

# Auswirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des Departements Bau, Verkehr und Umwelt

## Statusbericht



## Statusbericht

---

### Auswirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des BVU

---

#### Herausgeber, Leitung und Realisation

Departement Bau, Verkehr und Umwelt

#### Fachbeiträge

Paul Pfister BVU ARE  
Werner Leuthard BVU FE  
Philippe Baltzer BVU AfU  
Peter Kuhn BVU AfU  
Daniel Schaub BVU AfU  
Arno Stöckli BVU AfU  
Heinrich Zumoberhaus BVU AfU  
Peter Berner BVU ALG  
Urs Egloff BVU ALG  
Norbert Kräuchi BVU ALG  
Richard Maurer BVU ALG  
André Stapfer BVU ALG  
Markus Zumsteg BVU ALG  
Christina Spoerry BVU AVK  
Matthias Adelsbach BVU ATB  
Rolf H. Meier BVU ATB  
Heinz Kasper BVU AW  
Marcel Murri BVU AW  
Dominik Thiel BVU AW  
Maurus Büsser BVU GES  
Karin Ammon BVU GES  
Mathias Müller DRF AL

#### Redaktionsschluss

18. Dezember 2009

#### Konzept, Koordination, Fachbeiträge und Gesamtedaktion

Naturama Aargau, Bahnhofplatz, Postfach, 5001 Aarau  
Susanna Bohnenblust, Martin Bolliger, Herbert Bühl, Sara Koller, Andreas Wolf

#### Fotos Titelseite

Martin Bolliger, Naturama; 3. Bild, Thomas Baumann, Naturama

## Inhalt

Vorwort.....	5
Zusammenfassung .....	6
1 Einleitung.....	10
2 Zukünftige klimatische Änderungen Schweiz und Aargau.....	13
2.1 Temperatur .....	13
2.2 Niederschlag .....	15
2.3 Intensive Wetterereignisse .....	17
2.4 Veränderungen des Wasserkreislaufs .....	20
2.5 Hitzesommer 2003 .....	20
2.6 Zielsetzungen der Klimapolitik .....	21
3 Wichtigste Ursachen für den Klimawandel.....	23
3.1 Natürliche Faktoren .....	23
3.2 Anthropogene Faktoren.....	23
3.3 Der Treibhauseffekt.....	24
3.4 Rückkoppelungseffekte .....	26
4 Gewässer .....	28
4.1 Einleitung .....	28
4.2 Abflussregime und Abflussmengen .....	28
4.3 Entwicklung der Wassertemperaturen.....	29
4.4 Entwicklung des Niedrigwassers .....	30
4.5 Hochwasser .....	31
4.6 Hitzesommer 2003 .....	35
4.7 Auswirkungen des Klimawandels .....	36
4.8 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	42
5 Grundwasser und Wasserwirtschaft.....	43
5.1 Einleitung .....	43
5.2 Quellwasser .....	44
5.3 Lockergesteinsgrundwasser und hydrologische Regionen .....	44
5.4 Grundwasserqualität .....	47
5.5 Hitzesommer 2003 .....	48
5.6 Auswirkungen des Klimawandels .....	50
5.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	52
6 Luft .....	54
6.1 Einleitung .....	54
6.2 Gesamtschweizerische Emission von Treibhausgasen .....	54
6.3 Emissions- und Immissionssituation Kanton Aargau .....	55

6.4	Hitzesommer 2003 .....	59
6.5	Auswirkungen des Klimawandels .....	59
6.6	Entwicklung unabhängig vom Klimawandel .....	60
7	Wald .....	61
7.1	Einleitung .....	61
7.2	Entwicklung der Baumarten .....	61
7.3	Intensive Wetterereignisse .....	62
7.4	Biodiversität im Wald .....	63
7.5	Wald im Hitzesommer 2003 .....	64
7.6	Auswirkungen des Klimawandels .....	64
7.7	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	69
8	Jagd und Fischerei .....	70
8.1	Einleitung .....	70
8.2	Biologische Wirkung der Wassertemperatur .....	70
8.3	Schadorganismen .....	70
8.4	Wild .....	71
8.5	Hitzesommer 2003 .....	71
8.6	Auswirkungen Klimawandel .....	72
8.7	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	74
9	Biologische Vielfalt .....	75
9.1	Einleitung .....	75
9.2	Die Entwicklung der Biodiversität im 19. und 20. Jahrhundert .....	76
9.3	Biotope von nationaler Bedeutung .....	78
9.4	Invasive gebietsfremde Arten .....	79
9.5	Hitzesommer 2003 .....	81
9.6	Auswirkungen des Klimawandels .....	81
9.7	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	86
10	Energie .....	87
10.1	Einleitung .....	87
10.2	Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen .....	87
10.3	Energieverbrauch .....	87
10.4	Energieproduktion .....	88
10.5	Energieverbrauch und Energieproduktion im Hitzesommer 2003 .....	89
10.6	Auswirkungen des Klimawandels .....	89
10.7	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	92
11	Ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft .....	96
11.1	Einleitung .....	96
11.2	Wasserbedarf, Bewässerung .....	96
11.3	Biodiversität im Landwirtschaftsgebiet .....	98
11.4	Ausgewählte Aspekte zur Produktivität des Bodens .....	98

11.5	Auswirkungen des Klimawandels .....	98
11.6	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	101
12	Siedlungsentwicklung .....	102
12.1	Einleitung .....	102
12.2	Städtische Wärmeinseln.....	102
12.3	Hochwasser .....	102
12.4	Gebäude .....	103
12.5	Hitzesommer 2003 .....	103
12.6	Auswirkungen des Klimawandels .....	104
12.7	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	104
13	Verkehr .....	106
13.1	Strassen- und Schienenverkehr .....	106
13.2	Hitzesommer 2003 .....	106
13.3	Auswirkungen des Klimawandels .....	106
13.4	Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel .....	108
14	Handlungsfelder .....	109
15	Kosten des Klimawandels für die Volkswirtschaft.....	113
16	Anhang .....	115
16.1	Tabellarische Übersicht der wichtigsten Wirkungen des Klimawandels und entsprechenden Handlungsfelder mit Handlungsbedarf bereits heute .....	116
16.2	Liste der Aufgabenbereiche des BVU und betroffene Kapitel in diesem Bericht .	120
16.3	Verwendete Literatur .....	121
16.4	Klimamodelle und deren Aussagekraft, Vertiefung zu Kapitel 2.....	130
16.5	Liste der Verantwortungsarten im Kanton Aargau gemäss Kapitel 9 .....	132
16.6	Glossar.....	141

## **Vorwort**

### **„Falls es anders kommt, als man hofft“**

Die politische Debatte um die Themen Treibhausgase, Klimawandel und Energie ist rund um den Globus in vollem Gang. Während die einen die Welt zum dringenden Handeln aufrufen, sehen andere die Diskussion um schmelzende Gletscher und sich häufende Naturkatastrophen als aufgebauscht, wissenschaftlich nicht bewiesenen „Hype“.

Gut möglich, dass die Wahrheit irgendwo dazwischen liegt. Aber die Devise „Erstens kommt es anders und zweitens als man denkt“ eignet sich nur bedingt als Grundlage, um den klimapolitischen Anforderungen der Zukunft zu begegnen. Die Fragen, die es zu beantworten gilt – auch für die Kantone – sind vielschichtig: Welche Veränderungen kann ein allfälliger Klimawandel im Wasser, in der Luft, in der Vegetation verursachen? Welche Konsequenzen haben diese Veränderungen für die Gewässernutzung, die Waldbewirtschaftung, die Erzeugung und den Verbrauch von Energie, den Hochwasserschutz und nicht zuletzt für das Wohlbefinden von uns Menschen? Eines ist sicher: Sollte der Klimawandel dereinst restlos bewiesen werden, wird es bereits sehr spät sein, um Gegensteuer zu geben. Daher ist bestmögliches Vorausdenken und präventives – pragmatisches – Handeln heute so wichtig.

Das wollen wir auch mit dem vorliegenden Bericht tun. Er zeigt eine erste systematische Auslegeordnung der direkten und indirekten Folgen eines möglichen Klimawandels auf, vorab für die Aufgabenbereiche des Departements Bau, Verkehr und Umwelt und für ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft. Der erste Klimabericht ist also ein Blick in die Zukunft, weil der Kanton Aargau speziell von klimatischen Veränderungen betroffen ist – in seiner Rolle als Wasserschloss der Schweiz, als Auenland, als Energiekanton, als Waldkanton, als Kanton mit intensiver Landwirtschaft.

Zielführend in der Diskussion um den Klimawandel ist weder eine Katastrophenstimmung noch das Ignorieren naturwissenschaftlicher Grundlagen. Es geht vielmehr um das Zusammentragen von Erkenntnissen und das Abschätzen von Risiken als Basis für verantwortungsvolle Entscheide in relevanten staatlichen Aufgabenbereichen. Denn wer vorausschauend handeln will, muss sich auf bestmögliche Grundlagen stützen können, auch wenn diese noch nicht alle Sachverhalte zu beweisen vermögen. Es gilt in der Wirtschaft, in der Gesellschaft und im Umweltbereich die Weichen rechtzeitig zu stellen. Was rechtzeitig ist, wissen wir oft nicht im Voraus. Wir wollen uns aber so verhalten, dass wir unsere Aufgaben rechtzeitig gelöst haben. Nutzen wir also die Chance, um gemeinsam und zukunftsorientiert zu handeln.

Peter C. Beyeler  
Regierungsrat  
Vorsteher Departement Bau, Verkehr und Umwelt

## Zusammenfassung

### Klimawandel ist Realität

Seit Beginn der systematischen Messungen im Jahr 1864 ist es in der Schweiz auf der Alpennordseite im Jahresmittel um rund 1.3°C wärmer geworden. Im 20. Jahrhundert hat der Winterniederschlag nördlich der Alpen um 10 bis 30% zugenommen. Im Herbst und Winter sind intensive, ein bis fünf Tage andauernde, Niederschläge häufiger geworden.

Die heute gültigen und anwendbaren Klimamodelle prognostizieren bis 2050 im Vergleich zu 1990 eine weitere Temperaturerhöhung auf der Alpennordseite im Mittel von 2.7°C im Sommer und 1.8°C im Winter. Die mittleren Niederschläge nehmen im Winter um 8% zu und im Sommer um 17% ab, ebenfalls im Vergleich zu 1990. Hitzesommer, wie derjenige von 2003, und intensive Niederschläge im Winter nehmen tendenziell zu.

### Ursachen des Klimawandels

In der Erdgeschichte war das Klima immer einem Wandel unterworfen. Bis zur Entwicklung der sesshaften Zivilisation waren ausschliesslich natürliche Faktoren für den Klimawandel verantwortlich. Der Mensch beeinflusst das Klima mit Landnutzungsänderungen, welche den Strahlungshaushalt und den Wasserhaushalt an der Erdoberfläche verändern. Seit der Industrialisierung und dem damit verbundenen Einsatz von fossilen Brenn- und Treibstoffen hat der Ausstoss von so genannten Treibhausgasen einen massgebenden Einfluss auf das Klima.

### Auswirkungen des Klimawandels

Die Änderung klimatischer Parameter wie Temperatur und Niederschlag hat direkte Auswirkungen auf die natürlichen Systeme Wasser, Luft, Artenvielfalt oder Wald. Dadurch ist auch die menschliche Nutzung dieser natürlichen Systeme betroffen: Die Nutzung von Gewässern und Grundwasser, die Bewirtschaftung des Waldes, die Erzeugung und der Verbrauch von Energie, der Hochwasserschutz oder das Wohlbefinden in Gebäuden und Siedlungen angesichts wärmer werdender Sommer.

### Gewässer

Der bisher niedrige Abfluss der Flüsse Aare, Reuss, Limmat und Rhein im Winter nimmt zu und der typischerweise hohe Abfluss im Sommer mit einer Abflussspitze während der Schneeschmelze nimmt ab. Die gesamte Abflussmenge wird bis 2050 um ca. 10% abnehmen. Von Bedeutung für den Aargau als Wasserschloss der Schweiz ist die prognostizierte Zunahme von häufigeren und höheren Hochwasserspitzen im Winter. Relevant ist auch die Niedrigwassersituation bei Bächen im Sommer. Trocken-warme Sommer wie der Hitzesommer 2003 werden voraussichtlich häufiger. Dabei spitzen sich Nutzungskonflikte zu. Direkt betroffen ist der Fischbestand.

### Grundwasser und Wasserwirtschaft

Ver mehrt trocken-heisse Sommer in kurzen Zeitabständen können dazu führen, dass sich Grundwasserspiegel in Tälern mit Bächen nicht mehr genügend erholen und die Förderung

von Grundwasser teilweise eingeschränkt wird. In Trockenjahren sind auch Quellen mit kleinen und verkarsteten Einzugsgebieten besonders gefährdet zu versiegen. Der Netzverbund von Trinkwasserversorgungen ist in diesen Situationen besonders relevant. Bei intensiven Niederschlägen im Anschluss an lange Trockenperioden kann es im unteren Aaretal, im Bünztal und im Suhrental bei intensiv landwirtschaftlich genutzten Zuströmbereichen von Trinkwasserfassungen innerhalb weniger Monate zu starken Anstiegen der Nitratkonzentration im Grundwasser kommen, sofern keine Massnahmen ergriffen werden.

#### Luft

Die Folgen des Klimawandels für die Immissionssituation von Luftschadstoffen im Kanton Aargau sind gemäss heutigem Wissensstand noch schwer abzuschätzen. In künftig vermehrt auftretenden trocken-heissen Sommern ist die Ozonkonzentration voraussichtlich nach wie vor erhöht. Im Winter könnte es zu einer Verbesserung der lufthygienischen Situation kommen, weil möglicherweise die austauscharmen Wetterlagen abnehmen.

#### Wald

Die Baumartenzusammensetzung im Aargauer Wald wird sich infolge des Klimawandels verändern. Es wird in der kollinen und submontanen Stufe eine Entwicklung vom Buchen zum Eichen-Hainbuchenwald und zum Eichenwald prognostiziert. Für die nicht standortgerechte aber forstwirtschaftlich wichtige Fichte wird die Situation mit zunehmender Temperatur prekär. Die Geschwindigkeit dieser Entwicklungen ist schwer abschätzbar. Das Baumwachstum wird einerseits durch die längere Vegetationsperiode und höhere Temperaturen gefördert. Andererseits ergeben sich in trocken-heissen Sommern vermehrt Stresssituationen für Bäume und eine grössere Anfälligkeit für Schadorganismen. Künftig von Bedeutung ist die Entwicklung der Schadorganismen. Trockenheit fördert Rinden- und Wurzelkrankheiten. Mehr Trocken- und Hitzeperioden sowie Stürme führen vermehrt zu Massenvermehrungen von Borkenkäfern.

#### Fischerei und Jagd

Die prognostizierte Erwärmung führt zu einem Anstieg der Wassertemperaturen, was wärmeliebende Fischarten fördert und möglicherweise eine grössere fischereiliche Nutzung ermöglicht. Auf der anderen Seite werden kälteliebende Fischarten gefährdet. Insbesondere in vermehrt auftretenden trocken-heissen Sommern sind die Fische Stresssituationen ausgesetzt, was zu Fischsterben führen kann.

Die Schwarzwildbestände bleiben hoch oder nehmen sogar weiter zu, weil mit der Klimaerwärmung regulierende harte Winter seltener werden.

#### Biologische Vielfalt

In der Summenbetrachtung könnte sich im Aargau ein klimabedingter Anstieg der Artenvielfalt ergeben, solange die neuen einwandernden Arten die einheimischen Arten nicht verdrängen. Allerdings sind die Verluste stärker zu gewichten, da viele der durch den Klimawandel gefährdeten Arten weltweit gefährdet sein werden, weil sich ihr Verbreitungsgebiet verkleinert. Konkrete Verluste sind im Aargau beispielsweise bezüglich der alpinen Felsenflora im Jura zu erwarten. Von Bedeutung ist die teilweise auf den Klimawandel zurückführende Einwanderung und rasche Verbreitung invasiver fremder Arten, welche zu einer Verarmung

der Artenvielfalt beiträgt. Weitere wichtige Gefährdungsfaktoren für die Artenvielfalt sind aber weiterhin klimaunabhängiger Natur, wie die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur oder der landwirtschaftlichen Nutzung.

#### Energie

Die Verwendung von Brennstoffen vor allem für das Heizen von Gebäuden in der Industrie, im Dienstleistungssektor und bei den Haushalten trägt zur Hälfte zu den schweizerischen Treibhausgasemissionen bei. Deshalb tragen Effizienzsteigerungen und der Einsatz CO<sub>2</sub>-armer Energien in Gebäuden auch zur Reduktion des Ausstosses von Treibhausgasen bei. Beim Energieverbrauch reduziert sich längerfristig im Winter der Heizenergiebedarf klimabedingt, während im Sommer die Nachfrage nach Kühlenergie steigt. Insgesamt resultiert eine leichte Verbrauchsreduktion bei der Summe von Heiz- und Kühlenergie. Heutige Schätzungen gehen davon aus, dass die mittlere Abflussmenge von Flüssen längerfristig abnimmt und damit die Stromproduktion der Flusskraftwerke bis 2050 um 7% abnehmen könnte. Ausserdem werden häufigere und teilweise grössere Hochwasser zu bisher nicht quantifizierbaren Produktionseinbussen führen. Mit der reduzierten Stromproduktion wird auch ein leichter Rückgang der Erträge bei den Wasserzinsen verbunden sein, sofern von heutigen Ansätzen ausgegangen wird. Bei den erneuerbaren Energien Wind-, Holz- und Solarenergie sind die direkten Auswirkungen des Klimawandels auf die Energieproduktion mehrheitlich unklar.

#### Ausgewählte Aspekte in der Landwirtschaft

Mit dem Klimawandel werden sich die Flächen mit Trockenheitsrisiko auch im Aargau ausweiten. Damit steigt die Nachfrage nach Bewässerung. Betroffen sind wasserbedürftige Kulturen wie Kartoffeln und Gemüse, aber auch Mais und Getreide. Durch den erhöhten Wasserbedarf, auch von anderen Akteuren, bei gleichzeitiger Abnahme des Wasserdargebots entstehen bei Bächen neue Wassernutzungskonflikte oder werden bestehende verschärft.

#### Siedlungsentwicklung

Die klimabedingt häufigeren und höheren Hochwasserspitzen im Winter haben einen Einfluss auf die Siedlungsentwicklung. Denn vor allem auch mit raumplanerischen Massnahmen kann ein weiterer Anstieg des Schadenpotenzials durch Hochwasser verhindert werden. Beispielsweise können Baubewilligungs- und Nutzungsplanungsverfahren in gefährdeten Gebieten zu Auflagen führen. Für Rückhalteräume und Abflusskorridore im Ereignisfall (Überlastfall) sind genügend Flächen erforderlich, welche möglichst frei von Bauten und Anlagen sind. Der Klimawandel verstärkt zusammen mit der baulichen Verdichtung den Effekt der so genannten städtischen Wärmeinseln und damit die Wärmebelastung in den Siedlungen. Die heutige Siedlungsentwicklung und Gestaltung der Freiräume hat einen Einfluss auf die künftige Wärmebelastung und damit auch auf die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen. Deshalb sind Massnahmen zur Kühlung in und an Gebäuden sowie bei öffentlichen Freiräumen, wie Begrünungen und Beschattungen von Bedeutung.

#### Verkehr

Von den schweizerischen Treibhausgasemissionen 2007 entfallen knapp 32 Prozent der CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf die Verwendung von Treibstoffen im Verkehr. Es wird längerfristig mit einem steigenden Anteil an Hybrid- und Elektroautos am Fahrzeugpark gerechnet. Dabei

stellt sich die Frage, wie diese Entwicklung die heutige und künftige Verkehrsplanung und Verkehrsinfrastruktur beeinflusst.

#### Handlungsfelder

Die wichtigsten Handlungsfelder, soweit bereits heute Handlungsbedarf und Handlungsmöglichkeiten bestehen, betreffen das Hoch- und Niedrigwasser, die Wasserversorgung, den Wald, die biologische Vielfalt, Gebäude und die Siedlungsentwicklung sowie die Treibhausgasemissionen aus dem Verbrauch von Brenn- und Treibstoffen. Das regionale und kantonsübergreifende Hochwassermanagement ist weiter zu entwickeln. Das Niedrigwassermanagement für Bäche in trocken-heissen Sommern ist auszubauen. Die Wasserversorgung ist über einen konsequenten Netzverbund langfristig zu sichern und die Risiken für die Gefährdung der Grundwasserqualität müssen minimiert werden. Weiter sind klimabedingte Risiken im Wald durch eine dem Standort angepasste Baumartenwahl, hoher Diversität und naturnahem Waldbau zu mindern. Im Hinblick auf die künftige Artenvielfalt sind Lebensräume weiter zu vernetzen bei gleichzeitiger Bekämpfung von invasiven gebietsfremden Arten. In der Siedlungsentwicklung und Gestaltung der Bauten sind die Auswirkungen des Klimawandels stärker einzubeziehen.

Auf kantonaler Ebene geht es darum, die nationalen und internationalen Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu unterstützen und Massnahmen, welche die kantonale Ebene betreffen umzusetzen. Beispielsweise kommen mit der konsequenten Umsetzung des Förderinstruments „Das Gebäudeprogramm“ des Bundes auf kantonaler Ebene auch erneuerbare, CO<sub>2</sub>-arme Energien im Gebäudebereich zur Anwendung.

