprojekt *explorative Landnutzungsszenarien* für die Region Stuttgart zu erarbeiten, mit denen alternative räumliche Entwicklungswege aufgezeigt werden, wie sie aus exogenen Entwicklungstrends (z. B. der Klimaerwärmung oder der Überalterung der Gesellschaft), Strukturbrüchen (etwa einer grundlegenden Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik) und internen, d. h. regionalen Handlungsstrategien resultieren könnten. Räumlich explizite Landnutzungsszenarien eröffnen die Möglichkeit mit Modellierungstechniken die Auswirkungen von Land- und Flächennutzungsänderungen auf verschiedene Umweltmedien abzuschätzen. Somit können Wechselwirkungen zwischen sozioökonomischen Entwicklungen, klimatischen Veränderungen und den Folgen für die Landschaftsfunktionen systematisch aufgezeigt und damit die Strategieentwicklung erheblich unterstützt werden.

Zur Konkretisierung einer regionalen Klimastrategie wird in der Entwicklung von *räumlich expliziten Zielszenarien für den Natur- und Landschaftsschutz* ein vielversprechender Ansatz gesehen. Aufbauend auf den Ergebnissen der hier vorgestellten Verwundbarkeitsuntersuchung sollte die Frage vertieft werden, welche bewährten, aber auch neuen Naturschutzstrategien im Kontext des Klimawandels erfolgversprechend sind, *wie und wo* sie in der Region Stuttgart realisiert werden können und welche Kosten damit verbunden sind. Exemplarisch angeführt seien Aspekte wie die naturverträgliche Ausgestaltung von Klimawandel-Anpassungsmaßnahmen anderer Sektoren, z. B. der Land- und Forstwirtschaft und des Hochwasserschutzes. Auch die Verbesserung des Biotopverbundsystems wäre eine Strategie. Seine Bedeutung im Klimawandel wird fundamental sein, um die Migration von Arten und Populationen in Regionen zu ermöglichen, die auch künftig als Lebensraum geeignet sind. Auch die Diskussion über dynamische Schutzkonzepte ist in diesem Zusammenhang zu führen. Hervorzuheben ist das große Potential zahlreicher Naturschutzmaßnahmen, mit denen gleichzeitig kosteneffektive und nachhaltige Lösungen für die Bewältigung von Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel realisiert werden können.

Die mit diesem Bericht vorgelegten Vulnerabilitätsanalysen dienen der Erlangung eines Überblicks über die Verwundbarkeit der Region Stuttgart im Klimawandel. Im Verlauf der Untersuchung entstanden Ideen für die Weiterentwicklung der Vulnerabilitätsverfahren, mit denen sich ihre Aussagesicherheit steigern lässt. Weitere adäquate Indikatoren könnten in die Bewertungsmodelle integriert werden. So könnte im Bereich Landwirtschaft der Aspekt der Hitzegefährdung von Feldfrüchten durch die Einbeziehung der Exposition einer Ackerfläche (Sonn- und Schatthang) differenzierter eingeschätzt werden, da die Intensität der direkten Sonnenstrahlung einen deutlichen Effekt auf Blatt und Frucht hat. Darüber hinaus könnte die nutzbare Feldkapazität (nFK) des Bodens als Indikator für das Potenzial zur Wasserversorgung für die Transpirationskühlung herangezogen werden. Der Ausbau der Verfahrensansätze wird allerdings nicht selten durch die Verfügbarkeit adäquater Informationsgrundlagen limitiert. So mussten im Bereich Naturschutz/Biodiversität aufgrund der schmalen Datenbasis des Öfteren typusbezogene Einstufungen vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 2.2.2.1). Die Aussagegüte ließe sich hier verbessern, wenn für die flächenmäßig sehr bedeutenden Feuchtbiopte Angaben zur Integrität ihres Wasserhaushalts zur Verfügung stünden, denn es ist davon auszugehen, dass ihre Toleranz gegenüber dem Klimawandel in hohem Maße von der Naturnähe der Bodenwasserverhältnisse bestimmt sein wird (Dister & Henrichfreise 2009).

Vulnerabilitätsverfahren ist ein Problem immanent, dessen man sich in der Umweltbewertung (insbesondere bei der Bewertung von Gefährdungsdispositionen) schon seit langem als „Problem der Quantifizierung“ bewusst ist (z. B. Roweck 1995): Es wird trotz aller Grundlagenforschung auch in abseh-

barer Zeit nicht möglich sein, die Vulnerabilität komplexer Objekte und Prozesse im Klimawandel absolut zu bestimmen, sprich zu quantifizieren. Die derzeit gebräuchlichen Vulnerabilitätsskalen (so auch in dieser Untersuchung) sind in der Regel Relativskalen, womit die Aussage, dass ein Objekt eine hohe Vulnerabilität aufweist, zunächst nur bedeutet, dass innerhalb des untersuchten Raums dieses Objekt im Vergleich zu anderen Objekten eine hohe Verwundbarkeit gegenüber einem Klimastimulus zeigt. Über das tatsächliche Eintreten und das Ausmaß einer möglichen Beeinträchtigung Aussagen zu treffen ist in den meisten Fällen nicht möglich, da das Wissen über komplexe (geo-) ökologische Prozesse dazu nicht annähernd ausreicht. Hinzu kommen die Unsicherheiten hinsichtlich des Ausmaßes der erwarteten Klimaänderung, d. h. der Intensität des Klimastimulus, die als wichtiger Parameter der Vulnerabilität aufzufassen ist (Stock et al. 2009). Allerdings wird in der Arbeitsgruppe der Standpunkt vertreten, dass für praxisbezogene Zwecke (wie die Entwicklung von Anpassungsstrategien) eine Quantifizierung auch nicht erforderlich ist, solange die bestehenden Unsicherheiten bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Gleichwohl lassen sich spezielle Teilaspekte von Vulnerabilität mit mathematischen Modellierungen relativ gut quantifizieren, so vor allem der Landschaftswasserhaushalt, der bei den Prozessen des landschaftlichen Stoff- und Energiehaushalts eine zentrale Funktion hat und verschiedenste gesellschaftlich relevante Bereiche tangiert (Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz, Wasserversorgung etc.). Die modellgestützte Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Landschaftswasserhaushalt in der Region Stuttgart wird daher als ein weiteres vielversprechendes Folgeprojekt angesehen.

## **3. Vulnerabilitätsanalyse im Bereich Wasser**

### 3.1. Ziele und Vorgehensweise der Arbeitsgruppe

Das Ziel der Arbeitsgruppe „Wasser“ bestand aus folgenden Punkten:

- es sollten Bausteine einer regionalen Klimastrategie „Wasser“ erarbeitet werden,
- der Grundrahmen einer Handlungsstrategie solle abgesteckt werden,
- und eine regionale Vulnerabilitätsanalyse war zu erarbeiten.

Als Vorgehensweise wurde eine qualitative Systemanalyse des Komplexes „Klimawandel und Wasser“ in der Region Stuttgart gewählt. Darauf aufbauend wurden die spezifischen Risiken eingeschätzt. Damit sollte ein Überblick über die regionale Verwundbarkeit erlangt und ein Rahmen für spezielle, vertiefende Vulnerabilitätsuntersuchungen abgesteckt werden.

Anders als in den Bereichen „Gesundheit“ und „Biodiversität, Land- und Forstwirtschaft“ wurde innerhalb der Projektlaufzeit des KlimaMORO keine räumlich-quantitative Analyse angestrebt, da die Konstitution dieser Arbeitsgruppe einen langen Vorlauf hatte, wodurch die Aktivitäten der Gruppe erst in einer späten Phase des KlimaMORO begannen. Aufgrund des andauernden Abstimmungsprozesses zwischen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg (LUBW) und den Kommunen des Landes, standen zudem die für die ursprünglich vorgesehenen Arbeiten benötigten Hochwassergefahrenkarten nicht zur Verfügung. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass verschiedene Aspekte des Themenfeldes Wasser im Rahmen der GIS- und modellgestützten Vulnerabilitätsanalysen in den anderen Sektoren bereits ausführlich beleuchtet wurden. Genannt seien exemplarisch die Modellierungen zur Erreichbarkeit von Wasserflächen mit klimatischer Erholungsfunktion bei Wärmebelastung sowie die Betrachtungen der Wasserverfügbarkeit für Kulturpflanzen im Bereich Landwirtschaft.

Die Systemanalyse des Komplexes „Klimawandel und Wasser“ wurde im Rahmen von zwei Workshops durchgeführt an denen sich etwa 15 Experten aus Wissenschaft und Praxis beteiligten. Die vertretenen Institutionen werden in Tabelle 7 aufgeführt. Die Arbeitsgruppenleitung wurde von Prof. Dr. Frieder Haakh (Zweckverband Landeswasserversorgung) übernommen.

Tab. 7: In der Arbeitsgruppe „Wasser“ vertretene Institutionen.

Beteiligte Institutionen
Institut für Landschaftsplanung und Ökologie, Universität Stuttgart
Institut für Raumordnung und Entwicklungsplanung, Universität Stuttgart
Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Regierungspräsidium Stuttgart (Referat Pflanzliche und tierische Produktion)
Landeshauptstadt Stuttgart, Tiefbauamt
EnBW Energie Baden-Württemberg
Zweckverband Landeswasserversorgung
Verband Region Stuttgart
Hafen Stuttgart GmbH

Die Ziele der vorliegenden Untersuchung bestanden konkret in

- der Benennung der wesentlichen Akteure bzw. Sektoren des Gesamtsystems,
- der Identifikation und Bewertung der klimatischen Einflussfaktoren (Klimastimuli) in den verschiedenen Sektoren,
- der Einschätzung denkbarer Auswirkungen des Klimawandels in den Sektoren (Klimawirkungen), und

- der systematischen Untersuchung der komplexen Vernetzungen und Wechselwirkungen im System Wasser.

Damit sollten die stärksten und kritischsten Einflussgrößen identifiziert, Rückkopplungen aufgedeckt und Handlungsspielräume bzw. Anpassungserfordernisse aufgezeigt werden. Darüber hinaus wurde eine Einschätzung der regionsspezifischen Risiken des Klimawandels vorgenommen.

Methodisch wurde die Systemanalyse mit dem Sensitivitätsmodell nach Vester durchgeführt, einem Verfahren, das sich bereits vielfach in den Bereichen Risikomanagement, Kommunal- und Regionalplanung sowie anderen strategischen Planungen bewährt hat. Eine ausführliche Darstellung des Ansatzes findet sich in Vester (2008).

Im ersten Workshop der Arbeitsgruppe wurden zunächst die relevanten Akteure bzw. Sektoren im System Wasser im Rahmen einer Gruppendiskussion zusammengetragen und zu thematisch eng verbundenen Hauptgruppen aggregiert. Anschließend formierten sich Kleingruppen zu den einzelnen Sektoren, deren Aufgabe darin bestand, die bedeutendsten Klimastimuli für den jeweiligen Sektor herauszuarbeiten. Die Ergebnisse wurden an Moderationstafeln präsentiert und im Plenum diskutiert. Im Anschluss daran erarbeiteten die Kleingruppen eine Auflistung der wichtigsten Wirkungen, welche aus den Klimastimuli resultieren könnten. Diese wurden ebenfalls im Rahmen einer Gruppendiskussion reflektiert und gemeinsam vervollständigt.

Die im ersten Workshop zusammengetragenen Faktoren und Klimawirkungen stellten die Variablen für eine sogenannte Einflussmatrix dar, mit der die Vernetzung der Größen systematisch untersucht wurde. Bei der Erstellung der Matrix wird beurteilt, wie die Änderung einer Systemgröße auf die anderen Systemgrößen wirkt. Die Fragestellung lautet immer: *„Wenn ich ein Element A verändere, wie stark verändert sich daraufhin – ganz gleich in welche Richtung – durch indirekte Einwirkung von A das Element B?“* Die Einschätzungen erfolgten semiquantitativ durch die Vergabe von Bewertungsziffern. Dabei bedeutete

- 3: eine geringe Veränderung von A bewirkt eine starke Veränderung von B (überproportionale Reaktion). Es handelt sich um eine starke, überproportionale Beziehung.
- 2: eine starke Veränderung von A bewirkt eine etwa gleich starke Veränderung bei B. Es handelt sich um eine mittlere, etwa proportionale Beziehung.
- 1: eine starke Veränderung von A bewirkt eine schwache Veränderung bei B. Es handelt sich um eine schwache Beziehung.
- 0: eine Veränderung von A bewirkt keine oder nur eine sehr schwache oder mit großer Zeitverzögerung zustande kommende Wirkung bei B. Es liegt keine Beziehung vor.

Die Einflussmatrix wurde nach dem ersten Workshop durch ein Team der Arbeitsgruppenleitung ausgearbeitet und danach ausgewertet. Die Ergebnisse wurden den Arbeitsgruppenmitgliedern im Vorfeld des zweiten Workshops zugesandt und um kritische Durchsicht gebeten. Rückmeldungen wurden eingearbeitet. Auf diese Weise konnte erreicht werden, dass die Einflussmatrix von allen Teilnehmern getragen wurde, womit sie den Status einer Konsensmatrix erlangte.

Im Rahmen der Auswertung wurde zunächst die sogenannte „Aktivsumme“ der Systemgrößen berechnet, die sich aus den Zeilensummen der Bewertungsziffern in der Einflussmatrix ergibt. Weist eine Größe eine hohe Aktivsumme auf, so ist davon auszugehen, dass ihre Veränderung erhebliche Reaktionen im System auslöst. Der „Aktivsumme“ steht die „Passivsumme“ gegenüber, die aus den Spaltensummen der Bewertungsziffern ermittelt wird. Eine Variable mit hoher Passivsumme reagiert äußerst stark auf Veränderungen im System (Abbildung 53).

Wirkung von ↓ auf →		A	B	C	D	E	F	G	H	$\Sigma_{\text{aktiv}}$
A		x	+	+	+	+	+	+	+	
B		+	x							
C		+		x						
D		+			x					
E		+				x				
F		+					x			
G		+						x		
H		+							x	
$\Sigma_{\text{passtiv}}$										

Abb. 49: Struktur der Einflussmatrix mit Berechnung von Aktiv- und Passivsummen (nach Vester 2008, verändert).

Als weitere Einflussindizes wurden der Quotient von Aktiv- zu Passivsumme sowie deren Produkt berechnet. Während Ersterer eindeutige Rückschlüsse auf die Relevanz einer Variable im System erlaubt, indiziert das Produkt, wie „kritisch“ die einzelnen Variablen sind. Kritische Variablen bedürfen einer besonderen Aufmerksamkeit.