Bei vielen Reduktions- und Anpassungsmassnahmen können Synergien genutzt werden. So beispielsweise in der Energiepolitik, weil die Förderung erneuerbarer Energien auch zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beiträgt, beim Hochwasserschutz und Auenschutz, weil Auen wichtige Hochwasserrückhalteräume sind, bei Frischluftkorridoren und ökologischen Korridoren in Siedlungen, weil der Effekt der städtischen Wärmeinseln gemildert und gleichzeitig die Vernetzung ökologisch wertvoller Lebensräume von Tieren und Pflanzen gefördert werden.

Angesichts des weltweit steigenden Wohlstands bei beschränkten Ressourcen und konkreter Herausforderungen im Energiebereich sind auch unabhängig vom Klimawandel massive Energie-Effizienzsteigerungen und die Substitution fossiler Brennstoffe unabdingbar. Auf dem Weg zu einer Niedrigenergiegesellschaft und der Entkarbonisierung der Energie sind alle Akteure gefordert: Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Konsumenten. Insbesondere der technologischen Entwicklung kommt eine grosse Bedeutung zu. Auch hier ist es unabhängig vom Klimawandel für die Schweiz und den Aargau im Hinblick auf die künftige Wettbewerbsfähigkeit wichtig, in der technologischen Entwicklung vorne dabei zu sein.

Sowohl die Reduktion der Treibhausgasemissionen wie auch Anpassungsmassnahmen sind mit Kosten verbunden. Eine aktuelle Studie des Beratungsunternehmens McKinsey zeigt, dass mit Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen längerfristig Kosten gespart werden können.

## 1 Einleitung

Kanton Aargau ist betroffen

Der Kanton Aargau ist in verschiedener Hinsicht von klimatischen Veränderungen betroffen. Der Aargau ist das Wasserschloss der Schweiz, indem sich vier grosse Alpenflüsse vereinigen. Entsprechend weist er grosse Talauen auf (Auenland Aargau). Der Aargau ist ein Energiekanton, ein walddreicher Kanton und ein Kanton mit intensiver Landwirtschaft. Gleichzeitig ist aber zu beachten, dass verschiedenste Entwicklungen, nicht nur klimatische, auf Natur, Landschaft, Gewässer, Siedlungen und Infrastrukturen im Aargau wirken. Beispielsweise sind die aktuelle und künftige Landnutzung und Siedlungsausbreitung für die Entwicklung der Artenvielfalt genauso von Bedeutung wie klimatische Änderungen.

Zielsetzungen des Berichts: Systematische Auslegeordnung der direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels

Ziel des Berichts ist eine systematische Analyse möglicher Wirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des BVU. Er dient als Grundlage für die künftige Ausrichtung, Ausgestaltung und Umsetzung von Programmen und Massnahmen in Bereichen wie Raumentwicklung, Natur- und Landschaftsschutz, Gewässerschutz, Hochwasserschutz, Waldentwicklung, Energie, etc. Klimawandel wird nicht einseitig als Bedrohung verstanden, sondern als Aufgabe positive und negative Veränderungen frühzeitig zu erkennen und Handlungsfelder zu identifizieren.

Inhaltliches Ziel ist die Analyse und Beurteilung der direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des BVU sowie auf ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft. Der Einbezug der landwirtschaftlichen Aspekte Produktivität des Bodens, Wasserbedarf und biologische Vielfalt auf den landwirtschaftlichen Flächen über die Aufgabenbereiche des BVU hinaus, wird mit deren starken, raumrelevanten Verknüpfung mit den Themen Wasserkreislauf, Natur- und Landschaftsschutz und Bodenschutz begründet. Die klimarelevanten Themenkreise landwirtschaftliche Produktion, Gesundheit, Tourismus-Freizeit sowie Auswirkungen auf die Wirtschaft werden nicht beleuchtet, da diese ausserhalb der Aufgabenbereiche des BVU liegen.

Grundlagen für die Erarbeitung

Der vorliegende Bericht stützt sich bezüglich den prognostizierten klimatischen Veränderungen und möglichen Folgen grundsätzlich auf die Publikation des Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung (OcCC) / ProClim – Forum for Climate and Global Change vom März 2007. Weitere ausgewählte Literatur wurde konsultiert. Es hätte den Rahmen des vorliegenden Berichts gesprengt, systematisch wissenschaftliche Primär- und Sekundärliteratur auszuwerten. Ebenso können nie alle Annahmen, welche hinter jeder Aussage stecken diskutiert werden. Die Transparenz soll aber immer gewährleistet werden, indem die Quelle der Aussage (verwendete Literatur, Fachwissen aus der Verwaltung, eigene Berechnung, etc.) offengelegt wird.

### Betrachtungshorizont und Unsicherheiten

Betrachtungshorizont ist analog der Publikation des Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung das Jahr 2050. Aussagen in so weiter Zukunft sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet.

Bei den Aussagen zum künftigen Klima in der Schweiz lassen sich Unsicherheiten bezüglich des physikalischen Verständnisses und damit bezüglich der Modelle als Wahrscheinlichkeitsverteilung oder Bandbreite darstellen. Damit wird aufgezeigt mit welcher Wahrscheinlichkeit ein prognostizierter Wert eintreffen wird. Mit der Verfügbarkeit von künftigen Modellen dürften die Berechnungen in naher Zukunft noch verbessert werden. Die Unsicherheitsbereiche können aber sowohl eingeschränkt als auch vergrössert werden, z.B. wenn durch die Entdeckung von bisher vernachlässigten Prozessen neue Unsicherheiten auftauchen.

Bezüglich den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des BVU sind die Unsicherheiten noch erheblich grösser. Gemäss OcCC 2007 werden „die Auswirkungen der Klimaänderung im Jahr 2050 (werden) überlagert sein von sozioökonomischen und politischen Veränderungen, die sich kaum abschätzen lassen. Um die damit verbundenen Schwierigkeiten und Unsicherheiten zu verdeutlichen, genügt die Überlegung, wie sich ein Mensch im Jahr 1950 das Leben in unserem Land heute vorgestellt hätte“. Wo möglich wird deshalb ein Spektrum der Wirkungen, basierend auf den Bandbreiten der klimatischen Prognosen, aufgezeigt. Als Referenz kann vielfach der Hitzesommer 2003 herangezogen werden.

Angesichts unvermeidlicher Unsicherheiten kann mit dem Bericht zum Klimawandel nicht prognostiziert werden, was genau bis 2050 passieren wird und wie man handeln muss. Vielmehr kann aufgezeigt werden, was aus heutiger Sicht passieren und wie man aus heutiger Sicht handeln könnte. Es geht also vor allem darum, aufzuzeigen, wo man künftig genau hinschauen muss, um Risiken und Chancen frühzeitig zu erkennen, handlungsfähig zu werden und allfällige Massnahmen einleiten zu können. Weiter können Wissenslücken aufgezeigt werden.

Was die Ursachen des Klimawandels anbelangt, so können diese kaum auf einen einzigen Grund zurückgeführt werden. Es besteht in der Forschung zum Klimawandel jedoch ein breiter Konsens, dass den Treibhausgasen dabei eine bedeutende Rolle zukommt. Es würde aber wiederum den Rahmen des vorliegenden Berichts sprengen, aktuelle wissenschaftliche Literatur zu den Ursachen des Klimawandels systematisch auszuwerten und vergleichend zu diskutieren. Die schweizerischen und aargauischen Treibhausgasemissionen, ihre Quellen und die klimapolitischen Zielsetzungen werden im Bericht beschrieben.

### Vorgehen

Der Bericht basiert im Wesentlichen auf einem Literatur- und Datenstudium und der Diskussion mit den betroffenen Abteilungsleitenden und Fachleuten. Das Naturama hat einfache Berechnungen vorgenommen, jedoch keine neuen Daten erhoben und es werden keine aufwändigen Analysen – wie beispielsweise quantitative Modellierungen – durchgeführt. Die Ergebnisse werden weitgehend verbal-argumentativ dargestellt.

### Aufbau des Berichts

In einem ersten Schritt werden die Prognosen für die einzelnen Klimaparameter wie Temperatur und Niederschlag bis 2050 dargelegt sowie die Ursachen des Klimawandels beschrieben (Kapitel 2 und 3). Dann werden die Wirkungen des Klimawandels in den Aufgabenbereichen des BVU analysiert und abgeschätzt (Kapitel 4 – 13). Schliesslich werden wesentliche Handlungsfelder und weiterer Abklärungsbedarf aufgezeigt sowie Studien zu den Kostenfolgen zitiert (Kapitel 14 und 15 ). Der Anhang umfasst unter anderem eine tabellarische Zusammenfassung der wichtigsten Auswirkungen und Handlungsfelder, eine Liste der verwendeten Literatur sowie ein Glossar.

## 2 Zukünftige klimatische Änderungen Schweiz und Aargau

### 2.1 Temperatur

#### 2.1.1 Temperaturentwicklung seit dem 19. Jahrhundert

Die mittlere globale Temperatur ist seit dem späten 19. Jahrhundert um rund 0.8° C angestiegen. In der Schweiz ist die Erwärmung, wie in anderen kontinentalen Gebieten, stärker als im globalen Mittel. Seit Beginn der systematischen Temperaturmessungen in der Schweiz im Jahr 1864 ist es auf der Alpennordseite um rund 1.3° C wärmer geworden (MeteoSchweiz, PLANAT 2007).

#### 2.1.2 Temperaturentwicklung im 21. Jahrhundert

Im 21. Jahrhundert wird ein weiterer Temperaturanstieg prognostiziert. Aus Modellierungen des künftigen Klimas (siehe Infobox 1 und 2 sowie PRUDENCE-Studie Anhang 16.4) resultieren Angaben einzelner Klimaparameter für die Jahre 2030, 2050 und 2070. Das OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung) wählt aus dieser Studie den Zeitpunkt 2050 als Grundlage für ihre Wirkungsanalysen, weil dann alle globalen Klimaszenarien des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) bezüglich der prognostizierten Erwärmung noch relativ eng beieinander liegen. Ohne die verschiedenen Emissionsszenarien einzeln zu berücksichtigen, kann man so die Auswirkungen des Klimawandels diskutieren. Zudem ist der Zeitpunkt 2050 in relativ naher Zukunft, den die Generationen unter 40 noch erleben werden.

#### **Infobox 1: Klimamodelle**

"Mit einem Klimamodell lässt sich am Computer ein virtuelles irdisches Klima simulieren, das auf den bekannten Gesetzmässigkeiten und Rahmenbedingungen unseres Planeten basiert und die realen Prozesse und Zustände wie Wind, Temperatur und Niederschlag zahlenmässig ausdrückt." "Klimamodelle sind ein stark vereinfachtes Abbild der Realität." (Paeth 2007)

#### **Infobox 2: Klima und Wetter**

Unter dem Klima versteht man die Gesamtheit der typischen Wetter- oder Witterungsabläufe in einer Region über mehrere Jahrzehnte (z.B. 30 Jahre). Damit betrachtet man eine langfristige Mittelung der Wetterbedingungen. Der Begriff Wetter beschreibt den momentanen kurzzeitigen Zustand der Atmosphäre (Meteo Schweiz, ab Internet).

In der Abbildung 1 ist die erwartete Temperaturentwicklung auf der Alpennordseite für die Jahre 2030, 2050 und 2070 gegenüber 1990 dargestellt. In den Berechnungen für diese

Szenarien sind keine politischen Emissionsreduktionsmassnahmen berücksichtigt, wie beispielsweise die Umsetzung des Kyoto-Protokolls. Die erwartete Erwärmung des Klimas wird aber bis 2050 weitgehend unabhängig von weltweiten Massnahmen zur Verminderung des Treibhausgas-Ausstosses verlaufen, da sich diese, wegen der langen Verweildauer der Gase in der Atmosphäre, erst längerfristig auswirken werden (OcCC 2007).

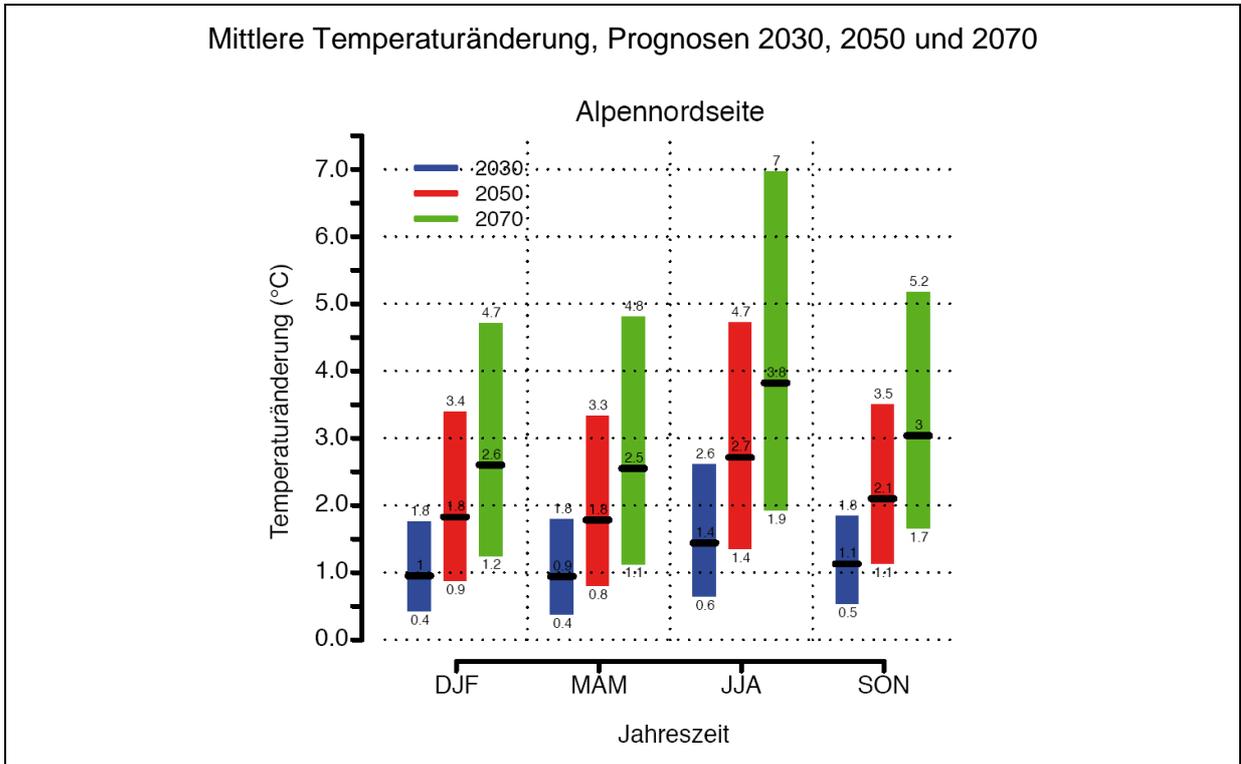


Abbildung 1: Mittlere Temperaturänderung gegenüber 1990 im Winter (DJF: Dezember bis Februar), im Frühling (MAM: März bis Mai), im Sommer (JJA: Juni bis August) und im Herbst (SON: September bis November) auf der Alpennordseite. Der fette schwarze Strich gibt den Median (mittlere Schätzung) an, der Balken bezeichnet das 95%-Konfidenzintervall (mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% treffen die Temperaturänderungen innerhalb dieses Rahmens ein), (OcCC 2007).

JAHRESZEIT	WAHRSCHEINLICHKEITEN		
	0.025	0.5	0.975
Dez/Jan/Feb	+0.9°C	<b>+1.8°C</b>	+3.4°C
März/Apr/Mai	+0.8°C	<b>+1.8°C</b>	+3.3°C
Juni/Juli/Aug	+1.4°C	<b>+2.7°C</b>	+4.7°C
Sept/Okt/Nov	+1.1°C	<b>+2.1°C</b>	+3.5°C

Tabelle 1: Mittlere Temperaturänderungen auf der Alpennordseite für das Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990. Aufteilung nach den Jahreszeiten und dem 95%-Konfidenzintervall (mit der Wahrscheinlichkeit von 95% trifft eine Erwärmung zwischen der unteren Begrenzung in der Spalte 0.025 und der oberen Begrenzung in der Spalte 0.975 ein). Die Spalte 0.5 stellt den Median (mittlere Schätzung) dar. (OcCC 2007)

Aus der Tabelle 1 und der Abbildung 1 wird ersichtlich, dass bis 2050 mit durchschnittlich 2.7°C die stärkste Erwärmung im Sommer erwartet wird. Im Winter soll im Mittel eine Erwär-

mung von 1.8°C erfolgen. In einem ähnlichen Rahmen liegen auch die Werte für die Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst. Die Bandbreite der möglichen Erwärmung wird immer grösser je weiter der Blick in die Zukunft reicht. Die Erwärmung in den nächsten 20 bis 30 Jahren ist umgekehrt vergleichbar mit der Abkühlung während der so genannten kleinen Eiszeit, die etwa vom 15. Jahrhundert bis Mitte 19. Jahrhundert herrschte. Damals lagen die Temperaturen auf der gesamten Nordhalbkugel um 1 bis 2°C unter dem heutigen Wert. Es wird überliefert, dass zu dieser Zeit der Bodensee im Winter zeitweise mit einer dicken Eisschicht bedeckt war, die Alpengletscher stark vorstießen und das Meerwasser drei bis vier Grad kälter war als heute (Häckel 1999).

Um sich ein Bild vom künftigen Klima machen zu können, werden die Klimaszenarien für verschiedene Stationen von Meteo Schweiz mit den heutigen Messwerten der Stationen verglichen (OcCC 2007). Für die Stadt Zürich ergeben sich bei einer schwachen Erwärmung bis 2050 Übereinstimmungen mit den heutigen Verhältnissen in Sion (VS), bei einer mittleren Erwärmung sind die Temperaturen vergleichbar mit den Messungen in Magadino (TI) und bei einer starken Erwärmung werden sich die Bedingungen dem heutigen Verlauf von Turin (Torino, Italien) annähern. Ein anderes Beispiel: In Basel werden sich die Temperaturen bis 2050 bei einer schwachen Erwärmung den heutigen Verhältnissen von Grono (GR) angleichen, bei einer mittleren Erwärmung sind sie vergleichbar mit dem heutigen Verlauf in Lugano und bei einer starken Erwärmung nähern sich die zukünftigen Temperaturen denjenigen von Verona (Italien) an. Diese Vergleiche betreffen nur charakteristische Temperaturmessungen an den Messstationen. Weitere Parameter, die ein lokales Klima ausmachen, wie beispielsweise der Niederschlag, sind nicht berücksichtigt, weil diese stark von der Topografie abhängig sind. Aber auch die Temperatur ist stark geprägt von der Topografie, der geografischen Lage und anderen Faktoren, so dass der Vergleich mit Vorsicht zu interpretieren ist (OcCC 2007).

## 2.2 Niederschlag

### 2.2.1 Niederschlagsentwicklung im 20. Jahrhundert

Im 20. Jahrhundert hat die Summe der Jahresniederschläge auf der Alpennordseite um 120 mm zugenommen, was einer Zunahme von 8% entspricht. Die mittleren Winterniederschläge im nördlichen und westlichen Alpenraum haben um 20 bis 30% zugenommen. Auch haben im Herbst und Winter in weiten Teilen des Mittellandes intensive Tagesniederschläge und zwei bis fünf Tage andauernde intensive Niederschläge zugenommen. Dieser Trend widerspiegelt sich nicht in den Abflusssummen der Oberflächengewässer. Sie sind im Jahresmittel in etwa gleich geblieben, da durch die Erwärmung im 20. Jahrhundert auch die Verdunstung angestiegen ist. Der Anstieg der Verdunstung beträgt 105 mm, was einer Zunahme von 23% entspricht. Der jährliche Abfluss von Gletscherschmelzwasser entspricht etwa 12 mm Niederschlag, der zusätzlich zum Niederschlags-Abfluss hinzukommt (OcCC 2007).

### 2.2.2 Niederschlagsentwicklung im 21. Jahrhundert

Mitte des 21. Jahrhunderts wird auf der Alpennordseite im Winter sehr wahrscheinlich eine Zunahme (zwischen -1% und +21%) der Niederschläge erwartet und im Sommer eine Abnahme (zwischen -31% und -7%), wie in der Abbildung 2 und der Tabelle 2 dargestellt. Im Frühling ist, wenn es überhaupt eine Veränderung gibt, eine Entwicklung in beide Richtungen möglich (zwischen -11% und +10%) und im Herbst ist mit einer Abnahme (zwischen -14% und -1%) der Niederschläge zu rechnen (OcCC 2007).

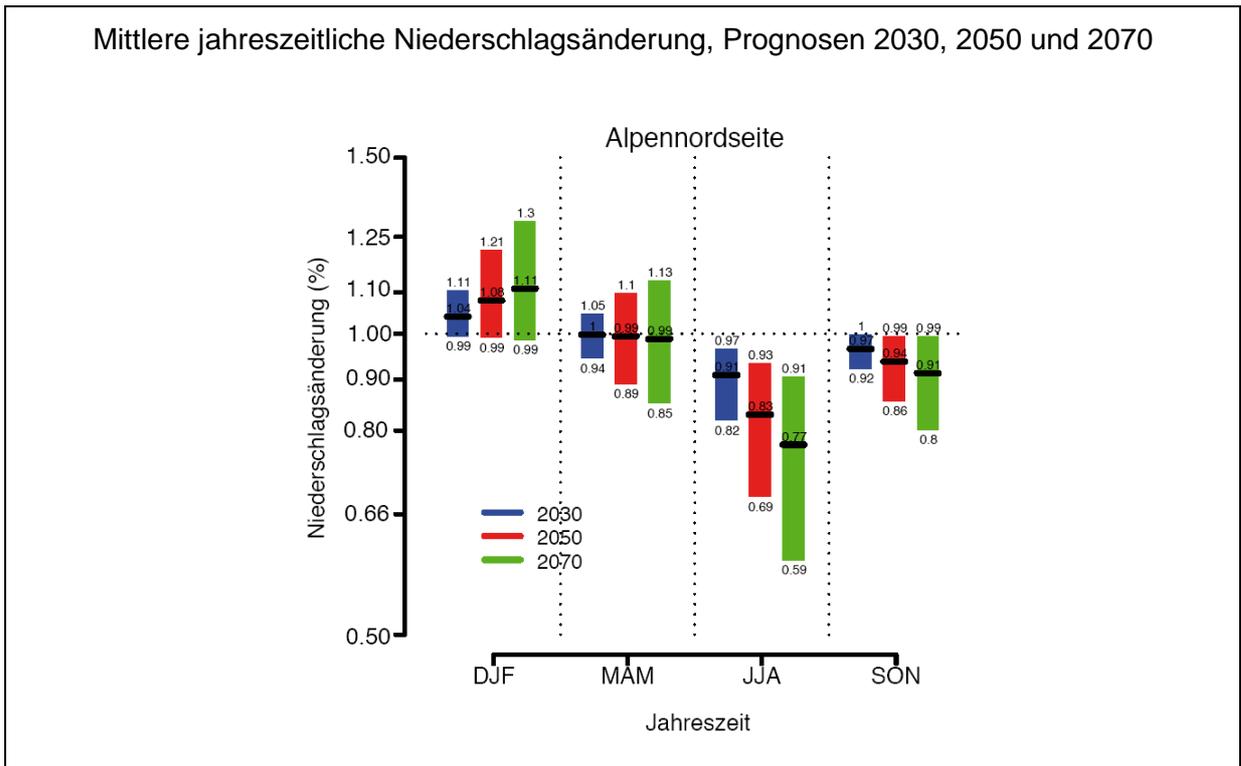


Abbildung 2: Mittlere jahreszeitliche Niederschlagsänderung auf der Alpennordseite (logarithmische Skala). Jahreszeiteinteilung siehe Abbildung 1. Der fette schwarze Strich gibt den Median an, der Balken bezeichnet das 95%-Konfidenzintervall (OcCC 2007).

JAHRESZEIT	WAHRSCHEINLICHKEITEN		
	0.025	0.5	0.975
Dez/Jan/Feb	-1%	<b>+8%</b>	+21%
März/Apr/Mai	-11%	<b>0%</b>	+10%
Jun/Jul/Aug	-31%	<b>-17%</b>	-7%
Sept/Okt/Nov	-14%	<b>-6%</b>	-1%

Tabelle 2: Niederschlagsänderungen auf der Alpennordseite für das Jahr 2050 im Vergleich zu 1990. Aufteilung nach Jahreszeiten und dem 95%-Konfidenzintervall (0.025 – 0.975) mit der Angabe des Medians (0.5). (OcCC 2007)

Die Wetterstation Aarau-Buchs von Meteo Schweiz misst heute ein Niederschlagsmaximum im Sommer und ein Niederschlagsminimum im Winter (Meteo Schweiz, ab Internet). Durch

die prognostizierten Niederschlagsverschiebungen werden sich die jahreszeitlichen Niederschlagssummen im 21. Jahrhundert angleichen.

## 2.3 Intensive Wetterereignisse

### 2.3.1 Entwicklung der intensiven Wetterereignisse im 20. Jahrhundert

Extremereignisse, welche beispielsweise grosse Schäden anrichten, sind vergleichsweise selten (vgl. Infobox 3). Ein statistischer Nachweis einer Veränderung der Auftretenshäufigkeit von Extremereignissen kann deshalb erst nach vielen Jahrzehnten erbracht werden. In der Schweiz lassen sich bis jetzt keine systematischen Veränderungen bei seltenen Extremereignissen nachweisen. Im Gegensatz dazu stellt man bei intensiven Wetterereignissen, systematische Veränderungen fest. Beispielsweise hat im Herbst und Winter die Häufigkeit intensiver Niederschläge während des 20. Jahrhunderts deutlich zugenommen (MeteoSchweiz, PLANAT 2007).

#### **Infobox 3: Extremereignis, intensives Ereignis, Naturkatastrophe und Naturgefahr**

"Extremereignisse – beispielsweise die Hitze- und Trockenperiode 2003 – sind Wetter- und Naturereignisse, die stark von einem langjährigen Durchschnitt abweichen. Extremereignisse können gewaltige Schäden anrichten."

"Weil Extremereignisse sehr selten sind, ist es grundsätzlich schwierig oder sogar unmöglich, einen Trend in ihrer Häufigkeit statistisch gesichert nachzuweisen oder auszuschliessen". "Im Gegensatz dazu sind statistische Aussagen über Trends bei den häufigeren intensiven Ereignissen besser möglich." Auch so genannt intensive Ereignisse können mit Schäden verbunden sein.

"Von Naturkatastrophen spricht man, wenn die Bewältigung des Schadens die Kräfte der betroffenen Bevölkerung übersteigt."

"Naturgefahren sind natürliche Prozesse und Zustände, die Gesellschaft und Umwelt bedrohen." (OcCC 2003).

### 2.3.2 Entwicklung der intensiven Wetterereignisse im 21. Jahrhundert

Es wird angenommen, dass sich die intensiven Wetterereignisse durch den Klimawandel verändern werden. Die Veränderungen sind wahrscheinlich regional unterschiedlich und darum für die heutigen Klimamodelle nur näherungsweise detektierbar. Es bestehen grosse Unsicherheiten über die Entwicklung von Häufigkeit und Intensität der intensiven Wetterereignisse. Im Folgenden werden Wetterereignisse besprochen, die den Aargau tangieren können.

### Sommerklima, Hitzeperioden

Das Sommerklima wird vom prognostizierten Klimawandel am stärksten beeinflusst. In der Abbildung 3b sind die mittleren Sommertemperaturen für das Jahr 2050 angegeben. Bei einer starken Erwärmung herrschen 2050 im Durchschnitt ähnliche Bedingungen wie im Hitzesommer 2003.

Bezüglich Temperaturextremen wird erwartet, dass bei einer Zunahme der mittleren Sommertemperaturen auch Hitzeperioden mit höheren Temperaturen auftreten. Zudem wird die Variabilität der mittleren Sommertemperaturen ansteigen (Schär et al. 2004). Unter Variabilität versteht man die Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Wert. Bei einer schwachen Erwärmung (siehe Tabelle 1: +1.4°C) bis ins Jahr 2050 treten Verhältnisse wie im Hitzesommer 2003 (vgl. Kapitel 2.5) sehr selten auf. Bei einer mittleren Erwärmung (siehe Tabelle 1: +2.7°C) würde ein solches Geschehen alle paar Jahrzehnte vorkommen. Bei einer starken Erwärmung (siehe Tabelle 1: +4.7°C) könnten sich solche Gegebenheiten alle paar Jahre abspielen. Zusammen mit einer zunehmend grösseren Variabilität der mittleren Sommertemperaturen würde die Zunahme der Hitzesommer noch früher einsetzen (Schär et al. 2004; OcCC 2007).

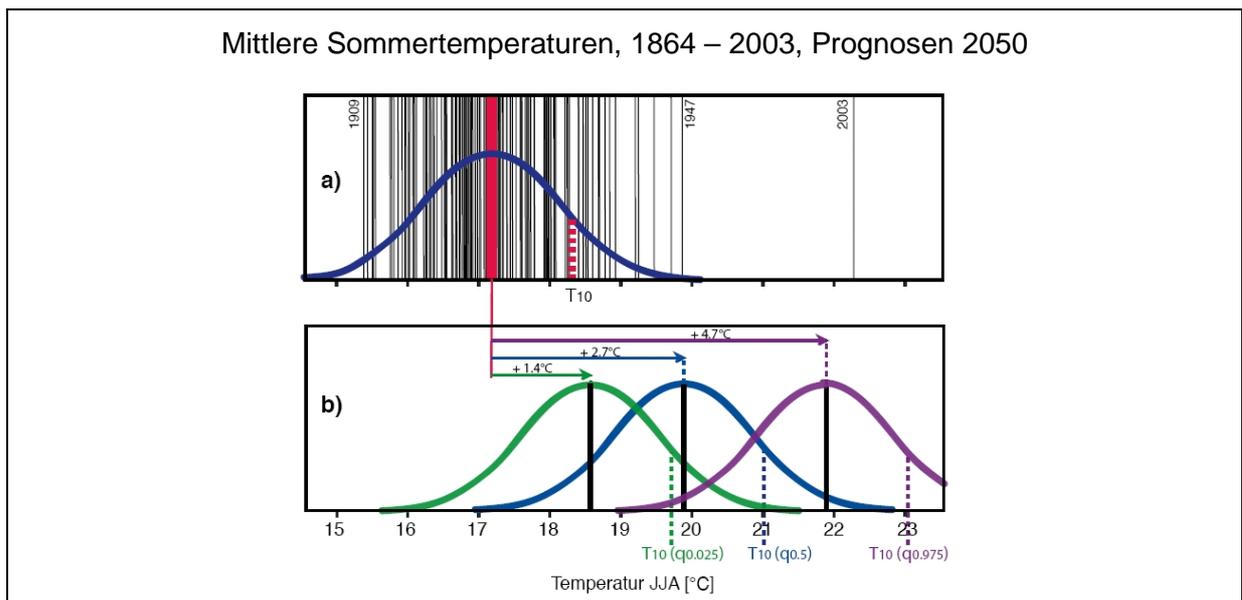


Abbildung 3a): Mittlere Sommertemperaturen von 1864 bis 2003 in den Niederungen auf der Alpen-nordseite. Wahrscheinlichkeitsverteilung (blaue Kurve) mit dem Mittelwert (durchgezogen rot) 17.2°C und der Temperaturangabe ( $T_{10} = 18.3^{\circ}\text{C}$ , unterbrochen rot) eines heißen Sommers der alle 10 Jahre auftritt (OcCC 2007).

Abbildung 3b): Sommertemperaturen bei einer schwachen (grün), mittleren (blau) und einer starken (violett) Erwärmung für 2050 mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung und einer Temperaturangabe für einen 10-jährlichen warmen Sommer (OcCC 2007).

### Kälteperioden, Frost

Im Winter werden sowohl die Häufigkeit von Kälteperioden als auch die Anzahl Frosttage zurückgehen. Die Minimaltemperaturen nehmen stärker zu als die mittleren Temperaturen. Bei Spätfrösten (Frost nach Beginn der Vegetationsperiode) ist bis jetzt noch unsicher, ob

sich das Risiko vergrössert oder nicht, weil durch die Erwärmung auch die Vegetationsperiode früher beginnt. Im Zeitraum 1958 bis 2003 war im Winter die durchschnittliche Nullgradgrenze und damit ungefähre Schneefallgrenze bei 840 m.ü.M. Es wurde berechnet, dass 2050 die Nullgradgrenze bei einer schwachen Erwärmung (+0.9°C) um 180 m ansteigt. Bei einer mittleren Erwärmung von +1.8°C steigt sie um 360 m an und durch eine starke Erwärmung (+3.4°C) liegt sie um 680 m höher als heute (OcCC 2007).

#### Intensive Niederschläge

Im Winterhalbjahr nehmen intensive, ein bis fünf Tage andauernde Niederschläge in Mitteleuropa zu. Modellierungen zeigen, dass bisher nur alle acht bis 20 Jahre vorkommende Starkniederschläge häufiger werden. Es wird erwartet, dass bis Ende Jahrhundert solche Starkniederschläge alle fünf Jahre eintreten. Im Sommer ist die Situation noch wenig klar. Die Modelle sagen eine markante Abnahme des mittleren Niederschlags voraus, die Intensität von Starkniederschlägen nimmt aber zu (OcCC 2007).

#### Naturgefahren

Der Klimawandel wirkt sich auch auf Naturgefahren, wie Hochwasser, Hangrutschungen und Murgänge aus, da sich die Faktoren, die eine Naturgefahr auslösen, verändern. Dies sind die Zunahme intensiver Niederschläge im Winter, eine Veränderung der Bodenfeuchte, der Schneeschmelze und des Abflussregimes (OcCC 2007). Wie sich der Klimawandel auf die für den Aargau relevanten Hochwasserereignisse auswirkt, kann erst als grober Trend eingeschätzt werden (KHOS 2007). Diese Einschätzungen sind in Kapitel 4.7.6 dargelegt.

#### Trockenheit

Trockenperioden werden im Sommer häufiger auftreten, infolge der Abnahme der mittleren Niederschläge und der Anzahl der Niederschlagstage. Weniger Niederschlag und höhere Verdunstung führten im Sommer regional zu einer Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts im Boden (OcCC 2007).

#### Stürme

Infolge des Klimawandels wird erwartet, dass die Häufigkeit der Stürme in Mitteleuropa abnimmt, aber die Intensität (Kategorie „Vivian“ oder „Lothar“) zunimmt. Die Zugbahn der Tiefdrucksysteme und Stürme bewegt sich Richtung Norden (OcCC 2007, vgl. Infobox 4).

#### **Infobox 4: Nordatlantische Oszillation**

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) beschreibt die Schwankungen des Luftdruckunterschieds zwischen dem Azorenhoch und dem Islandtief. Sie beeinflusst die atmosphärische Zirkulation auf der Nordhalbkugel und damit auch die Zugbahn und Intensität von Stürmen (Albrecht et al. 2008). Als positiv wird die Nordatlantische Oszillation bezeichnet, wenn die Druckgegensätze zwischen den Azoren und Island gross sind. Die Wettererscheinungen sind geprägt von starken Westwinden, die milde und feuchte Luft nach Europa bringen. Die Winter in Europa sind mild. Bei einer negativen Nordatlantischen Oszillation ist der Luftdruckgegensatz zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch gering. Dadurch sind die Westwinde nur schwach ausgeprägt. Die Winter in Europa sind geprägt von Kaltluft, die je nach Herkunft Schnee mit sich bringt (SF Meteo, ab Internet). Das Wetter im Winter 2008/2009 ist beispielhaft für eine negative Nordatlantische Oszillation.

## 2.4 Veränderungen des Wasserkreislaufs

Oberflächengewässer, Grundwasser, (Wasser im Untergrund, Poren und Spalten) sowie Schnee und Gletscher sind Elemente des Wasserkreislaufs. Verdunstung, Evapotranspiration und Niederschlag verbinden die Elemente (vgl. Infobox 5). Der Mensch greift in den Wasserkreislauf ein, indem er Oberflächengewässer und Grundwasser nutzt oder Abflüsse reguliert. Folgende klimabedingten Entwicklungen im komplexen Wasserkreislauf sind absehbar:

Im Winter fällt durch die Erwärmung in tieferen und mittleren Höhenlagen weniger Niederschlag als Schnee. Aus diesem Grund und weil Starkniederschläge zunehmen werden, nehmen im Mittelland im Winter in kleineren und mittleren Einzugsgebieten die Häufigkeit und Stärke von Hochwasserereignissen zu (vgl. Kapitel 4.7.6). Die Abflussmenge bei der Schneeschmelze nimmt durch das kleinere Schneeangebot ab und die Schneeschmelze beginnt früher. Die Evapotranspiration ist gekoppelt mit der Bodenfeuchte, dem Bewuchs und der Temperatur. Die Evapotranspiration nimmt infolge der Erwärmung zu, ist aber begrenzt durch das im Boden speicherbare Wasser. Infolge der mittleren Abnahme der Niederschläge und der Zunahme der Evapotranspiration nimmt der Abfluss trotz den zusätzlichen Wassermengen von der Abschmelzung der Gletscher ab (vgl. Kapitel 4.7.2). Der Abfluss wird unterschieden in einen Oberflächenabfluss und einen unterirdischen Abfluss. Der unterirdische Abfluss ergibt sich aus der Grundwasserneubildung durch die direkte Versickerung von Niederschlagswasser und durch die Infiltration von Wasser aus Oberflächengewässern, insbesondere aus Flüssen und Bächen (vgl. Kapitel 5). Zwischen April bis Oktober findet praktisch keine Grundwasserneubildung statt, weil im Boden eine Sättigung bis zur Feldkapazität erreicht wird, sodass kein Wasser unterirdisch aus dem Bodenspeicher abfließen kann.

### **Infobox 5: Wasserkreislauf und Wasserbilanz**

Der Wasserhaushalt setzt sich aus den Niederschlägen (N), dem Oberflächenabfluss ( $A_o$ ), dem unterirdischen Abfluss ( $A_u$ ) und der Evapotranspiration (E) zusammen. Für lange Zeiträume gilt die Bilanz:  $N = A_o + A_u + E$ . Mit dem Verdunstungsprozess, bei dem Energie entzogen wird, und dem Kondensationsprozess, bei dem Energie frei wird, ist die Wasserbilanz mit der Energiebilanz gekoppelt. Es wird von einem Wasserkreislauf gesprochen, weil durch die Verdunstung Wassermoleküle in die Atmosphäre gelangen, die später kondensieren und als Niederschlag auf die Erde fallen, von dort via Verdunstung wieder in die Atmosphäre transportiert werden, usw.

## 2.5 Hitzesommer 2003

Der Hitzesommer war ein Extremereignis, welches mit grosser Wahrscheinlichkeit seit mindestens 500 Jahren nicht aufgetreten ist (ProClim 2005). In der Schweiz lagen die Temperaturen in den Monaten Juni, Juli und August 4 – 5.5°C über den durchschnittlichen Sommertemperaturen der Jahre 1864 – 2003 (vgl. auch Abbildung 3). Die Niederschlagsmengen lagen vom Februar an unter dem langjährigen Durchschnitt und erreichten im Juni nur die Hälfte des Durchschnitts. Weite Gebiete der Schweiz erhielten erst im Oktober überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Dieser aussergewöhnlich trocken-heisse Sommer lässt

sich durch die grosse Häufigkeit von Subtropen-Hochdruckgebieten über Mitteleuropa erklären. Die atlantischen Störungszonen wurden weit nach Norden abgedrängt (vgl. auch Info-box 4).

Klimamodelle zeigen, dass solche Sommer in Zukunft häufiger auftreten werden. Deshalb sind die Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer, die Vegetation, etc. als Referenz für künftig mögliche Situationen von grosser Bedeutung.

## 2.6 Zielsetzungen der Klimapolitik

In Kapitel 3 werden die Ursachen des Klimawandels diskutiert. Es besteht in der Forschung zum Klimawandel ein breiter Konsens, dass den Treibhausgasen dabei eine bedeutende Rolle zukommt. Deshalb fokussieren die Zielsetzungen der internationalen und nationalen Klimapolitik, nebst Anpassungsmassnahmen (vgl. Kapitel 14) auf die Verminderung des Ausstosses von Treibhausgasen.

### Klimarahmenkonvention

Die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen beinhaltet die Zielsetzung, die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre auf einem Niveau zu stabilisieren, das eine gefährliche Störung des Klimasystems verhindert. Die Industriestaaten verpflichten sich, nationale Politiken umzusetzen mit dem Ziel, die Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen bis 2000 auf das Niveau von 1990 zurückzuführen. Die Konvention wurde von beinahe allen Ländern, auch der Schweiz, ratifiziert und trat 1994 in Kraft (UVEK 2007).

### Kyoto-Protokoll

Das Kyoto-Protokoll verpflichtet die Industriestaaten zu quantifizierten und terminierten Reduktionen ihrer Treibhausgasemissionen. Ziel ist, die Gesamtemissionen aller Treibhausgase gegenüber 1990 um 8% zu senken im Zeitraum 2008 – 2012. Werden die verbindlichen Emissionsziele nicht eingehalten, sind Sanktionsmechanismen vorgesehen. Das Protokoll trat 2005 in Kraft. Wichtige Industriestaaten wie die USA und Australien haben das Protokoll zwar unterschrieben aber später nicht ratifiziert. Deshalb sind gewichtige Emittenten nicht in das Protokoll eingebunden. Zurzeit laufen die Verhandlungen über die zweite Verpflichtungsperiode nach 2012. Die UNO empfiehlt als Minimalziel eine Erwärmung der Atmosphäre um mehr als 2°C zu verhindern, da ab einer globalen Temperaturerhöhung von mehr als 2° C weltweit mit für Mensch und Umwelt relevanten bis gefährlichen Klimaänderungen gerechnet werden muss.

### Europäische Union

Die Europäische Union (EU) verfolgt mit ihrer Klimapolitik ebenfalls das Ziel, die weltweite Temperaturerwärmung auf maximal 2° C zu beschränken. Die EU verpflichtet sich deshalb dazu, ihre Treibhausgasemissionen bis 2020 um 20% gegenüber dem Stand von 1990 zu senken. Falls die anderen Industrieländer sich zu ähnlichen Zielen verpflichten, wäre die EU bereit, sich zu einer Reduktion von 30% zu verpflichten.

### Weitere Initiativen

Weltweit wurden verschiedene weitere Initiativen für eine aktive Klimapolitik ins Leben gerufen. Beispielsweise haben sich Australien, China, Indien, Japan, die Republik Korea und die USA zur Asien-Pazifik-Partnerschaft für nachhaltige Entwicklung und Klima zusammengetan (Asian-Pacific Partnership on Clean Development and Climate, AP6). Im Vordergrund steht dabei die Entwicklung sauberer Technologien in den Bereichen Energie, Verkehr etc. In den USA selber, welche das Kyoto-Protokoll bis anhin nicht ratifiziert hat, ergriffen einige Bundesstaaten selbst die Initiative zur Reduktion der Treibhausgasemissionen.