Anhand ihrer Aktiv- und Passivsumme lassen sich die Systemgrößen in einem Koordinatensystem positionieren. Ihre Lage charakterisiert die Rolle, die sie im System spielen (Abbildung 50).

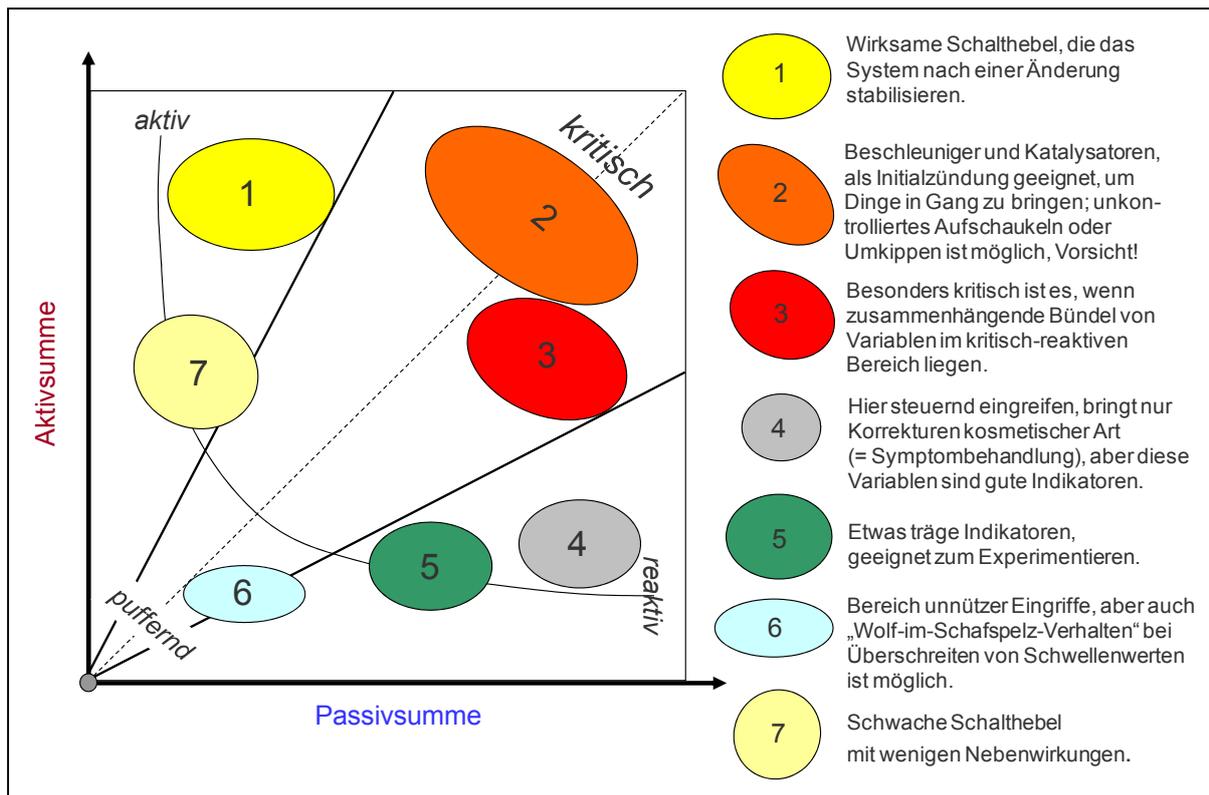


Abb. 50: Rollenverteilung der Variablen eines Systems, wie sie sich aus der Konsistenzmatrix ergeben (nach Vester 2008, verändert).

Im Rahmen des zweiten Workshops wurden nach einer Präsentation der bisherigen Ergebnisse durch den Arbeitsgruppenleiter und der daran anschließenden Diskussion in thematischen Kleingruppen die spezifischen Besonderheiten (Alleinstellungsmerkmale) der Region Stuttgart im Hinblick auf die identifizierten Problemlagen konkretisiert. So ist beispielsweise das generelle Problem der Temperaturzunahme in Fließgewässern im Falle des Neckars besonders prekär, da dessen Wassertemperatur (u.a. infolge der Kühlwassernutzung) schon gegenwärtig erheblich vom natürlichen Zustand abweicht. Die grundsätzlich hohe Empfindlichkeit von Sonderkulturen (Wein-, Obst- und Gemüseanbau) hat in der Region Stuttgart eine überdurchschnittliche Relevanz, da deren Anteil am primären Sektor sehr hoch ist. Für solcherlei Spezifika wurde anschließend, ebenfalls in Kleingruppenarbeit, eine Risikoeinschätzung vorgenommen, indem die Alleinstellungsmerkmale in ein Koordinatensystem eingeordnet wurden, welches aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schadenshöhe aufgespannt wird.

### 3.2. Ergebnisse der Systemanalyse

#### 3.2.1. Wesentliche Sektoren und ihre klimabedingten Einflussfaktoren

Im Folgenden werden die in der Arbeitsgruppe identifizierten Hauptsektoren und die für diese wirksamen klimatischen Einflussfaktoren in knapper Form wiedergegeben.

##### a. Stadt- und Raumplanung

- Auswirkung zunehmender Hochwasser- und Starkregenereignisse auf Siedlungen (Hangrutschungen, Erosion etc.)
- Diffuse Einträge von Schadstoffen aus Landwirtschaft und Siedlungsnutzungen (und dadurch z.B. Gefährdung der Trinkwasserversorgungssicherheit bei neuen und bestehenden Siedlungen)
- Veränderungen der Bevölkerungsentwicklung /-verteilung

*b. Gewässerökologie*

- Niedrig- und Hochwasserschwankungen
- Veränderung der Abflussdynamik (extreme Anpassung ist notwendig)
- Hohe Konzentration der Schadstoffeinträge durch Starkregenereignisse
- Veränderung der Wassertemperatur
- Sauerstoffmangel in Fließgewässern und in stehenden Gewässern

*c. Landwirtschaft/Grundwasser/Bodenschutz*

- Zunahme der Wasser- und Winderosion, Stürme etc.
- Zunahme der Häufigkeit und Länge von Trockenperioden
- Generelle Variabilität des Wettergeschehens
- Variabilität der Niederschlagsverteilung
- Häufigere Hagelereignisse
- Verlängerung der Vegetationsperiode
- Zunahme der Häufigkeit der Starkniederschläge

*d. Hochwasserschutz/Schifffahrt (Stuttgarter Hafen)*

- Veränderung des Wasserstandes (Hoch- und Niedrigwasser)
- Veränderung der Niederschlagsmenge je nach Jahreszeiten (im Sommer weniger, im Winter dagegen starke Änderungen)
- Schutzgrad erhöht sich, d.h. Wiederherstellungsintervalle erhöhen sich, z. B. der Uferbefestigung

*e. Energieversorgung/Wasserversorgung/Abwasserentsorgung bzw. Stadtentwässerung*

- häufiger Starkniederschlag
- längere Trockenperioden
- Zunahme der Extreme (z.B. Temperaturspitzen)
- „Steilere Gradienten“, d.h. oft sehr schnelle und steile Schwankungen
- Verschiebung der Grundwasserneubildung

### 3.2.2. Mögliche Wirkungen des Klimawandels in den Sektoren

In einem zweiten Schritt wurden mögliche Wirkungen des Klimawandels sektorspezifisch zusammengetragen.

*a. Stadt- und Raumplanung*

- Problem der Gewährleistung von Wasserver- und -entsorgung, insbesondere bei ungünstigen Siedlungslagen
- Einschränkung der Nutzbarkeit von überschwemmungsgefährdeten Flächen für die Siedlungserweiterung
- Kostensteigerungen für Gebäudeeigentümer und Infrastrukturnutzer (Versicherung, höhere Gebühren etc.)

*b. Gewässerökologie*

- Anfälligkeiten erhöhen sich, z. B. durch Artensterben, Massenvermehrung
- Veränderung des Landschaftsbildes hinsichtlich Nutzbarkeit und Erlebbarkeit
- Veränderung der ökologischen Wertigkeit

- Veränderung in der Artenzusammensetzung, z. B. durch neue Arten und dadurch Belastung/Veränderung der Landwirtschaft

c. *Landwirtschaft/Grundwasser/Bodenschutz*

- Deflation/Erosion/Bodenfruchtbarkeit
- Zunahme von Schädlingsbefall und Krankheiten
- Abnahme der Wasserverfügbarkeit
- Veränderung der Art der Bewirtschaftung
- Veränderung in der Kulturzusammensetzung (neue angepasste Kulturpflanzen - „gefährdete“ Pflanzen z.B. Mais und Raps)
- Ertragsschwankungen
- Steigender Bewässerungsbedarf
- Veränderung des Landschaftsbildes und der Kulturlandschaft
- Beeinflussung der Qualität des Grund- und Oberflächengewässers (z.B. Nährstoffeintrag durch Düngemittel, ungefilterte Auswaschung durch Starkregen)

d. *Hochwasserschutz/Schifffahrt (Stuttgarter Hafen)*

- Anpassung der Hochwasserschutzanlagen (Baden-Württemberg plant z.B. bei neuen Anlagen einen Klimaveränderungsfaktor ein)
- Intensivierung der Hochwasservorsorge und des -managements
- Verlagerung der Verkehrsträger und Veränderung der Trimodalität Schiff/Straße/Schiene, d.h. mögliche Verlagerung des Gütertransports auf Schiene und Straße mit Folgen wie Lärm, höhere Kosten
- Investitionsbedarf für alternative Verkehrsträger
- höherer Unterhaltungsaufwand z.B. durch Gewährleistung der 2,8 m Wassertiefe
- mögliche Ver- und Entsorgungspässe mit Massengütern

e. *Energieversorgung/Wasserversorgung/Abwasserentsorgung bzw. Stadtentwässerung*

- Schwankungen bei Rohwasserangebot, insbesondere bei kleinen Wasserspeichern und in Hinblick auf die Qualität
- Versorgungssicherheit: abnehmendes Wasserdargebot über das Jahr gesehen
- insgesamt jedoch Zunahme der Spitzenfaktoren
- Stromversorgung: evtl. Versorgungsengpässe bei Spitzenbedarf
- Verkürzung der Reaktionszeiten (Energieversorgung)
- Energieerzeugung durch Laufwasserkraftwerke schwankt
- Kühlwasserangebot schwankt
- Abwasserreinigungsverfahren (Klärwerk)
- Hygieneprobleme wg. fehlender Ausspülung (z.B. Ratten, Ablagerungen)
- Dimensionsveränderung/Anpassungsbedarf bei Kanälen, Rohren etc.

### 3.2.3. Die Vernetzung der Systemgrößen

Die unter Einbeziehung aller Teilnehmer entwickelte Konsensmatrix zeigt Abbildung 51. Aus Gründen der Darstellung werden die Variablen teilweise verkürzt wiedergegeben. In Abbildung 52 werden die aus der Konsensmatrix abgeleiteten Aktivsummen der Systemgrößen präsentiert. Eine Hohe Aktivsumme bedeutet: „Ändere ich diese Variable, so tut sich im System allerhand!“ Danach ist davon auszugehen, dass die Veränderung folgender Aspekte erhebliche Reaktionen entfalten können (in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung):

- Zunahme der Extreme (z.B. Temperaturspitzen); Hagel; Häufigkeit der Starkniederschläge; Zunahme der Erosion, Stürme etc.

- Zunahme der Häufigkeit und Länge der Trockenperioden sowie längere Trockenperioden
- Zunahme der Variabilität des Wettergeschehens: Niedrig- und Hochwasserschwankungen
- Veränderung des Wasserstandes (Hoch- und Niedrigwasser), Abflussdynamik
- „Steilere Gradienten“, d.h. oft sehr schnelle und steile Schwankungen; Variabilität der Niederschlagsverteilung
- Abnahme der Wasserverfügbarkeit
- Deflation/Erosion/Bodenfruchtbarkeit
- Anpassung der Hochwasserschutzanlagen (Baden-Württemberg plant z.B. bei neuen Anlagen einen Klimaveränderungsfaktor ein)
- Kostensteigerungen für Gebäudeeigentümer und Infrastrukturnutzer (Versicherung, höhere Gebühren etc.)
- Höhere Planungsaufgaben und -restriktionen notwendig, z.B. neue Anforderungen in Bezug auf Wasserrahmenrichtlinie der EU
- Verschiebung der Grundwasserneubildung; Veränderung der Niederschlagsmenge je nach Jahreszeiten (im Sommer weniger, im Winter dagegen starke Änderungen)

Die Passivsummen der Einflussmatrix werden in Abbildung 53 veranschaulicht. Hohe Passivsumme bedeutet: „Ändert sich im System irgend etwas, so reagiert diese Variable sehr stark!“ Die folgenden Gesichtspunkte sind als ausgesprochen reaktiv zu charakterisieren:

- Kostensteigerungen für Gebäudeeigentümer und Infrastrukturnutzer (Versicherung, höhere Gebühren etc.)
- Einschränkung der Nutzbarkeit von überschwemmungsgefährdeten Flächen für die Siedlungserweiterung
- Qualität des Grund- und Oberflächengewässers (z. B. Nährstoffeintrag durch Düngemittel, ungefilterte Auswaschung durch Starkregen); diffuse Einträge
- Veränderung der ökologischen Wertigkeit
- Steigender Bewässerungsbedarf
- Hohe Konzentration der Schadstoffeinträge durch Starkregenereignisse
- Veränderung der Art der Bewirtschaftung; Veränderung in der Kulturartenzusammensetzung (neue angepasste Kulturpflanzen - „gefährdete“ Pflanzen sind z.B. Mais und Raps)
- Veränderung in der Artenzusammensetzung, z. B. durch neue Arten und dadurch Belastung
- Abnahme der Wasserverfügbarkeit
- Deflation/Erosion/Bodenfruchtbarkeit

In Abbildung 54 werden die Quotienten von Aktiv- zu Passivsummen wiedergegeben, wie sie sich aus der Konsensmatrix ergeben. Erst der Quotient von Aktiv- zu Passivsumme spiegelt den aktiven oder passiven Charakter einer Variablen wider ("Hat die Variable etwas zu sagen?"). Demzufolge haben die folgenden Attribute eine ausgesprochen hohe Relevanz im System:

- „Steilere Gradienten“, d.h. oft sehr schnelle und steile Schwankungen; Variabilität der Niederschlagsverteilung
- Zunahme der Häufigkeit und Länge von Trockenperioden
- Zunahme der Extreme (z.B. Temperaturspitzen); Hagel; Häufigkeit der Starkniederschläge; Zunahme Erosion, Stürme etc.
- Zunahme der Variabilität des Wettergeschehens: Niedrig- und Hochwasserschwankungen, Abflussdynamik
- Verschiebung der Grundwasserneubildung; Veränderung der Niederschlagsmenge je nach Jahreszeiten (im Sommer weniger, im Winter dagegen starke Änderungen)
- Höhere Planungsaufgaben und -restriktionen; z. B. neue Anforderungen in Bezug auf Wasserrahmenrichtlinie der EU notwendig
- Veränderungen der Bevölkerungsentwicklung /-verteilung