### Schweiz

Als Vertragspartei der UN-Klimakonvention ist die Schweiz verpflichtet, nebst Massnahmen zur Emissionsminderung weitere Beiträge in den Bereichen Anpassungen an die Auswirkungen des Klimawandels (vgl. Kapitel 14), wissenschaftliche Grundlagen und Monitoring, internationale Zusammenarbeit sowie Information zu leisten. Der Stand der Umsetzung in diesen Aktivitätsfeldern wird periodisch in den Nationalen Berichten zuhanden der Klimakonvention dokumentiert, letztmals Ende 2005.

Kernstück der Klimapolitik der Schweiz ist das 1999 erlassene CO<sub>2</sub>-Gesetz. Mit diesem Gesetz will die Schweiz den CO<sub>2</sub>-Ausstoss bis 2010 um 10% gegenüber 1990 vermindern. Es sind auch Emissionsvermindierungen im Ausland anrechenbar. Das Gesetz setzt in erster Linie auf freiwillige Massnahmen, in zweiter Linie auf Lenkungsinstrumente wie die CO<sub>2</sub>-Abgabe. Mit der angestrebten Reduktion wird die Vorgabe des Kyoto-Protokolls erfüllt, welches eine Reduktion von 8% über alle Treibhausgase verlangt.

Zurzeit läuft die Revision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes zur weiteren Reduktion der Treibhausgasemissionen ab 2012. Die Revision orientiert sich an den Klimazielen der Europäischen Union. Die Schweiz will ihren Ausstoss an Treibhausgasemissionen bis 2020 gegenüber 1990 ebenfalls um 20% senken. Die Hälfte der Reduktion soll mit Massnahmen im Inland erreicht werden, wobei die CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Brennstoffen weitergeführt wird und für den Klimarappen bei Treibstoffen eine Nachfolgeregelung vorgeschlagen wird.

Die Kantone leisten mit ihrer kantonalen Energiepolitik einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Energie- und Klimaziele des Bundes (BfE 2009). Beispielsweise wird mit kantonalen Förderprogrammen die Energieeffizienz im Gebäudebereich wirksam erhöht (Moret et al. 2009. vgl. Kapitel 10). Damit wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoss signifikant reduziert (vgl. Kapitel 6).

### 3 Wichtigste Ursachen für den Klimawandel

#### 3.1 Natürliche Faktoren

In der Erdgeschichte war das Klima immer einem Wandel unterworfen. Bis zur Entwicklung der sesshaften Zivilisation waren ausschliesslich natürliche Faktoren für den Klimawandel verantwortlich. Plattentektonische Prozesse beeinflussen das Klima mit der Herausbildung von Gebirgen und der Land-Meerverteilung auf der Erde. Weiter gibt es astronomische Parameter, die zyklisch innert zehntausenden bis hunderttausenden Jahren das Klima modifizieren. Dabei spielt der Energieeintrag der Sonne auf die Erde eine wichtige Rolle, der je nach Position und Orientierung der Erde gegenüber der Sonne variiert. Faktoren dafür sind die Schiefe der Erdachse, die Richtungsänderung der Erdachse (Präzession und Nutation) und die Form der Erdumlaufbahn um die Sonne. In Bezug auf den gegenwärtigen Klimawandel sind die Veränderungen der astronomischen Parameter vernachlässigbar, da sie nur Temperaturabweichungen von Hundertstel Grad Celsius pro Jahrhundert verursachen. Generell bewegen wir uns astronomisch auf eine Kaltphase zu und erreichen in 25'000 Jahren ein Minimum des Strahlungsinputs (Jacobeit 2007).

Weiter zu beachten sind solare Aktivitätsschwankungen bedingt durch Sonnenflecken und Eruptionen. Die Aussagen über deren Rolle an der rezenten Erwärmung sind in der Literatur nicht einheitlich (Jacobeit 2007). Nach Cubasch et al. (1997) liegen die solar bedingten Temperaturänderungen in den letzten drei Jahrhunderten in der Grössenordnung von  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Im neusten Klimabericht von IPCC (2007) wird die Variabilität der Sonnenaktivität als potentieller Mechanismus der Klimaänderung mit 7% ( $0.12 \text{ W/m}^2$ ) des Einflusses des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  ( $1.66 \text{ W/m}^2$ ) angegeben. Allerdings wird der Grad des wissenschaftlichen Verständnisses hinsichtlich dieser Thematik als niedrig beurteilt.

Explosiver Vulkanismus mit einem hohen Auswurf von vulkanischer Asche bis in die Stratosphäre hat einen kurzzeitigen Einfluss auf das Klima. Nach grossen Vulkaneruptionen ergeben sich während ein bis vier Jahren Abkühlungen in der bodennahen Atmosphäre von einigen Zehnteln Grad Celsius (Schönwiese 1995).

#### 3.2 Anthropogene Faktoren

Seit der Entwicklung der sesshaften Zivilisation müssen ihre Einwirkungen auf das Klima- und Ökosystem berücksichtigt werden. Durch die Bewirtschaftung des Landes werden die Oberflächeneigenschaften verändert. Daraus folgt eine Veränderung des Anteils der Sonnenstrahlung, die von der Erdoberfläche aus in den Weltraum zurückreflektiert wird (Albedo, vgl. Infobox 6). Dunkle Oberflächen absorbieren die Strahlung stärker (niedrige Albedo). Hingegen reflektieren beispielsweise Schneeoberflächen den grössten Anteil der Sonnenstrahlung (grosse Albedo) wieder in den Weltraum. Durch Waldrodung und Vegetationsdegradation wird die Albedo erhöht, wodurch der Strahlungsinput abnimmt.

Die Albedo wird auch von anthropogen emittierten Partikeln beeinflusst, so genannte Aerosolpartikel, weil diese Sonnenstrahlung reflektieren oder absorbieren. Aerosolpartikel sind feste oder flüssige Teilchen in der Luft, wie zum Beispiel Russ oder Staub. Die meisten Partikel reflektieren die Sonnenstrahlung und bewirken damit eine Abkühlung an der Erdoberfläche. Russpartikel hingegen, absorbieren die Sonnenstrahlung und wirken erwärmend. In den 80er- und 90er-Jahren wurde der Begriff der globalen Verdunkelung aktuell, der die Abnahme der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche durch die Luftverschmutzung beschreibt. In den USA wurde mit 10% die stärkste Verdunkelung gemessen. Luftreinhaltemassnahmen, die seit den 1980er-Jahren wirksam wurden und der wirtschaftliche Zusammenbruch des ehemaligen Ostblocks haben dazu beigetragen, dass die Luft wieder sauberer und die Sonneneinstrahlung erhöht wurde (NFS Klima 2009).

Die Ausbreitung von Siedlungs- und Verkehrsflächen beeinflusst die Evapotranspiration. In Siedlungsgebieten ist die Evapotranspiration kleiner und die Erwärmung stärker, als im Umland (vgl. auch Kapitel 12.2).

**Infobox 6: Strahlungsumsatzprozess an einer Oberfläche**

Wenn die Sonnenstrahlung auf eine Oberfläche trifft, wird sie entweder in eine Richtung zurückgeworfen (Reflexion), hindurchgelassen (Transmission), in alle Richtungen verteilt (Streuung) oder aufgenommen und in Wärme umgewandelt (Absorption).

3.3 Der Treibhauseffekt

Unter dem Treibhauseffekt versteht man die Wirkung von Strahlung absorbierenden Gasen, woraus eine Erwärmung der Troposphäre erfolgt (siehe Abbildung 4 und Infobox 7).

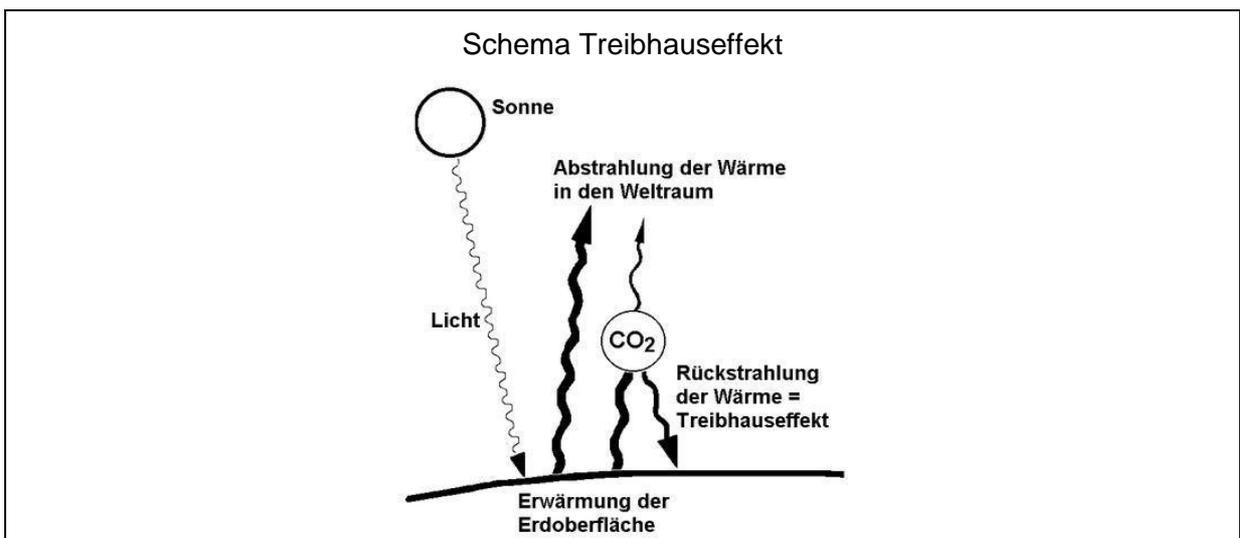


Abbildung 4: Schema Treibhauseffekt. Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) steht hier stellvertretend für alle wichtigen Treibhausgase, vgl. Tabelle 3 (Solarenergie-Förderverein Deutschland SFV, ab Internet).

Die Gaszusammensetzung der Atmosphäre besteht aus Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%), Argon (0.9%) und Spurenelementen (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Methan, Lachgas, Ozon, usw.). Die genannten Spurenelemente sind alles Treibhausgase. Somit besteht ein natürlicher Treibhauseffekt seit der Ausbildung der Atmosphäre. Ohne ihre Präsenz würden auf der Erde globale Mitteltemperaturen von -15 bis -18°C herrschen. Der natürliche Treibhauseffekt macht 30 bis 33°C aus und beschert uns eine globale Mitteltemperatur von ungefähr 15°C (Jacobeit 2007).

#### **Infobox 7: Treibhauseffekt**

Kurzweilige Strahlung der Sonne kommt an einem wolkenlosen Tag mehr oder weniger ungehindert auf die Erdoberfläche. Ein grosser Teil der Strahlung wird von der Oberfläche absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die Erdoberfläche emittiert langwellige terrestrische Strahlung, welche die Atmosphäre nicht vollständig verlässt, weil sie von den Treibhausgasen absorbiert wird. Die Treibhausgase emittieren selber auch langwellige Strahlung in Richtung Erdoberfläche. Je mehr Treibhausgase in der Atmosphäre vorhanden sind, desto mehr terrestrische Strahlung wird von den Gasen absorbiert und emittiert. Somit wird die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche erhöht, was einem höheren Energieeintrag entspricht, woraus eine Erwärmung an der Erdoberfläche erfolgt.

Seit der Industrialisierung und dem damit verbundenen Einsatz von fossilen Brenn- und Treibstoffen hat der anthropogen induzierte Treibhauseffekt einen massgebenden Einfluss auf das Klima. In der Tabelle 3 sind die Eigenschaften der wichtigsten Treibhausgase aufgelistet. CO<sub>2</sub> ist mit einem 60-Prozentanteil am anthropogenen Treibhauseffekt das dominierende anthropogene Treibhausgas. Andere Treibhausgase besitzen zwar ein vielfach höheres Treibhauspotential (Mass für die Treibhauswirksamkeit im Vergleich zu CO<sub>2</sub>) als CO<sub>2</sub>, sind aber in der Atmosphäre weniger stark vertreten und tragen darum mit einem viel kleineren Anteil zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Zu den natürlichen Spurengasen kommen künstlich hergestellte FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) hinzu, die früher z.B. in Kühlschränken als Kältemittel eingesetzt wurden und in der Atmosphäre als Treibhausgase wirken. Ozon absorbiert in der Stratosphäre (Teil der Atmosphäre in 12 – 50 km Höhe) schädliche UV-Strahlung. In der Troposphäre (unterste Schicht der Atmosphäre in 0 – 12 km Höhe) entsteht Ozon als Sekundärprodukt anthropogener Emissionen von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen bei hoher Sonnenstrahlung. Es wirkt in dieser Atmosphärenschicht als Treibhausgas und ist zudem gesundheitsschädlich in der Atemluft. Den Hauptteil am natürlichen Treibhauseffekt trägt der Wasserdampf. Er ist in der Tabelle 3 nicht aufgeführt, ist aber verantwortlich für eine Erwärmung von 20°C (SF Meteo, ab Internet).

	CO <sub>2</sub>	ME- THAN	LACH- GAS	FCKW	OZON
Prozentanteil der anthropogenen Emissionen am gesamten Fluss des Stoffes in die Atmosphäre	5	70	40	100	7
Mittlere Lebenszeit in Jahren nach anthropogener Emission	50 - 200	15	120	100	0.15
Treibhauspotential im Vergleich zur Erwärmungswirkung von CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> -Äquivalent) für einen Zeithorizont von 100 Jahren	1	25	300	>4000	<2000
Prozentanteil am natürlichen Treibhauseffekt (nicht aufgeführt ist der Wasserdampf, welcher rund 60 – 70% zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt)	22	2	4	–	8
Prozentanteil am anthropogenen Treibhauseffekt	60	15	4	11	8

Tabelle 3: Eigenschaften wichtiger Treibhausgase (Schönwiese 2003 und IPCC 2007).

In Kapitel 6 sind die aktuellen Treibhausgasemissionen der Schweiz und des Aargaus nach Verursacher aufgeschlüsselt.

Gemäss dem IPCC-Bericht 2007 ist „der weltweite Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration (ist) primär auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe und auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen, während derjenige von Methan und Lachgas primär durch die Landwirtschaft verursacht wird.“ (...) „Der grösste Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich (>90% Sicherheitsabschätzung, eigene Anmerkung) durch den beobachteten Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentration verursacht.“

### 3.4 Rückkoppelungseffekte

Ausschlaggebend für den Klimawandel ist die Veränderung der Strahlungsbilanzkomponenten (siehe Infobox 8) und die Reaktion des Klimas darauf. Die Sonnenstrahlung, die an der Erdoberfläche ankommt, wird modifiziert durch Aerosolpartikel in der Atmosphäre (Sulfataerosole, Russpartikel, usw.), Wolken, Sonnenaktivitätsschwankungen und Veränderungen der astronomischen Parameter. Die reflektierte Sonnenstrahlung ist abhängig von der Landnutzung, der Eisbedeckung, usw. Die Eigenstrahlung der Materie in der Atmosphäre setzt sich zusammen aus der Strahlung der Wolken, der Aerosolpartikel und Gase in der Atmosphäre (Treibhausgase, Russpartikel) usw. Die Eigenstrahlung der Erde ist stark abhängig von der Oberflächentemperatur. Die Reaktion des Klimas auf die Veränderung dieser Parameter wird gesteuert durch Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, dem Land und dem Ozean.

#### **Infobox 8: Strahlungsbilanz**

Die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche setzt sich zusammen aus der Sonnenstrahlung minus dem Anteil, der an der Erdoberfläche reflektiert wird, plus die Eigenstrahlung der Materie in der Atmosphäre (Wolken, Partikel, Luftmoleküle, etc.) minus der Eigenstrahlung der Erde.

Durch Rückkoppelungen wird der durch die Treibhausgase verursachte Temperaturanstieg verstärkt. Vor allem der Wasserdampf intensiviert die Erwärmung zusätzlich. Warme Luft kann mehr gasförmiges Wasser aufnehmen als kältere Luft. Und da Wasserdampf selber ein Treibhausgas ist, führt mehr Wasserdampf in der durch den Klimawandel erwärmte Luft zu einem grösseren Treibhauseffekt. Wie sich der erhöhte Wasserdampfgehalt auf die Bildung von Wolken auswirkt, ist noch unklar und Gegenstand der Forschung. Deshalb ist es auch noch unklar, wie sich eine Veränderung der Wolken auf die Klimaentwicklung auswirkt. Entwicklungen in den Polgebieten sind ebenfalls zu berücksichtigen. Schmelzen Schnee und Eis, können der dunkle Boden oder das dunkle Wasser mehr Sonnenstrahlung aufnehmen, aber auch mehr Wärmeenergie verlieren. Die Austauschprozesse des Kohlenstoffdioxids zwischen Atmosphäre, Meer und Vegetation sind ein weiterer Gegenstand der Forschung (Titz 2009).

## 4 Gewässer

### 4.1 Einleitung

Die prognostizierten Änderungen der klimatischen Parameter wirken sich direkt auf den Wasserkreislauf im Aargau aus (vgl. Kapitel 2.4). Die erwarteten hydrologischen Veränderungen im Aargau sind in diesem und im folgenden Kapitel dargelegt (Kapitel 5, Grundwasser und Wasserwirtschaft).

Der Aargau ist das Wasserschloss der Schweiz. Die gesamte schweizerische Alpennordseite, Liechtenstein, Teile von Bayern und Baden-Württemberg werden über die Flüsse Aare, Reuss, Linth-Limmat und Rhein durch den Aargau beziehungsweise entlang seiner Grenzen entwässert. Entsprechend hoch ist der Stellenwert der Gewässer. Durch den Klimawandel werden sich Veränderungen bei der künftigen Wasserführung der Flüsse und Bäche ergeben. Das Mittelwasser ist entscheidend für die Energienutzung an den Flusskraftwerken (vgl. Kapitel 10). Niedrigwasser sind kritisch bezüglich der Ökologie (vgl. auch Kapitel 8). Bei Hochwassern steht der Schutz von Menschenleben und Infrastruktur im Vordergrund. Hochwasser und Niedrigwasser sind Extremereignisse bei Gewässern. Sie werden durch die Wasserspiegelhöhen und die Abflussmengen bestimmt. Diese sind die Interventionsparameter für die Behörden. Es ist noch nicht klar, ob die Wassertemperaturen künftig auch als Interventionsparameter bei Extremereignissen eingesetzt werden können (BUWAL 2004). Sie sind genauso entscheidend für das Überleben eines Ökosystems wie das Abflussverhalten eines Fließgewässers.

### 4.2 Abflussregime und Abflussmengen

#### 4.2.1 Entwicklung der Niederschläge im 20. Jahrhundert

Im letzten Jahrhundert (1901 – 2000) hat sich die Niederschlagsverteilung verändert. Auffallend sind die Zunahmen der winterlichen Niederschläge. Da durch die Erwärmung der Niederschlag vermehrt als Regen und nicht mehr als Schnee fällt, ist dieses Wasser sofort abflusswirksam. Zudem wechseln sich Frost- und Tauphasen ab, so dass als Schnee gespeichertes Wasser sporadisch schon im Winter schmilzt, versickert oder direkt oberirdisch abfließt. Im Sommer ist im letzten Jahrhundert nur eine schwache Zunahme der Niederschläge zu verzeichnen (Belz et al. 2007).

#### 4.2.2 Entwicklung des Abflusses im 20. Jahrhundert

Die Niederschläge haben einen wichtigen Einfluss auf den Abfluss (siehe Infobox 5). Daneben müssen die Verdunstung, die Schneeschmelze und der menschliche Einfluss auf

den Abfluss ebenfalls berücksichtigt werden. Der menschliche Einfluss umfasst beispielsweise Speichern von Wasser in Speicherseen, Seeregulierungen, Wasserentnahmen, etc. Nebst der Entwicklung des Niederschlags ist deshalb auch die Entwicklung der Abflussmengen im letzten Jahrhundert für künftige Abflussprognosen relevant.

Der winterliche Monatsabfluss des Rheins und seiner Nebenflüsse hat im 20. Jahrhundert zugenommen, die sommerlichen Monatsabflüsse haben merklich abgenommen und die innerjährliche Variabilität hat sich verringert (Belz et al. 2007). Dies wird in erster Linie mit dem veränderten Niederschlagsregime begründet (vgl. Kapitel 4.2.1). Zusätzlich wird diese Entwicklung durch die Bewirtschaftung der Speicherseen verstärkt (Belz et al. 2007). Im Einzugsgebiet des Rheins liegen grössere, im 20. Jahrhundert errichtete oder ausgebaute Speicherseen (Lago di Lei 197 Mio. m<sup>3</sup>, Lac de la Gruyère 180 Mio. m<sup>3</sup>, Staubecken der Kraftwerke Vorderrhein, d.h. Lai da Sta. Maria, Lai da Curnera, Lai da Nalps, 152 Mio. m<sup>3</sup>, Zerweilasee 100 Mio. m<sup>3</sup>, Grimsensee 94 Mio. m<sup>3</sup>, Sihlsee 92 Mio. m<sup>3</sup>, Limmerensee 92 Mio. m<sup>3</sup>, Wägitalersee 76 Mio. m<sup>3</sup>, Göscheneralpsee 75 Mio. m<sup>3</sup>, Lai da Marmorera 60 Mio. m<sup>3</sup>, Oberaarsee 56 Mio. m<sup>3</sup>, Lungernsee 50 Mio. m<sup>3</sup>, Klöntalersee 40 Mio. m<sup>3</sup> etc.). Das gespeicherte Wasser aus dem Sommerabfluss wird im Winter turbinert und dem Winterabfluss zugeführt. Die Speicherbewirtschaftung trägt dazu bei, dass sich die Abflussvariabilität trotz steigender Variabilität der Niederschläge verringert.