Wie im vorherigen Abschnitt bereits ausgeführt wurde, charakterisiert das Produkt aus Aktiv- und Passivsumme, wie stark eine Variable am Systemgeschehen beteiligt ist (ein hoher Wert repräsentiert einen kritischen Charakter, ein geringer Wert einen pufferenden Charakter). Merkmale mit dem höchsten Produkt sind nach Abbildung 55:

- Kostensteigerungen für Gebäudeeigentümer und Infrastrukturnutzer (Versicherung, höhere Gebühren etc.)
- Abnahme der Wasserverfügbarkeit
- Deflation/Erosion/Bodenfruchtbarkeit
- Anpassung der Hochwasserschutzanlagen (Baden-Württemberg plant z.B. bei neuen Anlagen einen Klimaveränderungsfaktor ein); Schutzgrad erhöht sich, d.h. Wiederherstellungsintervalle erhöhen sich, z. B. der Uferbefestigung etc.; höherer Unterhaltungsaufwand z. B. durch Gewährleistung von 2,8 m Wassertiefe
- Steigender Bewässerungsbedarf
- Veränderung der ökologischen Wertigkeit
- Hohe Konzentration der Schadstoffeinträge durch Starkregenereignisse
- Veränderung der Art der Bewirtschaftung; Veränderung in der Kulturzusammensetzung (neue angepasste Kulturpflanzen - „gefährdete“ Pflanzen sind z. B. Mais und Raps)
- Qualität des Grund- und Oberflächengewässers (z. B. Nährstoffeintrag durch Düngemittel, ungefilterte Auswaschung durch Starkregen); diffuse Einträge
- Intensivierung der Hochwasservorsorge und des -managements notwendig

Eine Gesamtschau der Rollenverteilungen im System Wasser und Klimawandel illustriert Abbildung 56. Aktive, kritische und reaktive Attribute werden deutlich, aus denen sich Anhaltspunkte für geeignete Anpassungsstrategien ableiten lassen.

A\B	→ B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Passivsumme:	Aktivsumme	
1	Zunahme Häufigkeit und Länge der Trockenperioden, längere Trockenperioden	x	2	3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	3	2	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46
2	Zunahme der Variabilität des Weitergeschlechts: Niedrig- und Hochwasserschwankungen, Veränderung des Wasserstandes	2	x	1	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	2	1	2	2	2	1	1	0	2	2	1	2	2	2	2	2	2	38	
3	Zunahme der Extreme (z.B. Temperaturspitzen), Hagel, Häufigkeit der Starkniederschläge, häufiger Temperaturstöße	0	3	x	1	2	0	1	0	0	1	2	3	2	3	3	1	1	3	3	3	2	2	1	0	1	2	1	2	2	3	3	49		
4	„Stellere Gradienten“ d.h. oft sehr schnelle und steile Schwankungen, Variabilität der Grundwasserneubildung, Verschiebung der Grundwasserneubildung, Veränderung der Niederschlagsmenge	0	0	2	x	1	1	1	0	0	0	1	1	1	3	3	1	0	0	1	2	3	3	1	0	1	2	1	1	2	2	3	35		
5	Verschiebung der Grundwasserneubildung, Veränderung der Höhere Planungsauflagen und -restriktionen notwendig, z.B. Neue Anforderungen in Bezug auf Einschränkung der Nutzbarkeit	3	1	0	0	x	0	1	0	0	1	1	1	1	3	2	1	3	2	1	2	1	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	24		
6	Höhere Planungsauflagen und -restriktionen notwendig, z.B. Neue Anforderungen in Bezug auf Einschränkung der Nutzbarkeit	0	0	0	0	0	x	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	3	2	0	0	0	0	3	0	0	3	25		
7	Einschränkung der Nutzbarkeit	0	0	0	0	1	2	x	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10			
8	Kostensteigerung (Versicherung, höhere Gebühren etc.)	0	0	0	0	0	3	2	x	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	2	3	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	26		
9	Veränderungen der Bevölkerungsentwicklung /verteilung	0	0	0	0	0	1	2	2	x	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	16			
10	Veränderung des Landschaftsbildes hinsichtlich Nutzbarkeit und Erlebbarkeit (Gewässerökologie), Veränderung der ökologischen Wertigkeit	0	0	0	0	0	1	0	1	0	x	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3			
11	Veränderung der Wassertemperatur, Sauerstoffmangel, Anfälligkeiten erhöhen sich z.B. durch Artensterben, Veränderung in der Artzusammensetzung, z.B. durch neue Arten und dadurch	0	0	0	0	0	0	2	3	0	2	x	0	2	0	2	0	2	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	17			
12	Veränderung der Wassertemperatur, Sauerstoffmangel, Anfälligkeiten erhöhen sich z.B. durch Artensterben, Veränderung in der Artzusammensetzung, z.B. durch neue Arten und dadurch	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	3	x	3	1	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24			
13	Veränderung in der Artzusammensetzung, z.B. durch neue Arten und dadurch	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	2	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4			
14	Höhe Konzentration der Schadstoffeinträge durch Starkregenereignisse	0	0	0	0	0	1	2	0	1	3	2	2	x	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	20			
15	Deflation/Erosion/Bodenfruchtbarkeit	0	0	0	0	0	0	2	2	0	3	3	0	2	3	x	1	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	31			
16	Abnahme der Wasserverfügbarkeit	0	0	0	0	0	0	2	3	1	2	3	2	2	3	1	x	2	2	3	2	1	0	0	0	2	3	0	0	0	0	34			
17	Veränderung der Art der Bewirtschaftung, Veränderung in der Kulturzusammensetzung (neue Ertragsschwankungen, Zunahme von Schädlingsbefall und Krankheiten)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	2	1	2	1	x	2	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20			
18	Ertragsschwankungen, Zunahme von Schädlingsbefall und Krankheiten	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	3	x	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19			
19	Steigender Bewässerungsbedarf	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	2	0	1	1	2	3	3	1	x	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19			
20	Qualität des Grund- und Oberflächengewässers (z.B. Nährstoffeintrag durch Düngemittel, Anpassung der Hochwasserschutzanlagen (Baden-Württemberg plant z.B. bei neuen Intensivierung der Hochwasservorsorge und des -managements notwendig)	0	0	0	0	0	0	2	3	0	2	2	0	1	2	3	0	0	0	1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14			
21	Anpassung der Hochwasserschutzanlagen (Baden-Württemberg plant z.B. bei neuen Intensivierung der Hochwasservorsorge und des -managements notwendig)	0	0	0	0	0	0	2	3	0	2	2	0	1	2	3	0	0	0	0	1	x	3	2	2	0	0	0	1	1	2	30			
22	Verlagerung der Verkehrsträger und Veränderung der Trimodalität Schiff/Straße/Schiene, d.h. mögliche mögliche Ver- und Entsorgungspässe mit Massengütern	0	0	0	0	0	2	3	3	0	1	1	0	0	2	2	0	1	0	0	1	3	x	1	1	0	0	0	0	0	0	23			
23	Verlagerung der Verkehrsträger und Veränderung der Trimodalität Schiff/Straße/Schiene, d.h. mögliche mögliche Ver- und Entsorgungspässe mit Massengütern	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	2	0	0	0	0	0	4				
24	Entsorgungspässe mit Massengütern	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	x	0	0	0	0	0	0	0	8			
25	Versorgungssicherheit, Abnahme des Wasserdargebot über das Jahr gesehen, Schwankungen bei Zunahme der Spitzenfaktoren	0	0	0	0	0	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	3	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20			
26	Abnahme des Wasserdargebot über das Jahr gesehen, Schwankungen bei Zunahme der Spitzenfaktoren	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7				
27	Stromversorgung: evt. Versorgungspässe bei Spitzenbedarf	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6				
28	Einschränkung der Energieerzeugung, Energieerzeugung der Laufwasserkraftwerken schwankt, Abwasserreinigungsverfahren (Kläwerk)	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	x	0	0	6			
29	Einschränkung der Energieerzeugung, Energieerzeugung der Laufwasserkraftwerken schwankt, Abwasserreinigungsverfahren (Kläwerk)	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	x	0	11			
30	Hygieneprobleme wg. fehlender Ausspülung (z.B. Ratten, Ablagerungen), Stadthygiene	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	4			
31	Dimensionsveränderung/Anpassungsbedarf bei Kanälen, Rohre, ...	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	x	11			
	<b>Passivsumme:</b>	5	6	6	1	8	10	37	49	8	25	35	14	27	28	25	26	27	19	32	36	25	19	15	9	13	18	12	17	14	17	21			