#### Gletscherschmelze

Im 20. Jahrhundert waren die zusätzlichen Wasserbeiträge durch die Gletscherschmelze weder an der Entwicklungsdynamik der Niedrigwasserextreme noch an den vorher beschriebenen Modifikationen des mittleren Abflussverhaltens (Kapitel 4.2.2) in wesentlicher Weise beteiligt. Am Beispiel vom Pegel des Rheins in Basel resultiert in den gletscherschmelze-relevanten Sommermonaten ein Beitrag am Abfluss von ca. 15 m<sup>3</sup>/s. Das sind rund 1.2% des dortigen monatlichen Abflussmittelwerts des Monats August (Belz et al. 2007). In Gewässern in unmittelbarer Gletschnähe ist der Beitrag der Gletscherschmelze am Abfluss jedoch grösser. Im Hitzesommer 2003 wird der gesamte Volumenverlust der Alpengletscher auf 5% des Gletschervolumens 2002 geschätzt (ProClim 2005).

#### 4.2.3 Entwicklung der Abflussmengen im 20. Jahrhundert

Die mittleren jährlichen Abflussmengen haben sich im 20. Jahrhundert im Einzugsgebiet des Rheins von der Quelle bis zur Main-Einmündung nicht oder nur wenig verändert (Belz et al. 2007).

#### 4.3 Entwicklung der Wassertemperaturen

Die Wassertemperatur ist ein Hauptindikator der ökologischen Zustandsbeurteilung eines Oberflächengewässers. Sie reguliert die Lebensvorgänge in den Gewässern und beeinflusst die Stoffwechselvorgänge, die Dauer, den Verlauf und die Geschwindigkeit des Wachstums sowie die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften (BUWAL 2004).

Die Wassertemperaturen werden beeinflusst durch die Temperatur des Quellwassers (entspricht Jahresmitteltemperatur an diesem Ort) und der Zuflüsse, die Strahlungsbilanz, den Niederschlag, die Verdunstung, die Kondensation und die Schneeschmelze sowie den Wärmeaustausch mit dem Untergrund und der Luft. Durch den turbulenten Wassertransport in Fließgewässern ist der Wärmeaustausch mit der Umgebung erhöht. Die Beschattung durch eine ufernahe Gehölzvegetation oder die Exfiltration von kühlem Grundwasser kann die Wassertemperatur kurz- sowie langfristig verändern. Der Wärmehaushalt eines Gewässers ist somit dynamisch. Die Wassertemperatur, gemessen an einer Stelle, ist von allen genannten Faktoren und der Dauer ihrer Einwirkung im flussaufwärts liegenden Bereich, respektive im Einzugsgebiet, beeinflusst.

In den letzten 100 Jahren nahm die Wassertemperatur der grossen Schweizer Flüsse um ca. 2°C zu (Gander 2009). Die Wassertemperaturen der Schweizer Flüsse seit 1965 sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Wassertemperaturen korrelieren mit der Lufttemperatur, reagieren aber träger, weil Wasser eine viel grössere Wärmekapazität besitzt als Luft. Ursache für die steigenden Wassertemperaturen sind der Klimawandel, die Einleitung von erwärmtem Wasser und Veränderungen im Abflussregime, wie zum Beispiel Stauhaltungen.

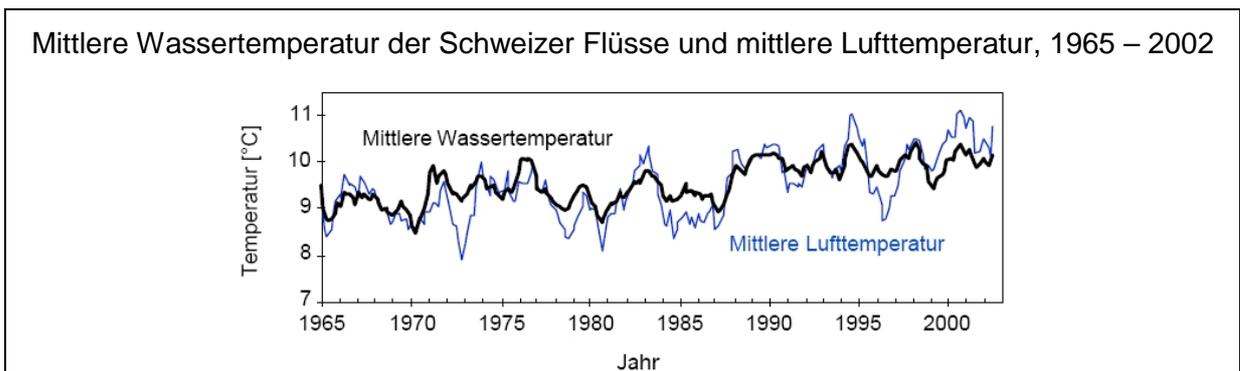


Abbildung 5: Vergleich der mittleren Wassertemperatur der Schweizer Flüsse (schwarz) mit der mittleren Lufttemperatur (blau) von 1965 bis 2002 (OcCC 2007).

Besonders bei tiefem Wasserstand erwärmt sich das Wasser in Bächen und Flüssen schneller als bei hohem Wasserstand (BUWAL 2004).

#### 4.4 Entwicklung des Niedrigwassers

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts haben sich die beobachteten Niedrigwasserextreme bei grossen Fließgewässern abgemildert. Das Winterhalbjahr stellte oft die Saison des Niedrigwassers dar. Durch die Veränderung des Abflusses vom nivalen zum zunehmend gemischt nival-pluvialen Charakter, trägt der Winterniederschlag vermehrt zum Abfluss bei und hebt damit den Wasserstand des Niedrigwassers bei grossen Fließgewässern an (Belz et al. 2007).

Bäche reagieren empfindlicher auf die unterschiedliche Speisung. In trocken-heissen Sommern führen die Bäche nur wenig Wasser. Besonders Bäche ohne Kopfspeicher (Seen) sind gefährdet für Niedrigwasser. Im Aargau sind dies die Bäche Pfaffneren, Wigger, Uerke, Wyna, Bünz, Surb, Etzgerbach, Sissle, Möhlinbach und der Magdenerbach. Für viele Bäche ist mit der bisherigen Klimaerwärmung und der damit verbundenen erhöhten Verdunstung die Wahrscheinlichkeit im Sommer wenig Wasser zu führen gestiegen. Abflussverknappend wirkt die Entnahme von Wasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft und im Gartenbau in trocken-heissen Sommern. Damit steigt der Konflikt zwischen einem funktionsfähigen Ökosystem und dem Ernteerfolg der Landwirtschaft. Im Aargau sind die landwirtschaftsintensiven Gebiete in Bachtälern gelegen (z.B. unteres Bünztal). Die Entnahme von Bachwasser ist geregelt, kostenpflichtig und bedarf einer Bewilligung. Im Bünztal besteht zusätzlich eine zeitliche Regelung, welche festlegt, wer wann zu Wasserentnahmen berechtigt ist.

## 4.5 Hochwasser

### 4.5.1 Entwicklung Hochwasser im 20. Jahrhundert

Damit ein Gewässer sich zu einem Hochwasser entwickeln kann, braucht es verschiedene Voraussetzungen bezüglich Niederschlag, Temperatur und dem Zustand des Einzugsgebiets. In grossen Einzugsgebieten ( $>300 \text{ km}^2$ ) treten Hochwasserereignisse bei frontalen Wetterlagen auf, die lang andauernde Niederschläge (Typ Landregen) mit sich bringen und das gesamte Einzugsgebiet überregnen. Das sind Effekte von grossräumigen Wetterlagen. In kleinen Einzugsgebieten ( $<100 \text{ km}^2$ ) führen heftige Sommergewitter (konvektive Niederschläge, Schauer), also kleinräumige Wetterlagen, zu einem Hochwasserereignis. Ein Gewässer mit ausreichenden Speichermöglichkeiten (beispielsweise ein See oder Rückhaltebecken) droht weniger zu einem Hochwasser anzuschwellen (Petraschek 2003).

Im 20. Jahrhundert ist im Einzugsgebiet des Rheins von der Quelle bis zur Mündung eine deutliche Anstiegstendenz der Abflussmaxima (Hochwasserscheitel) in den Jahresserien zu verzeichnen. Besonders in den Winterhalbjahren ist die Trendsignifikanz hoch (Belz et al. 2007). Die Zunahmen der Abflussmaxima resultieren unter anderem aus den erhöhten Gebietsniederschlagssummen im Winterhalbjahr und vermehrt auftretenden Starkniederschlagsereignissen.

Seit 1999 ereigneten sich im Aargau vier grosse Hochwasser: 20. – 22. Februar 1999, 11. – 15. und 20. – 22. Mai 1999, 21. – 23. August 2005 und 6. – 9. August 2007. Zwei dieser Hochwasser ereigneten sich im Sommer. Auslöser für die Starkniederschläge im August 2005 und 2007 waren Tiefdrucksysteme westlich bis südlich der Alpen, welche feuchte Luftmassen an den Alpennordrand führten. Solche Wetterlagen werden auch als „Vb-Lage“ oder „Genua-Tief“ klassifiziert (vgl. Infobox 9).

#### Infobox 9: Genua-Tief

„Unter dem Genua-Tief wird ein Tiefdruckgebiet verstanden, das sich über den Golf von Genua (Ligurisches Meer) besonders im Winter und im Frühjahr im Lee der Westalpen bildet. Ursache ist ein in grosse Höhen reichender Kaltlufteinbruch durch das Rhonetal ins Mittelmeer. In der Folge kommt es zu ergiebigen Niederschlägen in den Staubereichen der Alpen und in den Mittelgebirgen. Das internationale Forschungsprojekt ALPEX („Alpen-Experiment“) untersucht die Entstehung und Entwicklung der Genua-Zyklone.“ (Meteo Schweiz, ab Internet)

Auf das Genua-Tief sind nebst den Hochwassern 2005 und 2007 auch die grossen Überschwemmungen von 1997 an der Oder, 1999 in Bayern sowie das Hochwasser an der Weichsel im Jahr 2001 zurückzuführen. 2002 trat die Wetterlage «Vb» fünfmal auf, was zu Jahrhundertüberschwemmungen in Deutschland, Österreich und Tschechien führte. Auffällig ist eine gewisse Häufung solcher Wetterlagen in den letzten Jahren. Ob es sich dabei um einen Zufall oder um einen statistisch gesicherten Trend handelt, lässt sich noch nicht beurteilen. (NZZ Online vom 25.08.05)

In der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 wird aufgezeigt, dass sich seit Beginn des 19. Jahrhunderts bis 2005 in der Schweiz in zwei Häufungen grosse überregionale Hochwasser ereignet haben, die ein überkantonales Eingreifen nötig machten (vgl. Abbildung 6). Möglicherweise haben wir in der Zeit von 1875 bis 1975 eine längere Periode mit vergleichsweise wenigen Hochwassern erlebt.

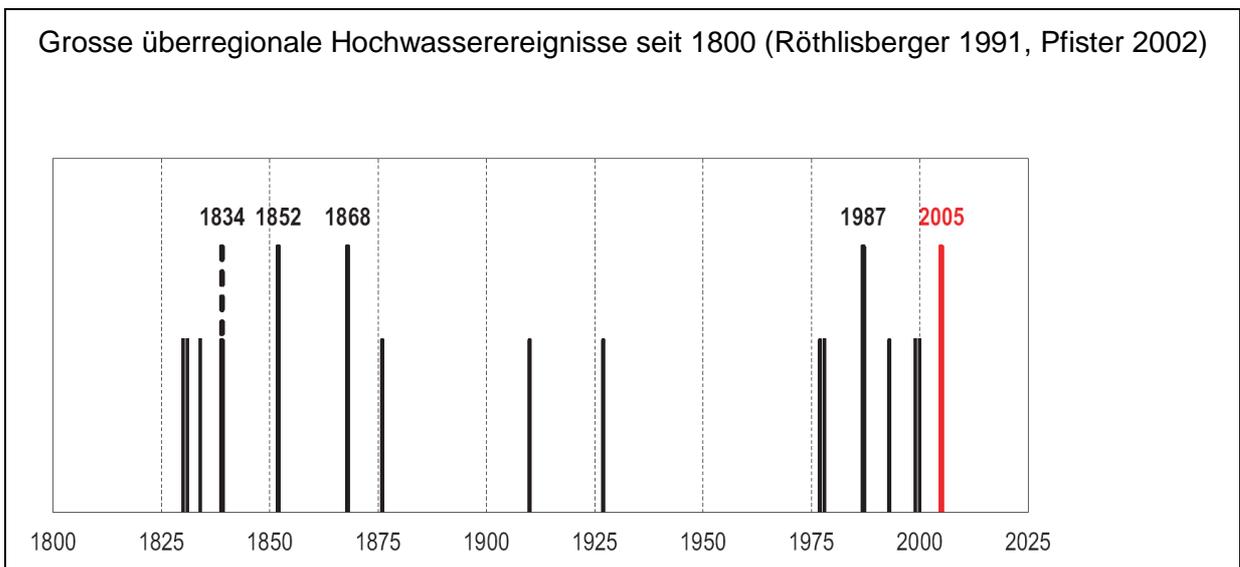


Abbildung 6: Grosse überregionale Hochwasserereignisse seit 1800 (Bezzola et al. 2007).

Am Pegel der Reuss in Mellingen wurden 1999 und 2007 50-jährliche Hochwasser gemessen und 2005 sogar knapp ein 200-jährliches. Am Pegel des Rheins in Rheinfelden wurde 1999 ein 200-jährliches Hochwasser gemessen, 1994 ein knapp 100-jährliches und 2007 ein 50-jährliches.

Im Zusammenhang mit der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 (Aschwanden 2000) wurde untersucht, ob sich die Spitzenabflusswerte für verschiedene Wiederkehrperioden über

die Zeit verändern. Dabei wurden für ausgesuchte Fließgewässer die Werte 1920 – 1960 erstmals berechnet und danach sukzessive für jedes zusätzliche Jahr neu berechnet. In Abbildung 7 ist das Beispiel für die Aare in Brugg dargestellt. Die Abbildung zeigt, wie sich die Spitzenabflusswerte für verschiedene Wiederkehrperioden in Abhängigkeit der jährlichen Abflussmaxima sowie der Messdauer verändern.

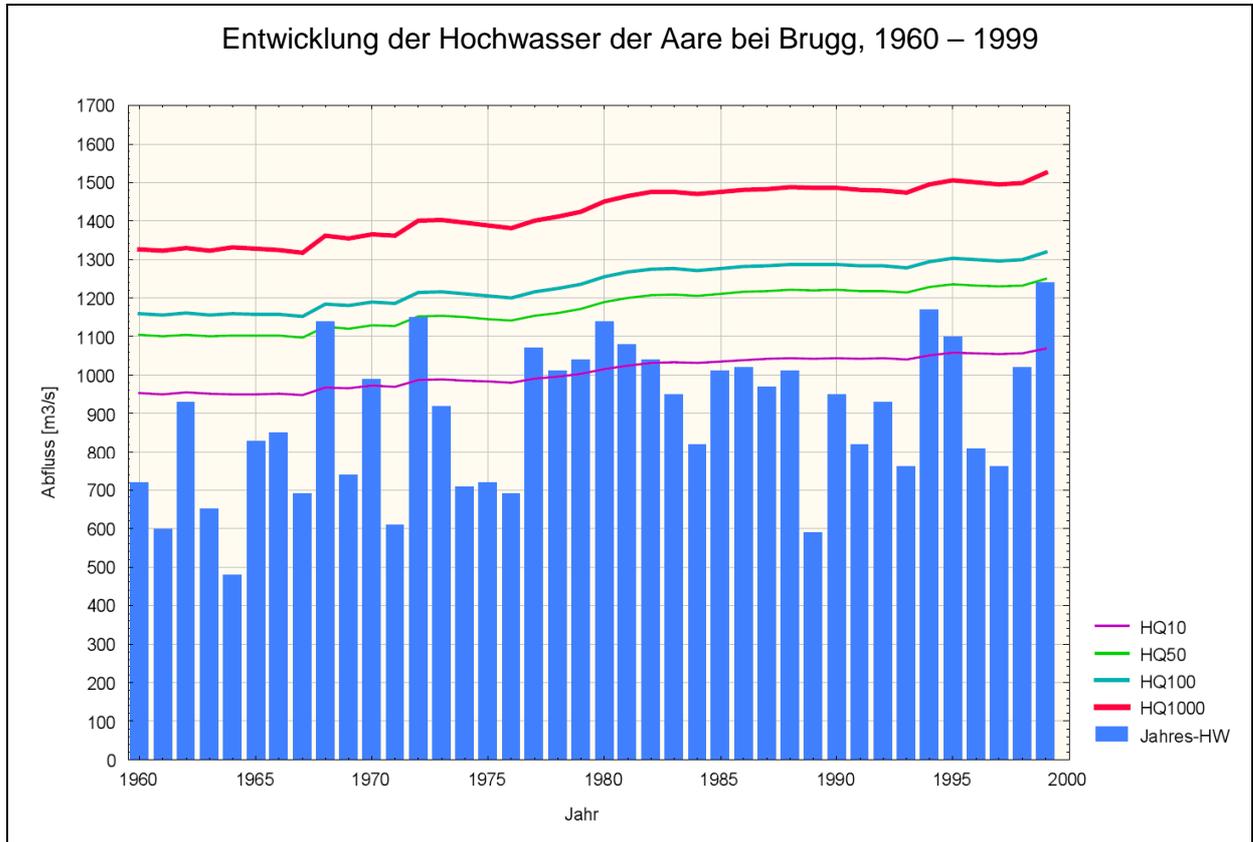


Abbildung 7: Aare bei Brugg: Entwicklung der Hochwasser mit einer bestimmten Wiederkehrperiode. 10-jährliches Hochwasser (HQ10), 50-jährliches Hochwasser (HQ50), 100-jährliches Hochwasser (HQ100) und 1000-jährliches Hochwasser (HQ1000), (Aschwanden 2000).

Die Abbildung 7 zeigt, dass die Spitzenabflusswerte für alle betrachteten Wiederkehrperioden seit 1960 im Umfang von 10 – 15% grösser geworden sind. Wegen dem Trend zu höheren Spitzenabflusswerten für bestimmte Wiederkehrperioden galt bei Brugg ein Abfluss in der Größenordnung von 1300 m³/s 1960 noch als 1000-jährliches Hochwasser, 1999 aber nur noch als 100-jährliches (Aschwanden 2000). Als mögliche Erklärung für diese Veränderungen kann wiederum der zunehmende Niederschlag im Winter und die Tendenz zu mehr intensiven Niederschlagsereignissen herangezogen werden. Eine eingehende Ursachenanalyse steht aber noch aus.

#### 4.5.2 Gefahrenkarte Hochwasser im Aargau

Der Kanton Aargau hat eine Gefahrenkarte für Hochwasser ausgearbeitet (siehe Abbildung 8). Die Grundlagen dazu waren ein Geländemodell (Topografie ohne Häuser), hydrologische Analysen (Pegelmessstationen in grossen Gewässern, Schätzformel für kleine Gewässer) und eine Analyse von Schwachstellen der Wasserführung (Brücken, Einläufe, Durchlässe, Rohre). Risiken durch Schwemmholtz und Geschiebe wurden von Fachpersonen beurteilt und für die einzelnen Fälle in der Gefahrenkarte berücksichtigt. Das Modell für die Gefahrenkarte wurde für ein 30-, 100- und 300-jährliches Hochwasserereignis und ein Extremereignis gerechnet. Man ging vom Wissen und Zustand von heute aus und beurteilte pessimistisch-konservativ die Zukunft. Die Gefahrenkarte wurde und wird mit der Realität überprüft und eine gute Übereinstimmung erreicht. Rund 20% des aargauischen Siedlungsgebietes, das meiste davon bereits überbaut, sind potenziell hochwassergefährdet, wenn von einem Extremereignis ausgegangen wird (Tschannen 2009).

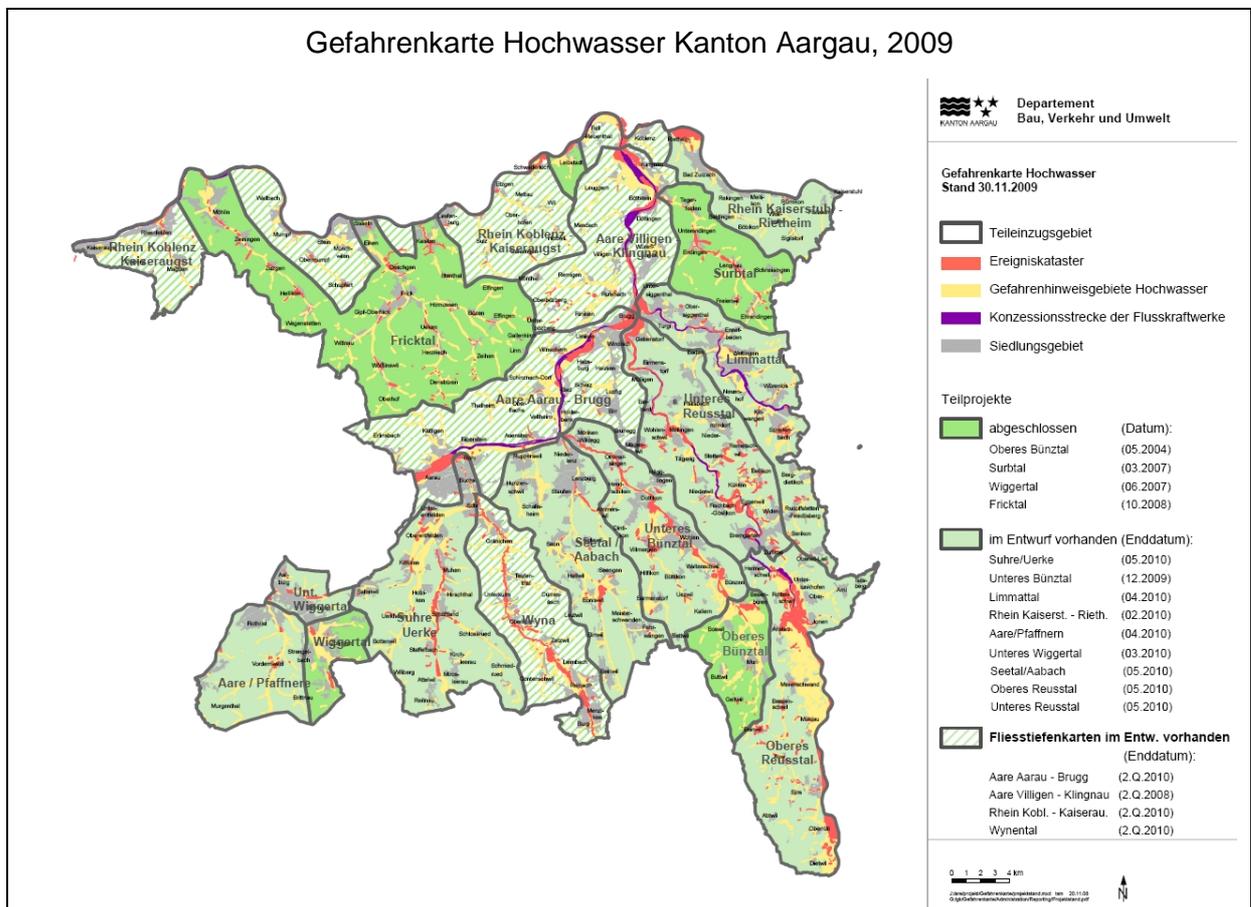


Abbildung 8: Gefahrenkarte Hochwasser für den Kanton Aargau (Departement Bau, Verkehr und Umwelt 2009, ab Internet).

#### 4.5.3 Hochwasserschutz

Der Schweizer Hochwasserschutz geht nicht in die Richtung eine Überschwemmung zu verhindern, sondern daraus resultierende Schäden zu vermeiden. Es sind vor allem raumplanerische Anforderungen, mit denen man einen (weiteren) Anstieg des Schadenspotenzials verhindern will, indem man z.B. neue Überbauungen in gefährdeten Gebieten verhindert (Grundlage Gefahrenkarte, vgl. auch Kapitel 12.3). Ein wesentlicher weiterer Ansatz ist die Revitalisierung der Gewässer, die dämpfend auf Überschwemmungen wirkt. Ein zweckmäßiger Unterhalt der Gewässer, bautechnische Schutzmassnahmen, Alarmierungs- und Notfallkonzepte gehören ebenfalls zu einem integralen Risikomanagement (KOHS 2007).

Im Kanton Aargau wird das kantonale Abflussmessnetz zurzeit baulich erneuert und automatisiert. Bis Ende 2010 sollen 32 automatische Stationen an allen wichtigen Seitenbächen zur Verfügung stehen. Mit der Modernisierung werden präzisere Pegel- und Abflussmessungen sowohl im Niederwasserbereich als auch im Hochwasserfall angestrebt. Auch die Wassertemperatur wird erfasst. Neu stehen die Daten online zur Verfügung. Im Hochwasserfall können Behörden und Einsatzkräfte direkt ab Station alarmiert werden.

#### 4.6 Hitzesommer 2003

Die extremen Temperaturen im Sommer 2003 hatten erhebliche Einflüsse auf die Wasserführung und Wassertemperatur der Flüsse und Bäche. Der Abfluss der grossen Flüsse Rhein, Aare, Limmat und Reuss lag unter dem langjährigen Durchschnitt, erreichte aber nicht die Tiefstwerte vom Trockenjahr 1949. Die Wassertemperaturen der Aare, des Rheins und der Reuss erreichten Rekordwerte. Die durchschnittliche Monatstemperatur beim Rhein in Rekingen und der Aare in Brugg lag in den Monaten Juni, Juli und August immer über 20°C. Im August erreichte der Rhein in Rekingen durchschnittlich 24.8°C. In der Periode von 1970 bis 2008 liegt das durchschnittliche Jahresmittel im Rhein in Rekingen im August bei 20.1°C.

Bei den Aargauer Bächen war die Lage kritisch (vgl. auch Kapitel 5.5). Im Fricktal waren mehrere Bachabschnitte teilweise oder ganz ausgetrocknet. Prekär waren die Umstände für die Fische. Viele Bäche führten zu wenig Wasser für das Überleben der Fische. Notabfischungen konnten teilweise ein Fischsterben verhindern. Die Temperaturen der meisten Bäche lagen unter den hohen Temperaturwerten der Flüsse. Sie schwankten entlang des Baches je nach Beschattung, Grundwasseraufstoss und Zufluss und in Abhängigkeit der Tageszeit stark (Gousskov Wildberg und Voser 2004). Mehr zur Lage der Fischerei ist im Kapitel 8, Jagd und Fischerei, beschrieben.

## 4.7 Auswirkungen des Klimawandels

### 4.7.1 Entwicklung der Niederschläge im 21. Jahrhundert

Der Trend einer Zunahme der winterlichen Niederschläge im 20. Jahrhundert wird laut den Prognosen des OcCC (2007) im 21. Jahrhundert fortgesetzt (siehe Kapitel 2.2.2). Wie stark diese noch zunehmen bleibt unklar. Die Bandbreite der Niederschlagsprognosen ist mit -1% bis +21% relativ gross. Gemäss OcCC (2007) ergibt sich im Sommer eine Trendumkehr, wonach die Niederschläge um 7 bis 31% abnehmen.

### 4.7.2 Entwicklung des Abflusses im 21. Jahrhundert

Der Trend zur Angleichung der Winter- und Sommerabflüsse aus dem letzten Jahrhundert setzt sich unter Berücksichtigung der wahrscheinlichen OcCC-Prognosen (vgl. Kapitel 2) voraussichtlich im 21. Jahrhundert fort. Aus einem hauptsächlich nival geprägten Abflussregime entwickelt sich immer mehr ein gemischt nival-pluvialer Charakter. Das heisst, dass der vorherig niedrige Abfluss im Winter zunimmt und der typischerweise hohe Abfluss im Sommer mit einer Abflussspitze während der Schneeschmelze abnimmt. Es ergibt sich also eine Verringerung der Amplitude zwischen dem abflussreichsten und dem abflussschwächsten Monat im Jahr (Belz et al. 2007). Eventuell stellt sich künftig ein Minimum des Abflusses im September ein, da dann die Niederschläge immer noch gering sind, die Verdunstung aber noch relativ hoch ist und die Schneeschmelze schon vorbei ist.

In der Abbildung 9 wird gezeigt, dass gemäss dem Trend der letzten 30 bis 40 Jahre das mittlere Abflussmaximum in den Monaten Mai und Juni liegt, während im Juli, beim Rhein auch im August, der mittlere monatliche Abfluss stark abfällt. Im Rhein ist im Winter eine Zunahme des Abflusses sichtbar. Die gestrichelte Linie zeigt eine Trendfortführung der Beobachtungen der letzten 37 Jahre. Die Daten der Periode 1990 bis 2008 (Rhein), respektive 1994 bis 2008 (Reuss), wurden von den Daten der früheren Periode (1971 bis 1989, Rhein und 1979 bis 1993, Reuss) subtrahiert und diese Differenz dann zu den erstgenannten addiert. Das ergibt ein mögliches Szenario für den mittleren Monatsabfluss in Rheinfeldern und Mellingen für die Periode 2009 bis 2027 (Rhein-Rheinfeldern), respektive 2009 bis 2023 (Reuss-Mellingen). Wegen der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Unsicherheiten bezüglich der Hauptinputgrösse für den Abfluss, dem Niederschlag und aus methodischen Gründen sind diese Trendfortführungen mit entsprechender Vorsicht zu werten.

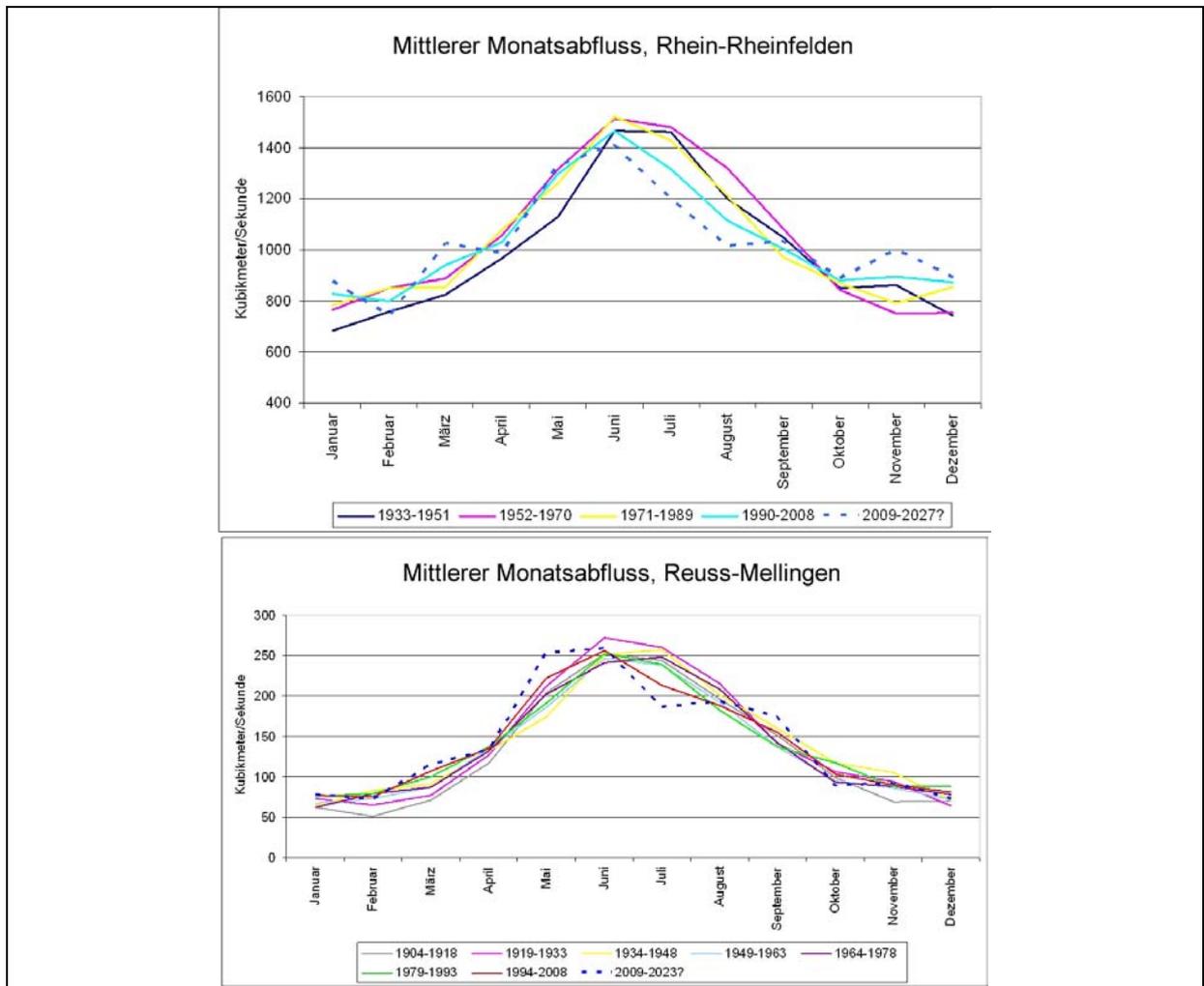


Abbildung 9: Mittlerer Monatsabfluss bei den Messpegeln Rhein-Rheinfelden und Reuss-Mellingen für verschiedene Perioden seit Messbeginn (durchgezogene Linien) und möglicher monatlicher Abfluss in rund drei Jahrzehnten (gestrichelte Linie), (Datenquelle: BAFU).

#### Schnee- und Gletscherschmelze

In Zukunft beginnt die Schneeschmelze durch die prognostizierten Temperaturerhöhungen früher und ist wegen dem erwarteten Anstieg der Schneegrenze geringer. Es fällt im Winter weniger Niederschlag als Schnee, der erst im Frühling/Sommer abflusswirksam wird (vgl. Kapitel 4.2.1. Belz et al. 2007). Die Schneeschmelze wird in heißen Sommern mit Gletscherschmelzwasser angereichert, wobei der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss mit der Distanz zum Alpenraum abnimmt (vgl. Kapitel 4.2.2).

#### 4.7.3 Entwicklung der Abflussmengen im 21. Jahrhundert

Mit der prognostizierten Abnahme der Niederschläge im Sommer und einer leicht zunehmenden Verdunstung durch die höheren Temperaturen wird sich das Niederschlagsdefizit im Sommer verschärfen.

Im Sommer ergibt sich heute in Zürich ein leichtes Niederschlagsdefizit, weil die Evapotranspiration im Mai und Juli höher ist, als die durchschnittliche Niederschlagsmenge in diesen Monaten. In den Übergangszeiten und im Winter ist die Niederschlagsmenge grösser als die Evapotranspiration (Gander 2009).

Im Winter erhöht die prognostizierte Zunahme der Niederschläge den Abfluss. Insgesamt wird tendenziell eine Abnahme des Jahresabflussvolumens bis Mitte Jahrhundert um ca. 10% prognostiziert (Hänggi et al. 2009, Gander 2009, KOHS 2008).

Der Einfluss der Verdunstung dürfte vor allem in nicht alpinen Gebieten gross sein. Demgegenüber sind die Abflussbildungsprozesse (Gletscherabfluss, Schneedecke, etc.) in alpinen Gebieten im Vergleich zur Verdunstung entscheidender. Bezüglich der künftigen Abflussmengen und vor allem bezüglich quantitativer Prognosen besteht weiterhin Forschungsbedarf (Hänggi et al. 2009).

Die Abflussmenge hat einen direkten Einfluss auf die Wasserzinsen und die Energieproduktion (siehe Kapitel 10 Energie).

#### 4.7.4 Wassertemperaturen

Laut OcCC (2007) steigen die Wassertemperaturen in den Flüssen und in der Oberflächenschicht der Mittellandseen bis 2050 weiter an, um ungefähr 2°C gegenüber 1990. In der Abbildung 10 wird diese Prognose untersucht. Die Trendlinie (Regressionsgerade) zu den Wassertemperaturen der Aare schneidet die prognostizierte Temperaturangabe für 2050 zum Zeitpunkt 2053 und die Wassertemperaturen der Reuss erreichen die vorhergesagten Werte für 2050 zum Zeitpunkt 2047. Somit stimmt die Vorhersage des OcCC mit den Berechnungen zu zwei Beispielen des Kantons Aargau überein. Dies unter der vereinfachenden Annahme, dass ein linearer Trend vorliegt.

Die Wassertemperaturen der Fliessgewässer haben einen entscheidenden Einfluss auf die Fische. Die Auswirkungen der Erwärmung der Gewässer auf die Fische werden im Kapitel 8, Jagd und Fischerei besprochen.

Wärmeres Wasser reduziert die Kühlleistung bei Kernkraftwerken mit Durchlaufkühlung. Die zu erwartenden Auswirkungen bezüglich dem Kernkraftwerk Beznau I und II werden in Kapitel 10, dargelegt.

In Flüssen und Bächen fördern höhere Wassertemperaturen und die erhöhte Strahlung die biologische Aktivität. Es wird tendenziell mehr Biomasse produziert. Dadurch wird der Sauerstoffgehalt im Tagesverlauf stärker schwanken als heute. Am Tag wird mehr Biomasse produziert, welche Sauerstoff freisetzt. In der Nacht wird mehr Sauerstoff veratmet, was Sauerstoff entzieht. Kraut- und Algenwachstum werden aber durch die Abflussdynamik und Hochwasser sowie durch Beschattung etc. reguliert, so dass nicht mit einer zusätzlichen Verkrautung und Veralgung der Fliessgewässer zu rechnen ist.

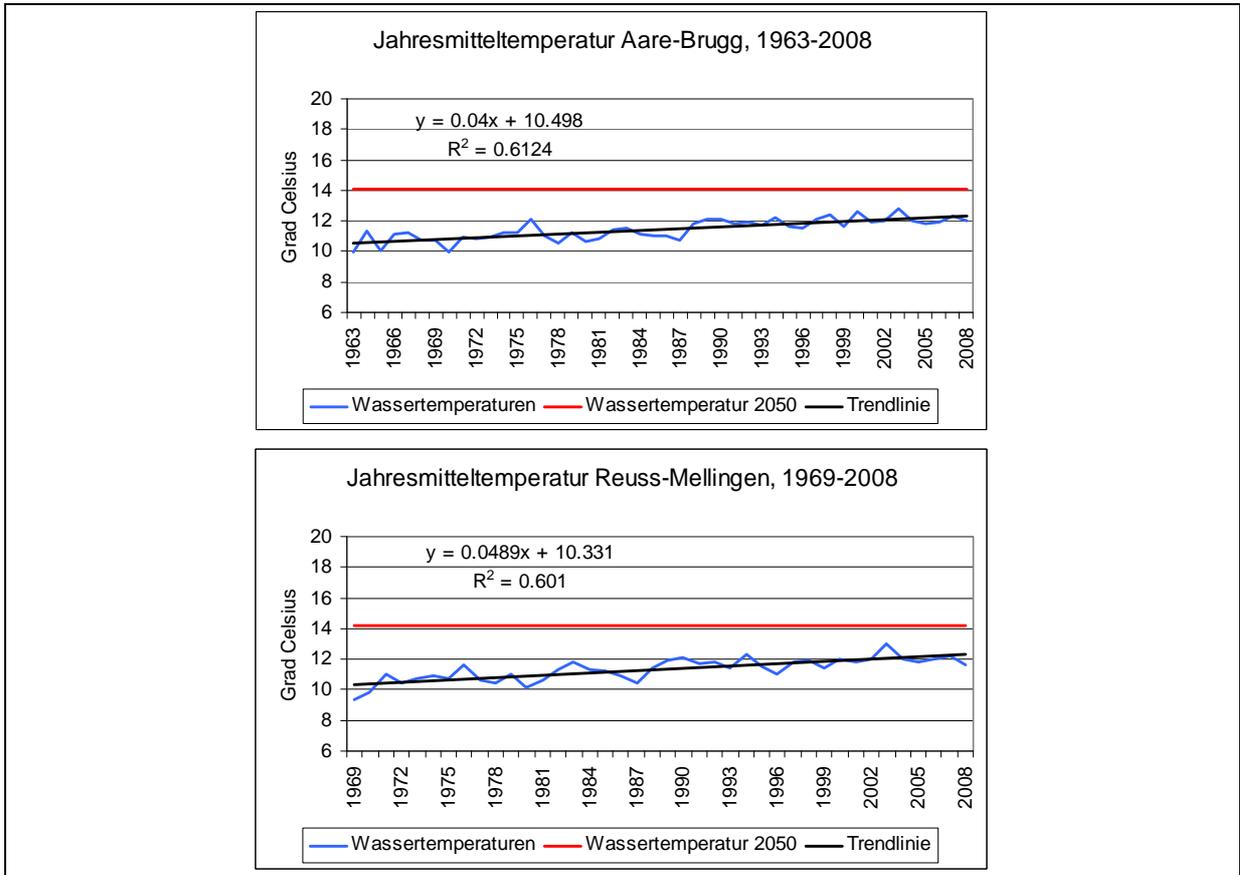


Abbildung 10: Jahresmitteltemperatur Aare und Reuss mit berechneter Temperaturangabe für 2050. Grundlage ist die Annahme einer Erwärmung um 2°C von 1990 bis 2050 (OcCC 2007), (Datenquelle: BAFU).

Im Hallwilersee reguliert das Nährstoffangebot das Wachstum von Kraut und Algen. Als Folge der Überdüngung beeinträchtigte übermässiges Algenwachstum die Wasserqualität des Hallwilersees während Jahrzehnten (vgl. auch Infobox 10). Die Sanierungsmassnahmen haben seit 1986 die Wasserqualität deutlich verbessert. Der Phosphorgehalt ging um mehr als 80% zurück und erreicht heute fast die Zielvorgaben. Das bereits niedrige und in Zukunft noch niedrigere Nährstoffangebot begrenzt das Wachstum von Biomasse. Deshalb wird künftig die Biomasse trotz klimabedingter Erwärmung des Wassers nicht zunehmen. Längerfristig kann die künstliche Sauerstoffzufuhr im Hallwilersee aufgehoben werden, wenn die Sauerstoffzehrung zurückgegangen ist.

Steigende Temperaturen führen zu einer stabileren Schichtung in den Mittellandseen. Die Durchmischungsereignisse im Winter werden voraussichtlich seltener und kürzer. Dadurch gelangt weniger Sauerstoff ins Tiefenwasser und das Risiko von Sauerstoffmangel im See steigt. Untersuchungen am oberen Zürichsee haben gezeigt, dass infolge milder Winter ein statistisch signifikantes Sauerstoffdefizit im Tiefenwasser auftritt (Rempfer et al. 2009). Die Situation im oberen Zürichsee ist mit derjenigen im Hallwilersee vergleichbar. Infolge dieser klimabedingt beeinträchtigten Durchmischung im Hallwilersee wird die Zirkulationshilfe, wel-

che im Winter Druckluft ins Tiefenwasser einträgt, von einer zeitlich begrenzten Aufgabe zu einer Daueraufgabe.