Abb. 51: Konsensmatrix (d.h. von allen Teilnehmern getragene Einflussmatrix) des Systems Wasser inklusive Aktiv- und Passivsummen.

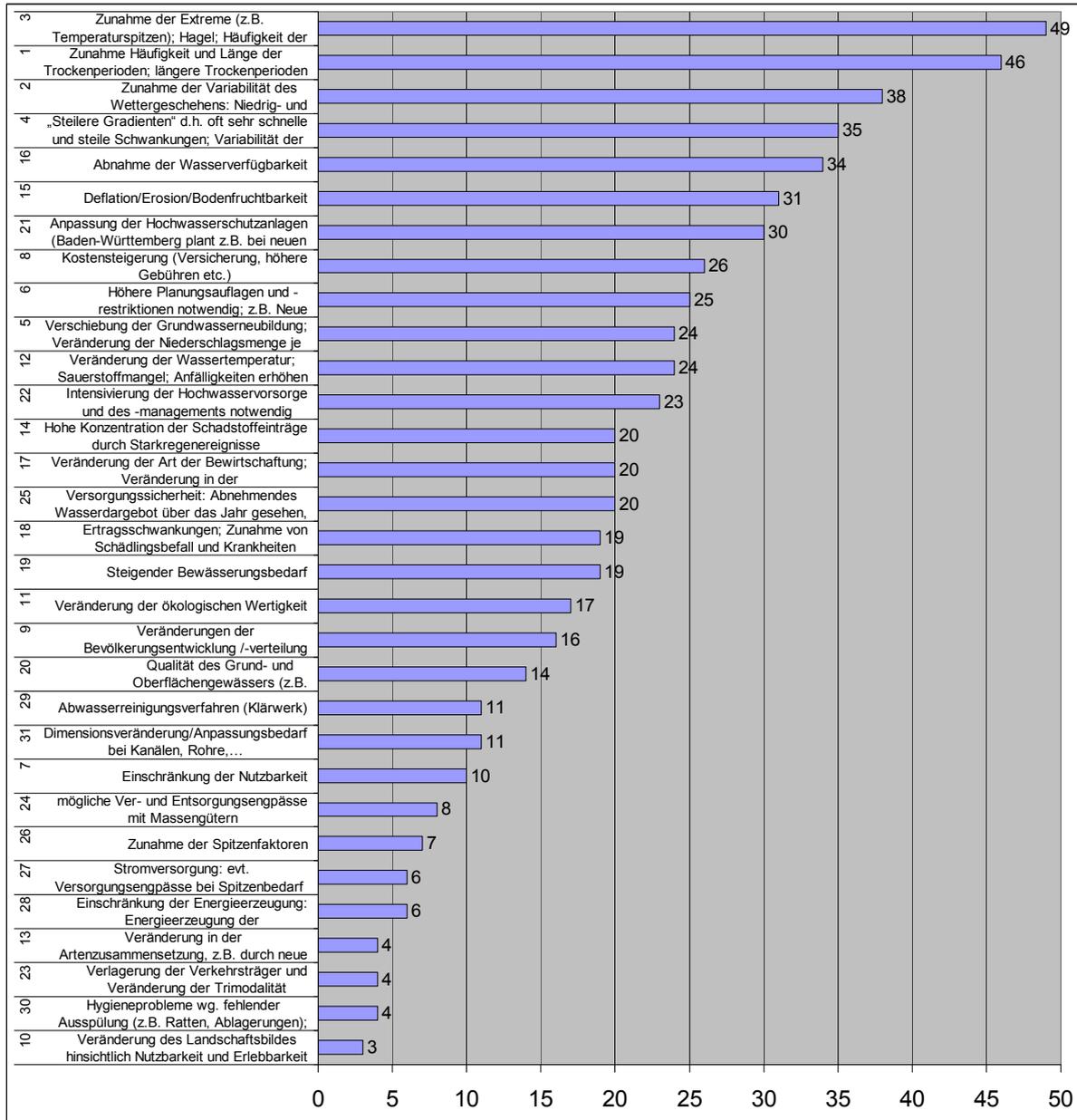


Abb. 52: Die Aktivsummen aus der Konsensmatrix, geordnet nach der Größe.