**Infobox 10: So funktioniert ein See**

„Durch die Sonneneinstrahlung im Frühjahr und Sommer erwärmt sich das Oberflächenwasser, wird dadurch leichter und schichtet sich über dem kalten Tiefenwasser ein. Die Schichtung hat zur Folge, dass sich Oberflächenwasser mit Tiefenwasser kaum mehr mischt. Im Oberflächenwasser nutzen Algen Sonnenlicht zum Wachstum (Photosynthese). Dabei wird Sauerstoff gebildet. Dies führt teilweise zu einer Sauerstoffübersättigung. Sterben die Algen, sinken sie ins Tiefenwasser ab und fallen auf den Seegrund. Bakterien bauen dieses organische Material ab und verbrauchen dabei Sauerstoff. Bei übermässigem Algenwachstum in einem überdüngten See entsteht mehr organisches Material, als Sauerstoff im Tiefenwasser für diesen Abbau vorhanden ist. Der Sauerstoff wird vollständig aufgebraucht. Dies schränkt den Lebensraum für Fische und tierische Kleinlebewesen am Seegrund stark ein. Im Herbst und Winter kühlt das Oberflächenwasser wieder ab und beginnt sich mit dem Tiefenwasser zu mischen. Sauerstoff gelangt dadurch wieder ins Tiefenwasser.“ (Stöckli und Märki, 2007)

#### 4.7.5 Niedrigwasser

Bei den Flüssen ist der beobachtete Trend zur Milderung der Niedrigwasserextreme im Winter im 21. Jahrhundert fortführbar (vgl. Kapitel 4.4). Bei den Bächen dürfte sich die Niedrigwassersituation infolge zunehmender trocken-heisser Sommer verschärfen.

Gemäss OcCC (2007) müssten im Mittelland bis 2050 im Extremfall mit durchschnittlichen Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode (April bis September) von weniger als 500 mm (gegenüber mehr als 600 mm heute), wochenlangen kritischen Bodenwasserzuständen und einer Zunahme von Sommerdürren gerechnet werden. Als Konsequenz wäre dann vielerorts eine Bewässerung öfter nötig (vgl. Kapitel 11, Ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft), da der Wasserbedarf vieler Landwirtschaftskulturen (Getreide, Hülsenfrüchte, Hackfrüchte, Ölsaaten) während der Wachstumsperiode mit 400 – 700 mm relativ hoch ist. Um eine künstliche Bewässerung zu umgehen, könnte man auf weniger wasserbedürftige Kulturen ausweichen.

Aus ökologischer Sicht sind durch Niedrigwasser die Fische am stärksten gefährdet, da Niedrigwasser häufig mit höheren Temperaturen und geringerem Sauerstoffgehalt einhergeht und die Durchgängigkeit der Gewässer für Fische unterbrochen sein kann (vgl. Kapitel 4.6 und 8, Jagd und Fischerei).

#### 4.7.6 Hochwasser

Im Kapitel 2.2 ist erwähnt, dass durch den Klimawandel die Niederschläge im Sommer zurückgehen und im Winter zunehmen werden. Die Schneegrenze wird ansteigen. Deshalb fallen die Niederschläge im Winter vermehrt in Form von Regen statt Schnee und werden sofort abflusswirksam. Die Verdunstung ist im Winter zudem gering, so dass keine merkli-

chen Abnahmen des Abflusses der Verdunstung zuzuschreiben sind (OcCC 2007). Der erhöhte Niederschlag im Winter führt weiter zu stärker gesättigten Böden. All diese Faktoren tragen dazu bei, dass in Zukunft im Winter häufigere und höhere Hochwasserspitzen zu erwarten sind (Hänggi et al. 2009, KOHS 2007, OcCC 2007).

Im Sommer ist die Speicherfähigkeit der Böden durch verringerte Niederschläge und höhere Verdunstung erhöht. Deshalb könnten die Hochwasser im Sommer moderater ausfallen (Hänggi et al. 2009, KOHS 2007). Dieser Vermutung bezüglich des künftigen Trends, stehen die Erfahrungen der letzten beiden Hochwasser im Aargau, welche jeweils im Sommer aufgetreten sind, gegenüber. Allerdings handelt es sich bei diesen Sommerhochwasser nicht um einen gesicherten statistischen Trend (siehe auch Infobox 9).

Detaillierte Betrachtungen im Rahmen der Studie „Überlastfall Reusstal – Machbarkeitsstudie Hochwasserschutz Reusstal“, 2008, zeigen am Beispiel des Pegels der Reuss in Mühlau, dass in Zukunft die Spitzenabflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden höher liegen als heute (vgl. Tabelle 4). Die Gründe für diese erwarteten höheren Spitzenabflüsse sind: Die Sanierung des Reusswehrs in Luzern und die Vereinbarung der Kantone AG, ZG, ZH und LU betreffend Begrenzung des Seeabflusses, die wasserbaulichen Massnahmen an der Kleinen Emme und an der Reuss und ein eventueller Effekt des Klimawandels (Basler und Hofmann 2008).

Wiederkehrperiode	Spitzenabflusswerte Reuss Mühlau heutige Situation (2005/2006) $Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	Spitzenabflusswerte Reuss Mühlau künftige Situation $Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)
dreissig-jährliches Hochwasser HQ <sub>30</sub>	700	730
hundert-jährliches Hochwasser HQ <sub>100</sub>	810	850
dreihundert-jährliches Hochwasser HQ <sub>300</sub>	910	1050
Extremhochwasser EHQ	1050 – 1200	1200

Tabelle 4: Spitzenabflusswerte der Reuss bei Mühlau für verschiedene Wiederkehrperioden für die frühere Situation, die heutige Situation (von Bund und den Kantonen AG, ZG, ZH und LU als Projektgrundlage festgelegt) sowie für die künftige Situation (unter Berücksichtigung Sanierung Reusswehr Luzern, Vereinbarung Kantone betreffend Begrenzung Seeabfluss, Ausbau Kleine Emme und Reuss, eventueller Effekt Klimaänderung), (Basler und Hofmann 2008).

Auch die in Kapitel 4.5.1 beschriebene und in Abbildung 7 dargestellte Entwicklung lässt vermuten, dass die Spitzenabflussmengen für verschiedene Wiederkehrperioden in Zukunft weiter ansteigen.

#### 4.7.7 Feststoffe und Schwemmholz

In den Alpen nimmt das Volumen der erosionsgefährdeten Feststoffe zu, weil sich die Gletscher zurückziehen und der Permafrostboden auftaut. Zudem fällt mehr Niederschlag in Form von Regen statt Schnee. Diese Faktoren tragen dazu bei, dass der Feststofftransport zunimmt (KOHS 2007).

Die Problematik des Schwemmholzes bei Hochwasser ergibt sich bei Wehren und Kraftwerken durch die Bildung eines Schwemmholzteppichs. Wurzelstöcke sind gefährliche Komponenten bei der Verklausung einer Brücke, da an ihnen Schwemmholz hängen bleibt (vgl. Kapitel 13.3). Bei Bächen zeigt sich oft das Problem zu enger Querschnitte von verrohrten Passagen (Denzler 2007).

#### 4.7.8 Hochwasserschutz

In Kapitel 4.7.6 wird dargelegt, dass künftig tendenziell im Winter mit einer Zunahme von Hochwasserspitzen und Hochwasservolumen zu rechnen ist. Der Feststofftransport wird insgesamt zunehmen. Saisonal erhöhte Hochwasserabflüsse und grössere Sedimentfrachten bedingen künftig entsprechende Gerinneabschnitte und Ablagerungsräume. Dies bedeutet, dass Fließgewässer tendenziell mehr Raum als heute benötigen (KOHS 2007). Gemäss KOHS fehlen in der Schweiz zurzeit verlässliche Grundlagen, um die Folgen der Klimaänderung bei der Ermittlung der Dimensionierungsgrössen für Hochwasserschutzmassnahmen quantitativ zu berücksichtigen. Die heute gültigen und in Kapitel 4.5.3 genannten Grundsätze des Hochwasserschutzes, obwohl nicht spezifisch auf Klimaänderungen ausgerichtet, weisen eine grosse Flexibilität auf. Im Hinblick auf den Klimawandel kommt aber der Betrachtung der Überlastszenarien, welche den Dimensionierungsfall bei Schutzmassnahmen deutlich übertreffen, eine grosse Bedeutung zu (KOHS 2007).

Im Kanton Aargau sind wichtige Elemente des Hochwasserschutzes realisiert oder in Planung, wie zum Beispiel Rückhaltebecken, permanente und mobile Massnahmen aufgrund der Ereignisse 2005 und 2007, Renaturierungsprojekte, Umbau und Automatisierung der kantonalen Hydrometriestationen, etc.

#### 4.8 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Das Abflussregime der Flüsse und Bäche wird, wie in Kapitel 4.2.2 dargelegt, durch klimatische und anthropogene Faktoren beeinflusst. Der Mensch speichert Wasser in Speichersseen, reguliert Seespiegel, nutzt das Wasser für die Energieproduktion in Laufkraftwerken (Restwasserstrecken) und entnimmt Wasser. Insgesamt wird das Abflussregime aber durch klimatische Faktoren dominiert.

## 5 Grundwasser und Wasserwirtschaft

### 5.1 Einleitung

67% des Trink- und Brauchwasserbedarfs werden im Aargau aus Grundwasser gedeckt, 32% aus Quellwasser. 1% wird von ausserhalb des Kantons Aargau bezogen (Departement für Bau, Verkehr und Umwelt, Aargauisches Versicherungsamt 2007).

90% der Wasserversorgungen im Aargau werden als Eigenwirtschaftsbetriebe der Gemeinden geführt (Departement für Bau, Verkehr und Umwelt, Aargauisches Versicherungsamt 2007). Im Aargau gibt es insgesamt 219 Wasserversorgungen. 17 Versorgungen können ihre Trinkwasserversorgung ausschliesslich mit Quellwasser sicherstellen. Es bestehen insgesamt 394 Netzverbindungen, wovon 214 als Notverbindungen deklariert sind. Es darf davon ausgegangen werden, dass heute jede Versorgung mit einer anderen zusammengeslossen ist.

Die Wasserversorgung zeichnet sich dadurch aus, dass es in der Regel weder zeitliche noch mengenmässige Einschränkungen bei der Verfügbarkeit von Trink- und Brauchwasser gibt und dass das öffentlich bereitgestellte Wasser, meist ohne Aufbereitungsmassnahmen, Trinkwasserqualität aufweist. Zu beurteilen ist, wie sich der Klimawandel auf diese drei wesentlichen Aspekte der Versorgungssicherheit auswirkt.

Bei der Siedlungsentwässerung wird das unverschmutzte Dach- und Oberflächenwasser gemäss GSchG<sup>1</sup> möglichst versickert oder über Trennsystemkanalisationen direkt in ein Oberflächengewässer eingeleitet. 85% der Gemeinden verfügen über eine genehmigte Generelle Entwässerungsplanung (GEP), bei den übrigen sind GEP in Bearbeitung. Somit kommt das Dach- und Oberflächenwasser auch der Grundwasserneubildung zu Gute. Ein grosser Teil des bestehenden Baugebietes wird noch im Mischsystem entwässert, wo häusliches, gewerbliches und industrielles Schmutzwasser und das Niederschlagswasser gemeinsam in einer Kanalisation abgeleitet werden. Die Regenentlastungen der Mischsystem-Kanalisationen werden in der Regel ab dem 2-fachen Trockenwetterabfluss wirksam. Sie leiten bei Starkregen Abwasser, vermischt mit Regenwasser direkt in Oberflächengewässer ein. Das in die Oberflächengewässer gelangende Abwasser kann in verdünnter Form ins Grundwasser infiltrieren.

In kleinen Vorflutern von Abwasserreinigungsanlagen ist bei Niedrigwasser der Anteil an geklärtem Abwasser relevant.

Zu beurteilen ist, wie weit sich der Klimawandel auf die Infiltration von abwasserbelastetem Flusswasser ins Grundwasser auswirkt.

---

<sup>1</sup> Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991, Art. 7, Abs. 2.

## 5.2 Quellwasser

356 Quelfassungen und Quellgruppen werden für die öffentliche Wasserversorgung genutzt. Die summierte, mittlere Ergiebigkeit aller Versorgungen betrug in den Wasserjahren 1997/98 und 1998/99 im Mittel 23'206'073 m<sup>3</sup>/Jahr (Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Aargauisches Versicherungsamt 2007). Das entspricht knapp 32% der Gesamtgewinnung aus Quellwasser, Grundwasser und ausserkantonalen Zukäufen.

Das genutzte Quellwasser im Aargau stammt in der Regel aus Felsgesteinsaquiferen, d.h., porösen und klüftigen Sandsteinen im Mittelland und klüftigem bis verkarstetem Kalk im Jura, deren Basis über den Talsohlen liegt. Das bewirkt, dass die Quellschüttungen jahreszeitlich und bei oberflächennahen Einzugsgebieten auch entsprechend dem Witterungsverlauf stark schwanken können. Bei längerer Trockenheit können insbesondere Karstwasserquellen und Quellen mit kleinen Einzugsgebieten versiegen. Gemeinden ohne Grundwasserpumpwerke sind daher in Trockenjahren darauf angewiesen, dass sie Fremdwasser in ihr Versorgungsnetz einspeisen können.

## 5.3 Lockergesteinsgrundwasser und hydrologische Regionen

Die Lockergesteinsgrundwasservorkommen lassen sich in verschiedene hydrologische Regionen einteilen, in welchen sich das Grundwasserdargebot bei einer Klimaerwärmung anders entwickeln wird.

Bei den 104 im hydrologischen Jahrbuch des Kantons Aargau erfassten Grundwasserfassungen sind im Wesentlichen drei Ganglinientypen des Grundwasserspiegels zu unterscheiden, welche verschiedenen hydrologischen Regimes entsprechen:

- Grundwasserganglinien in Tälern des Mittellandes mit gut durchlässigen kiesigen Grundwasserleitern und kleinen bis mittleren Fliessgewässern (Bäche Bünz, Wigger, Suhre, Wyna, Aabach, Surb), Typ 1
- Grundwasserganglinien in den Haupttälern mit gut durchlässigen, kiesigen Grundwasserleitern und grossen Flüssen mit Ex- und Infiltrationsstrecken (Aare, Reuss, Limmat, Rhein), Typ 2
- Grundwasserganglinien in Tälern des Jura (Fricktal) mit mittel bis gut durchlässigen Grundwasserleitern und kleinen Oberflächengewässern, mit Karstwasserzuflüssen von den Talseiten in die Lockergesteinsgrundwasserströme, Typ 3

Die Fassungen in den Tälern mit Bächen (Typ1, vgl. Abbildungen 12 – 14), welche zur Speisung der Grundwasservorkommen beitragen, weisen eine typische Jahresperiodizität auf, mit einem Maximum Frühling/Frühsummer und einem Minimum im Winter, wobei die Auffüllphasen des Grundwasserleiters deutlich weniger Zeit beansprucht als der Spiegelrückgang zwischen Sommer und Winter. Die Speisung der Grundwasservorkommen erfolgt massgebend durch die Infiltration der Oberflächengewässer, in zweiter Linie durch die direkte Versi-

ckerung von Niederschlagswasser während des Winterhalbjahres und durch unterirdische Zuflüsse von den seitlichen Talhängen. Bedingt durch die Infiltration der Oberflächengewässer wirken sich im Sommerhalbjahr insbesondere lang anhaltende Niederschlagsperioden oder Trockenphasen auf die Grundwasserstände aus. So stiegen im Jahr 2006 aufgrund der nassen Monate Juli und August die Grundwasserspiegel im Spätsommer an und erreichten im September ein Maximum. Die Schwankungsamplituden der Grundwasserspiegel betragen insbesondere in den oberen Talabschnitten mehrere Meter pro Jahr.

Die Grundwasserspiegel in den grossen Flusstälern sind durch die Pegel der Vorfluter Rhein, Aare, Reuss und Limmat beeinflusst (Typ 2). Die Grundwasser führenden Talschotter werden wesentlich durch die grossen Flüsse gespeist. Entsprechend sind die Grundwasserspiegel vom Abflussregime der Flüsse abhängig und weisen neben einer jahreszeitlichen Periodizität auch kurzfristige Schwankungen entsprechend dem Witterungsverlauf auf. Wo die Pegel der Flüsse über die Flusskraftwerke reguliert sind, schwanken die Grundwasserspiegel flussnah häufig nur im Dezimeter-Bereich.

In den Tälern des Jura, beispielsweise im Fricktal, werden die Lockergesteinsgrundwasserleiter ausser durch die direkte Versickerung der Niederschläge im Winterhalbjahr und die Infiltration der Oberflächengewässer wesentlich durch unterirdische Karstwasserzuflüsse gespeist, welche aus der raschen, ganzjährig möglichen Versickerung von Niederschlagswasser im Einzugsgebiet stammen (Typ 3). Dadurch sind den saisonalen Spiegelschwankungen, welche ähnlich verlaufen wie bei den Mittellandtälern mit grösseren Bächen, kurzfristige Spiegelschwankungen überlagert, die das Witterungsgeschehen im Einzugsgebiet widerspiegeln.

Die Abbildungen 11, 12 und 13 zeigen die charakteristischen Ganglinien für die drei hydrologischen Grundtypen der im Aargau stark genutzten Grundwasservorkommen.

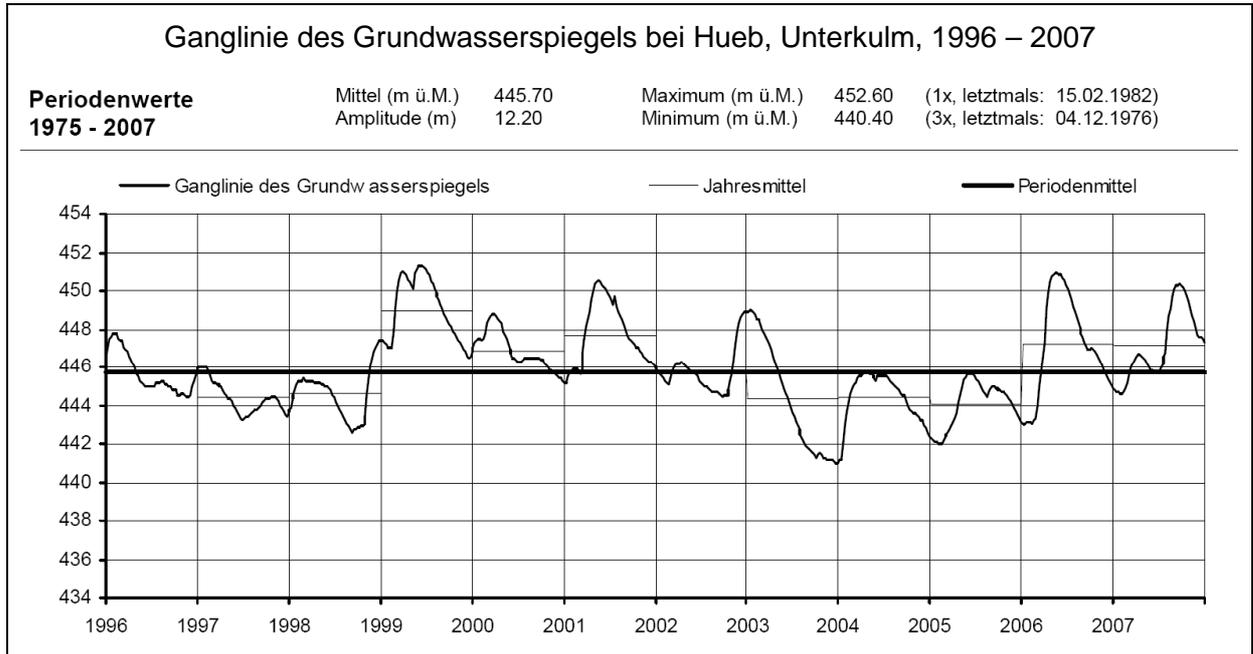


Abbildung 11: Ganglinie 1996 – 2007 des Grundwasserspiegels des Grundwasserpumpwerks Hueb, Unterkulm im Wynental (Typ 1 – Ganglinie), (Hydrologisches Jahrbuch BVU).