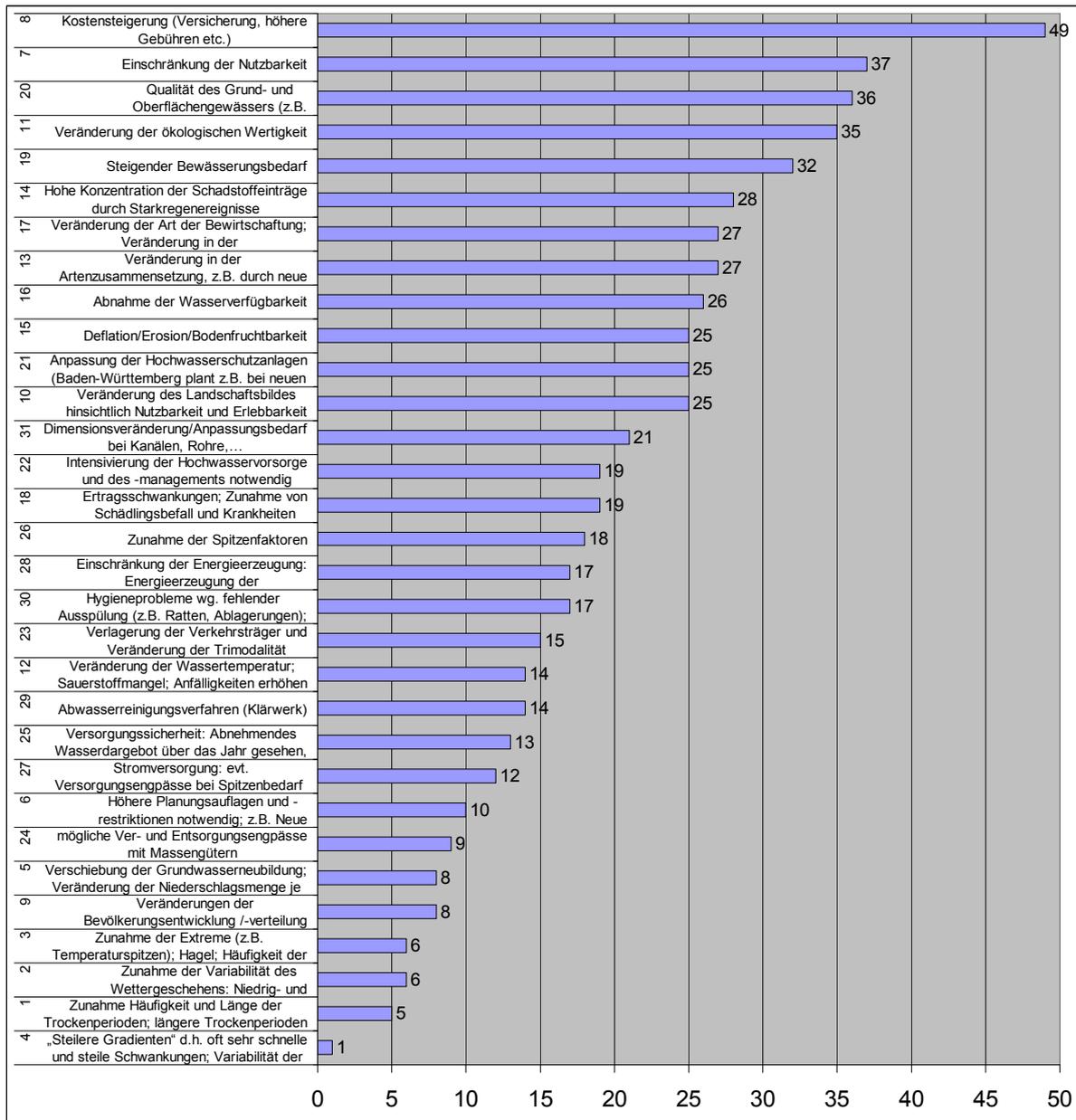


Abb. 53: Die Passivsummen aus der Konsensmatrix, geordnet nach der Größe.

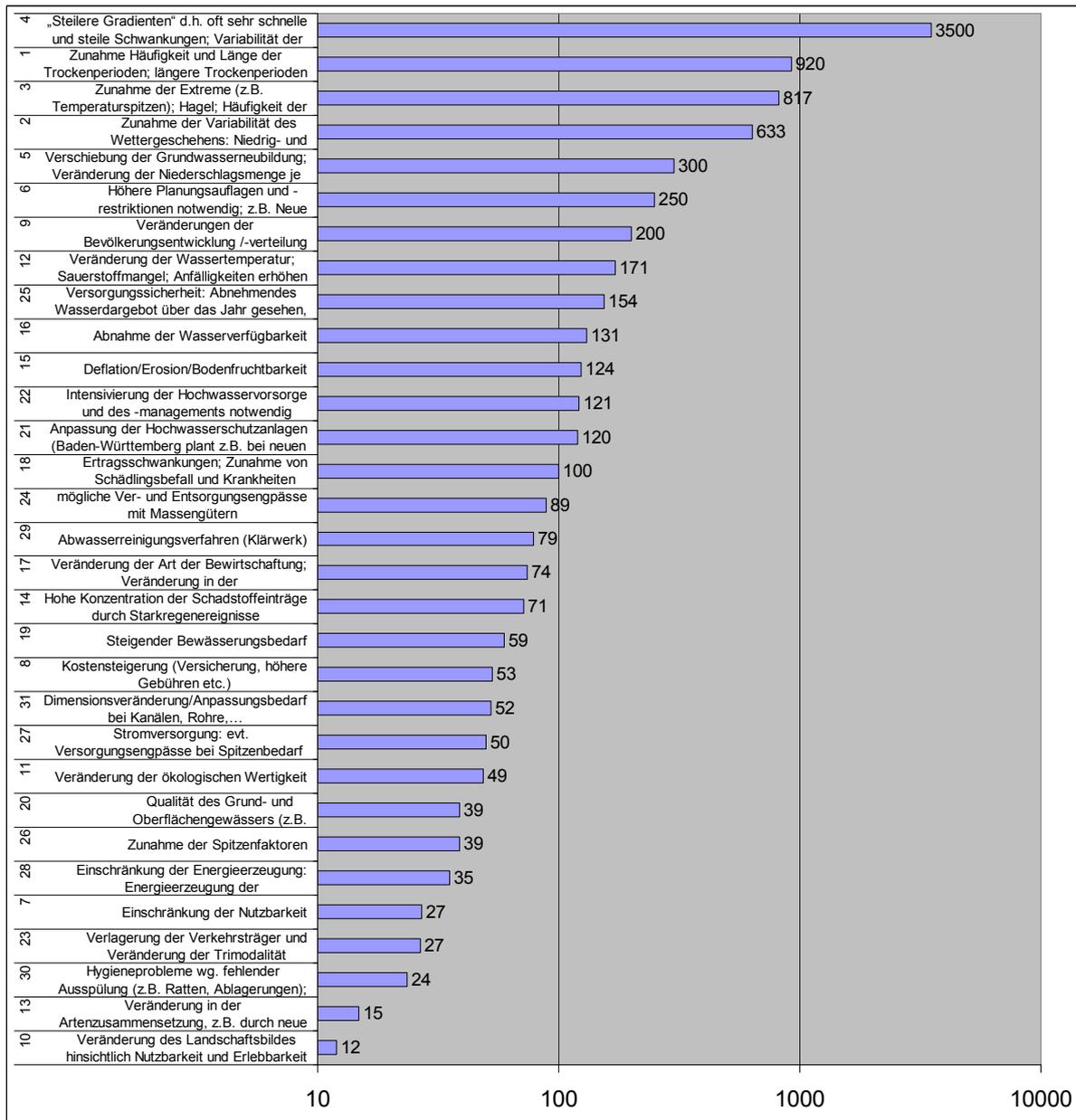


Abb. 54: Die Quotienten aus Aktivsumme geteilt durch Passivsumme aus der Konsensmatrix, geordnet nach der Größe.

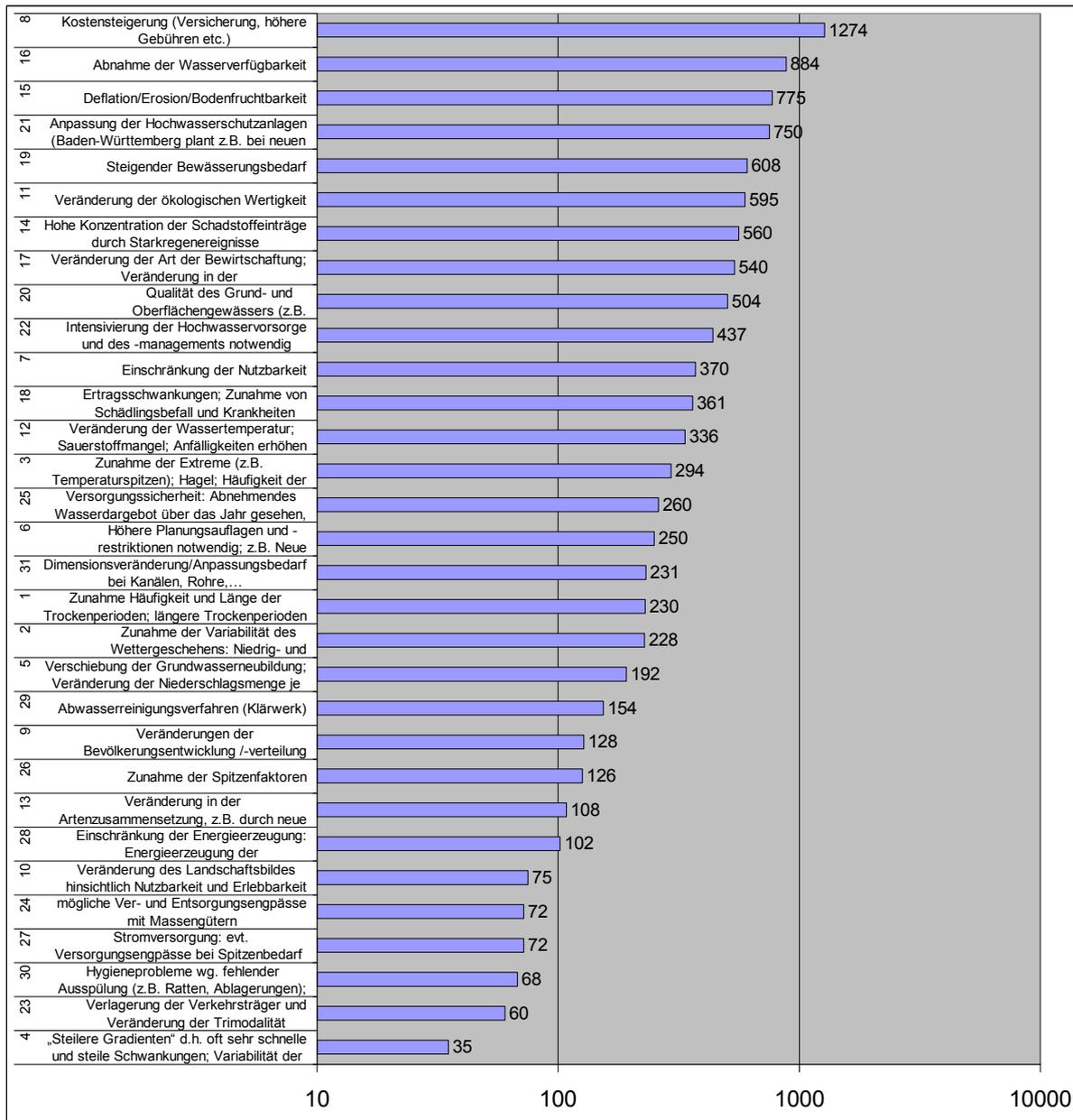


Abb. 55: Die Produkte aus Aktivsumme mal Passivsumme aus der Konsensmatrix, geordnet nach der Größe.



- hoher Anteil an Sonderkulturen (Wein-, Obst- und Gemüsebau)
- geringe Grundwasserneubildungsrate
- Erosion, topografische Vielfalt
- Starkniederschläge

*d. Energie- und Wasserversorgung, Abwasserentsorgung bzw. Stadtentwässerung*

Wasserversorgung

- gute Verbundmöglichkeiten
- Knappheit nutzbarer Ressourcen
- Dominanz durch Trinkwasserfernversorgung

Abwasserentsorgung

- hoher spezifischer Abwasseranteil
- hohe Spitzenfaktoren aufgrund von hohem Versiegelungsgrad

Energieversorgung

- Kühlwasserknappheit (MNQ)

Hochwasserschutz

- hohes Schadenspotential in Talauen wegen hoher Besiedlung/Bebauung in Neckarnähe

Nach den Experteneinschätzungen sind folgende Aspekte des Bereichs Wasser mit einem besonders hohen Risiko behaftet:

- hohes Hochwasserschadenspotential in Talauen wegen hoher Besiedlung/Bebauung in Neckarnähe
- hohe Spitzenfaktoren auf Grund von hohem Versiegelungsgrad
- steile Einzugsgebiete durch Topographie
- Kühlwasserknappheit
- Erosion
- Sonderkulturen (hoher Anteil an Wein-, Obst- und Gemüsebau)
- Grundwasser (geringes Dargebot)
- Neckarwassertemperatur

### **3.4. Fazit**

Die Ergebnisse zeigen zunächst, welche Faktoren als wirksame Schalthebel anzusehen sind. Dies sind nach Ansicht der Arbeitsgruppe die Veränderungen in der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen, das Sicherstellen der Wasserverfügbarkeit und die Intensivierung Hochwasservorsorge. Wirksame, aber auch kritische Schalthebel sind die Planungsaufgaben und die Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit. Als kritische Faktoren können die zu erwartenden Kostensteigerungen, der steigende Bewässerungsbedarf, die Qualität der Grund- und Oberflächengewässer, Veränderungen der ökologischen Wertigkeit, die Veränderung der Bevölkerungsentwicklung, Verschiebungen der Grundwasserneubildung und Veränderungen der Artenzusammensetzung angesehen werden.

Somit lässt sich die Konturen der Vulnerabilität der Region Stuttgart im Sektor „Wasser“ näher eingrenzen: es ist vor allem das enorme Hochwasserschadenspotential in Talauen aufgrund der dichten Besiedlung/Bebauung in Neckarnähe. Weitere wichtige Aspekte sind die hohen Spitzenfaktoren auf Grund der hohen Versiegelungsgrade und der topographisch bewegten Einzugsgebiete, die potenzielle

Kühlwasserknappheit in den Hauptgewässern, die Bodenerosion durch Starkniederschläge (ausführlich hierzu Abschnitt 2), das hohe Maß an Sonderkulturen (hoher Anteil an bewässerungsintensivem Wein-, Obst- und Gemüsebau), das geringe Dargebot an Grundwasser sowie die schon heute hohe Neckarwassertemperatur mit negativen Wirkungen auf die Aquafauna.

### **3.5. Empfehlungen für Folgeprojekte und -aktivitäten**

Abschließend ist festzustellen, dass die Arbeitsgruppe viele der oben skizzierten möglichen Klimafolgen sowie die Sensitivitäten wasserrelevanter Systeme bzw. Subsysteme nur überschlägig untersuchen konnten. Es wird daher empfohlen, dass die Akteure der Arbeitsgruppe anhand der vorliegenden Studie auf freiwilliger Basis für die weitere Bearbeitung zunächst die Themen weiter bearbeiten, die ihnen unter Würdigung der Aussagen der Studie am dringendsten erscheinen. Dieser Ansatz kann zielführend sein, wenn z.B. nur ein Sektor angesprochen ist. Daraus ergibt sich eine schrittweise Verfeinerung und Konkretisierung der Vulnerabilitätsanalyse mit sinnvollem Ressourceneinsatz. Der Verband Region Stuttgart sollte dabei die geeignete Plattform anbieten und ggf. auch für wissenschaftliche Unterstützung sorgen. Als konkretes Beispiel aus dem Bereich der Wasserversorgung wurden eine systematische Erhebung der verfügbaren ortsnahen Wasservorkommen sowie der Möglichkeiten des Bezugs von Fernwasser und das Zusammenspiel im Verbund bei extremen Hitzeperioden bereits während der Studie benannt. Die diesbezüglich aufzubereitenden Daten sollten dann zentral beim Verband der Region Stuttgart für interessierte Kreise zur Verfügung stehen.