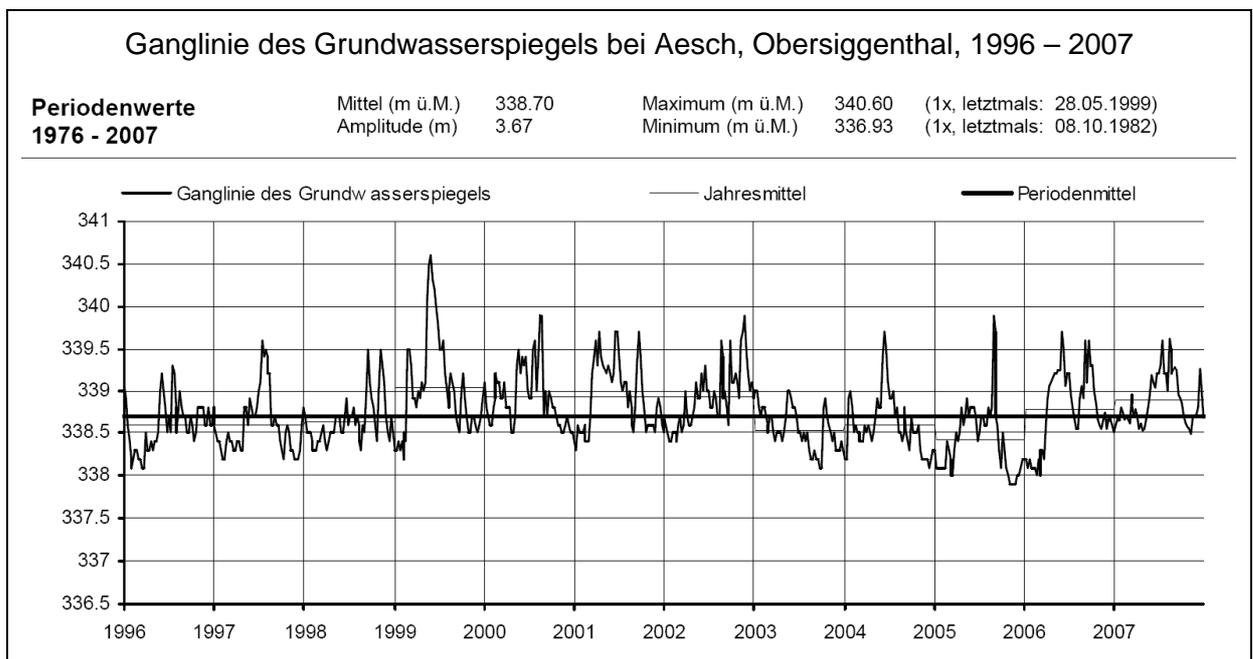


Abbildung 12: Ganglinie 1996 – 2007 des Grundwasserspiegels des Grundwasserpumpwerks Aesch, Obersiggenthal (Typ 2 – Ganglinie), (Hydrologisches Jahrbuch BVU).

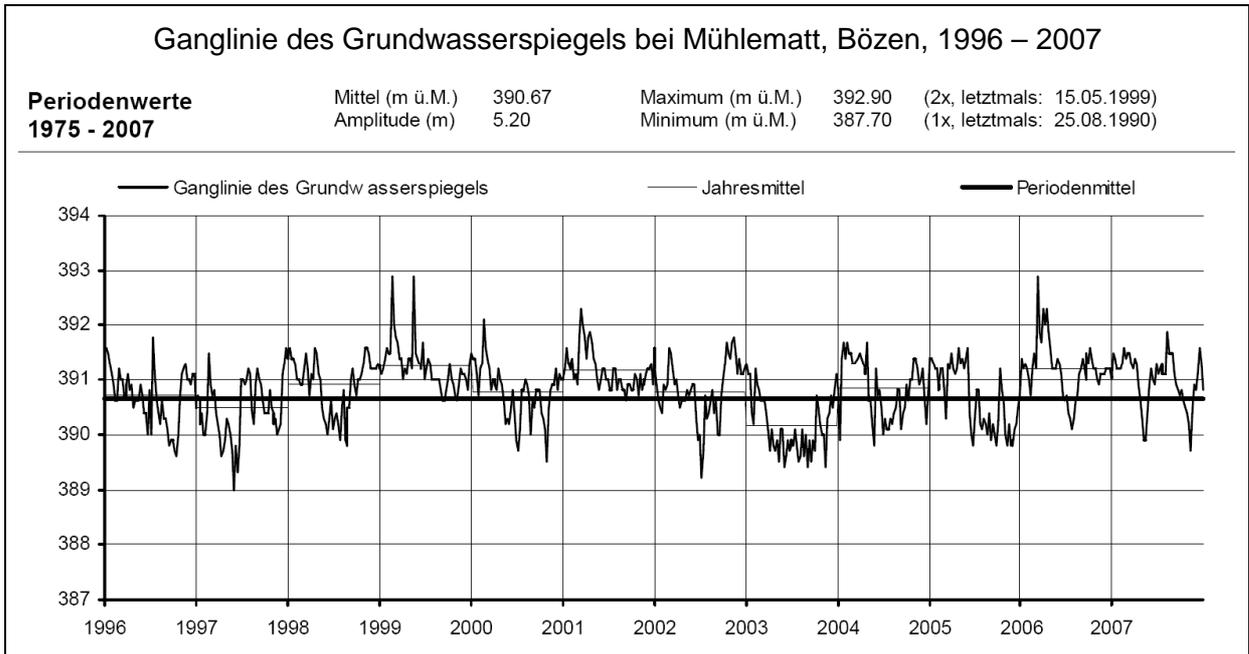


Abbildung 13: Ganglinie 1996 – 2007 des Grundwasserspiegels des Grundwasserpumpwerks Mühlematt, Bözen im Fricktal (Typ 3 – Ganglinie), (Hydrologisches Jahrbuch BVU).

#### 5.4 Grundwasserqualität

Die Grundwasserqualität im Kanton Aargau wird regelmässig mikrobiologisch und bezüglich der wichtigsten An- und Kationen (insbesondere Härtebildner und Stickstoffverbindungen) überwacht. Auch Pflanzenschutzmittel sind teilweise in das Regel-Monitoring der Trinkwasserfassungen einbezogen. So wird der Gehalt an s-Triazinen, wie Atrazin, im Trinkwasser, regelmässig durch das Kantonale Laboratorium analysiert. Nach Rückständen anderer häufig eingesetzter Pflanzenschutzmittel wurde nur ausnahmsweise gesucht (BVU 2001). Der Gehalt an hormonaktiven Substanzen im Trinkwasser wurde bisher nicht abgeklärt (Schaub 2009a), findet aber als Risiko in der Gewässerschutzstrategie Aargau Erwähnung (BVU 2004).

Bezüglich der Wasserqualität wurde bisher stark auf den Gehalt an mineralisiertem Stickstoff in Form von Nitrat als Leitindikator abgestellt (vgl. Infobox 11), welcher einen Toleranzwert von 40 mg/l nicht überschreiten darf (BVU 2004). Erhöhte Nitratbelastungen über dem Qualitätsziel von 25 mg/l treten insbesondere im Bünztal, im unteren Reusstal und im Suhrental auf (Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Umwelt: Karte der Nitratbelastung des Aargauer Grundwassers. Durchschnitt der Jahre 2000, 2001 und 2002).

Die Grundwasserqualität kann durch lang anhaltende Trockenperioden während der Vegetationszeit wie folgt beeinflusst werden:

- Verminderte Auswaschung von gelösten Stoffen und Partikeln aus dem Boden und damit deren Anreicherung im Boden
- Starke Auswaschung von während Trockenphasen im Boden angereicherten löslichen Schadstoffen durch Starkniederschläge am Ende von Trockenperioden
- Veränderter Stoffeinsatz der Landwirtschaft in Trockenperioden
- Verstärkte künstliche Bewässerung
- Infiltration von Flusswasser aus Bächen mit hohen Anteilen an geklärtem Abwasser.

Diese Vorgänge werden sich insbesondere bei geringem Flurabstand des Grundwassers auf die Grundwasserqualität auswirken.

#### **Infobox 11: Nitrat**

Nitrat ist eine Stickstoff-Sauerstoff-Verbindung ( $\text{NO}_3^-$ ). Pflanzen benötigen den Stickstoff des Nitrates zum Aufbau von Eiweiss. Nitrat entsteht bei der Mineralisierung von abgestorbenem Pflanzenmaterial und von Hofdünger im Boden und kann durch die Versickerung von Niederschlagswasser ins Grundwasser gelangen. Das grösste Auswaschungsrisiko besteht im Winterhalbjahr und bei Starkregenernissen nach langen Trockenperioden.

Nitrat selbst ist in den Grössenordnungen der Grenzwerte vollkommen ungiftig. Die Ursache für gesundheitliche Risiken liegt in der Gefahr einer Reduktion des Nitrats zu Nitrit und die Bildung von krebserregenden Nitrosaminen. Diese ist gegeben, wenn der Darm durch entsprechende Bakterien besiedelt ist, die eine solche Reduktion durchführen können. Die Erstlingsflora des Darmes bei Säuglingen kann auch nitritbildende Bakterien enthalten, die in einer Verbindung mit Hämoglobin zu Methämoglobinämie führen können.

## 5.5 Hitzesommer 2003

### 5.5.1 Grundwasserdargebot

Das trockene und im Sommer sehr warme Jahr 2003 führte in den Tälern ohne grosse Flüsse zu einem überdurchschnittlichen Rückgang der Grundwasserspiegel, da der Abfluss der Bäche stark nachliess und durch die Entnahme von Bewässerungswasser zusätzlich reduziert wurde. Dadurch ging auch die Infiltration von Bach- und Flusswasser drastisch zurück. Gleichzeitig stieg der Wasserverbrauch im ganzen Kanton an. Ab Mitte Juli wurden durch das Departement Bau, Verkehr und Umwelt die Bewilligungen zur Wasserentnahme aus Oberflächengewässer schrittweise sistiert. Als Interventionsgrenze wurde die Mindestrestwassermenge gemäss GSchG, Art. 31 Abs. 1 definiert. Die Sistierungen erfolgten nach Einzugsgebieten. Sie wurden erst Ende 2003 wieder aufgehoben (BAFU, BWG, Meteo Schweiz, 2004).

Die vollständige Wiederauffüllung des Grundwasserspeichers hat anschliessend zwei Jahresperioden gedauert. Erst im Frühling 2006 wurden übliche Frühjahreshochstände wiederum erreicht (siehe Abbildung 11).

In den grossen Flusstälern war auch im Sommer 2003 die Grundwasseranreicherung durch die Alpenflüsse sichergestellt. Erst ab Ende August fielen die Grundwasserstände wegen dem Ende der Schneeschmelze sowie der abnehmenden Gletscherschmelze und der dadurch geringeren Wasserführung der Flüsse in diesen Gebieten ab. Als Folge der lang anhaltenden Niederschläge im Oktober 2003 hatten sie sich bis im Winter wiederum erholt (BAFU, BWG, Meteo Schweiz, 2004).

In den Tälern des Jura hatten sich im trockenen und warmen Jahr 2003 rasch tiefe Grundwasserstände eingestellt. Durch die rasche Zuströmung von Karstwasser ab dem Spätherbst konnten sich die Grundwasserstände bis im Winter 2003/2004 wieder erholen.

### 5.5.2 Grundwasserqualität

Beispiel einer kritischen Grösse der Grundwasserqualität ist das Nitrat (vgl. Infobox 11), das als Pflanzennährstoff aus den Böden ausgewaschen werden kann. Während der Vegetationsperiode 2003 setzte das Pflanzenwachstum als Folge der Trockenheit in den Sommermonaten praktisch vollständig aus. Die Pflanzen nahmen nur wenig Stickstoff auf, so dass sich dieser im Wurzelraum anreicherte. Der milde Spätherbst ermöglichte die Mineralisierung eines grossen Teils des Stickstoffs zu Nitrat. Der sonst über die Vegetationsperiode verteilte Gülleaustrag war durch die Trockenheit eingeschränkt und fand erst im Herbst statt. So verfügten die Böden im Herbst 2003 über sehr grosse Stickstoffvorräte, die mit dem Einsetzen der Oktoberniederschläge mobilisiert und insbesondere aus sandigen und flachgründigen Böden rasch ausgewaschen wurden und wegen dem geringen Flurabstand ins Grundwasser gelangten. Entsprechend stieg beispielsweise der Nitratgehalt des Thurtalgrundwassers bei Bischofszell (TG) vom Oktober 2003 bis im Februar 2004 von 10 mg/l auf über 40 mg/l an (BAFU, BWG, Meteo Schweiz 2004).

Auch im Aargau zeigen die Entwicklungen des Nitratgehaltes im Grundwasser der Nitrat-Projektgebiete, dass extreme Witterungsverläufe sich auswirken. Sowohl im Projekt Wohlenschwil wie auch im Birrfeld kam es deswegen in den letzten Jahren wieder zu Anstiegen der Nitratkonzentration, obwohl durch Umstellungen in der Bewirtschaftung das Risiko für Nitratauswaschungen stetig vermindert wurde. Bei grösserem Flurabstand des Grundwassers und grossem Einzugsgebiet einer Fassung (lange Fliesswege und -zeiten des Grundwassers bis zur Fassung) werden Nitratauswaschungseignisse aus dem durchwurzelten Boden zeitlich verzögert in einer Trinkwasserfassung erkennbar. Die Verzögerung kann durchaus Monate bis wenige Jahre ausmachen. Massgebend für die Verzögerung sind die Sickerdauer im ungesättigten Boden und die Verweildauer des Nitrates im Grundwasser, abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Distanz zur Trinkwasserfassung. Untersuchungen im Birrfeld zeigten bereits im Oktober 2003 einen deutlichen Anstieg der Nitratkonzentration des aus dem Wurzelraum austretenden Sickerwassers (Berner et al. 2004). In den Fassungen des Birrfeldes ist erst ab Ende 2005 ein markanter Anstieg des Nitratgehaltes von 25 bis 45 mg NO<sub>3</sub>/l zu beobachten (Abbildung 14).

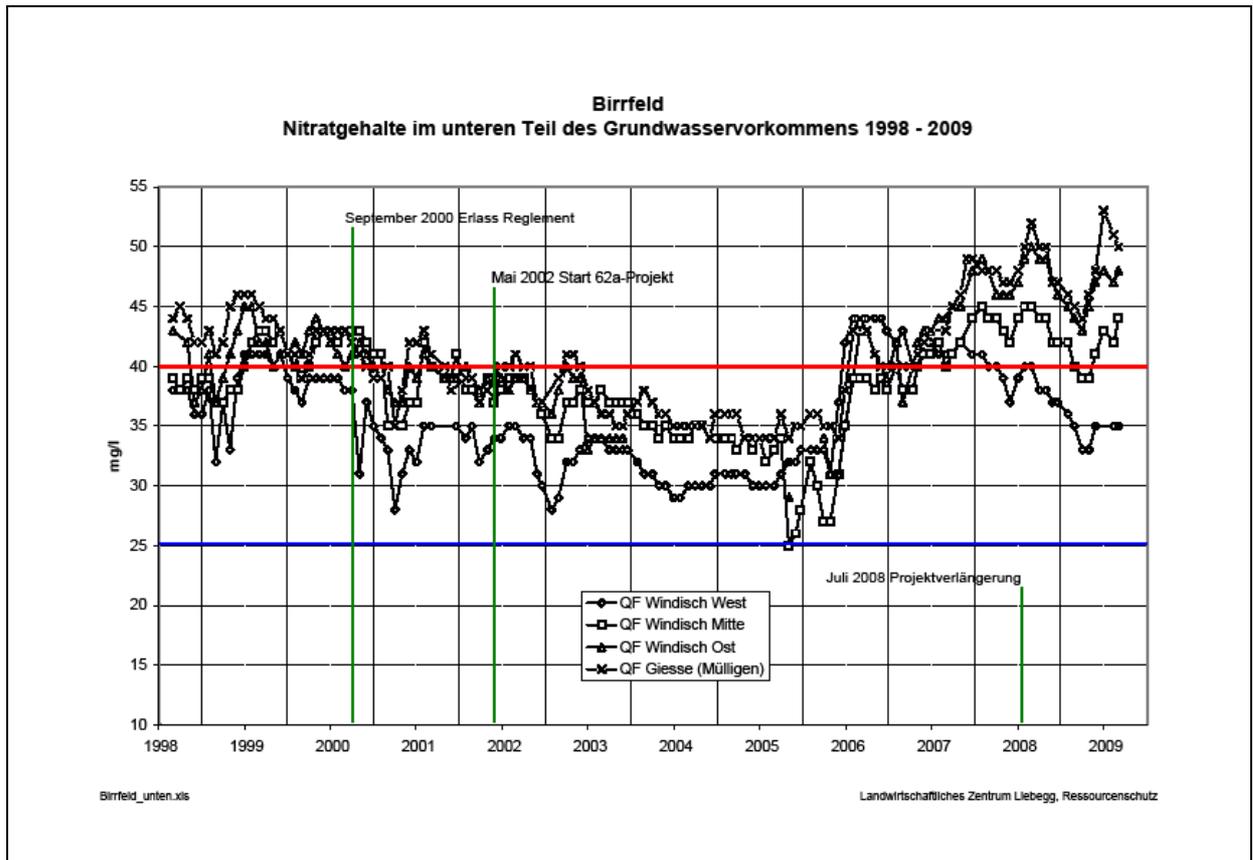


Abbildung 14: Ganglinie 1998 – 2009 des Nitratgehaltes im Birrfeld (Datenquelle: Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg, Ressourcenschutz).

## 5.6 Auswirkungen des Klimawandels

### 5.6.1 Folgen für die Grund- und Quellwassernutzung

Die für den Aargau zu erwartende Klimaentwicklung führt zu durchschnittlich wärmeren und trockeneren Sommern und wärmeren und eher niederschlagsreicheren Wintern (vgl. Kapitel 2). Im Winterhalbjahr wird die Grundwasserneubildung deshalb tendenziell zunehmen. Im Sommer wird sich die Klimaerwärmung mutmasslich in einer grösseren Häufigkeit von trockenen und warmen Sommermonaten vergleichbar mit dem Jahr 2003 zeigen. Für das Grundwasserdargebot wird es entscheidend sein, wie die Grundwasservorkommen auf eine raschere Folge von Jahren mit trockenen Sommern reagieren: Im Sommerhalbjahr ist die direkte Grundwasserneubildung aus Niederschlägen bereits heute gering. Massgebend ist im Sommerhalbjahr daher die Infiltration von Flusswasser in die Aquifere. In Jahren mit trockenen Sommern geht die Neubildung aus Flusswasserinfiltration in den Tälern mit Bächen, die einem pluvialen Abflussregime unterworfen sind, stark zurück. Treten diese alle paar Jahre auf, wie dies 2050 bei einem Szenario mit starker Erwärmung (+ 4.7° in den Sommermonaten gemäss Tabelle 1) der Fall sein kann, wäre in Tälern des Mittellandes ohne grosse Fließgewässer ein langfristiges Absinken der mittleren Grundwasserspiegel zu erwarten,

weil die Erholung der Grundwasserstände mehrere Jahre dauert. In den oberen Talbereichen mit grossen Spiegelschwankungen können die mittleren Spiegel um mehrere Meter absinken.

Dadurch steigt insbesondere bei Grundwasserbrunnen in grosser Entfernung zum Vorfluter die Gefahr, dass die Fördermengen stark reduziert werden müssen. So genannt „unvollkommene Brunnen“, die nicht bis an die Sohle des Aquifers reichen, können zeitweise trocken fallen.

Eine schwache bis mittlere Erwärmung (2.7°C während der Sommermonate gemäss Tabelle 1) dürfte insgesamt zu einer grösseren Spanne zwischen Maximal- und Minimalständen des Grundwasserspiegels in den Tälern mit Bächen führen. Einschränkungen der Grundwassernutzung während Trockenjahren sind bei unvollkommenen Grundwasserbrunnen in höher gelegenen Talabschnitten nicht auszuschliessen.

Grundwasserbrunnen in der Nähe der grossen Vorfluterflüsse und in den Haupttälern unterhalb der grossen Seen werden bei allen Erwärmungsszenarien wenig betroffen sein, zumal der Abfluss der grossen Alpenflüsse Aare, Reuss und Limmat an den Seeausläufen reguliert ist. Einzig der Ausfluss des Bodensees ist nicht reguliert. Der Bodensee ist aber der grösste und daher trügste Zwischenspeicher und begünstigt eine ausgeglichene Wasserführung des Rheins. Ebenso wird der bereits heute zu beobachtende Übergang von einem nivalen Abflussregime der grossen Alpenflüsse hin zu einem gemischten, nival-pluvialen Regime zu einer ausgeglicheneren Wasserführung der grossen Flüsse beitragen (siehe Kapitel 4.2.2).

Die Grundwasserentnahmen in den Juratälern werden durch Trockenperioden häufiger eingeschränkt sein. Eine temporär reduzierte Grundwasserförderung kann in diesen Gebieten nicht mit einer vermehrten Quellwassernutzung überbrückt werden, da die Quellschüttungen in den verkarsteten Einzugsgebieten ebenfalls stark auf das kurzfristige Witterungsgeschehen reagieren. Trinkwasserversorgungen, die wesentlich auf Quellwasser basieren, sind in Jahren mit trockenen Sommern besonders bei kleinen oder verkarsteten Einzugsgebieten der Quellen gefährdet, da diese Quellen versiegen. Der Netzverbund gewinnt auch im Hinblick auf den Klimawandel an Bedeutung.

Den Veränderungen bei der Grundwasserneubildung in warmen und trockenen Sommern steht ein markant erhöhter Wasserbedarf während dieser Perioden gegenüber, der örtlich auftretende Mangelsituationen akzentuieren wird (Gander 2009).

#### 5.6.2 Auswirkungen auf die Grundwasserqualität

Von der Qualität her sind die Talgrundwasserströme in Tälern mit kleinen Fließgewässern in den Gebieten mit geringem Flurabstand am unmittelbarsten gefährdet, ebenso Gebiete entlang den Talrändern in den grossen Flusstälern bei kleinem Flurabstand. Entsprechende Gefährdungen sind am ehesten im unteren Aaretal, im Bünztal und im Suhrental bei intensiv landwirtschaftlich genutzten Zuströmbereichen von Trinkwasserfassungen zu erwarten. Un-

ter dieser Voraussetzung kann es beim Einsetzen des Niederschlags im Anschluss an lange Trockenperioden innerhalb weniger Monate zu starken Anstiegen der Nitratkonzentration im Grundwasser kommen.

In den häufiger auftretenden warm-trockenen Sommern ist der Anteil an geklärtem Abwasser insbesondere im Ober- und Mittellauf der grösseren Mittellandbäche erheblich. Er könnte in Extremsituationen bis 100% betragen. Der unerwünschte Eintrag von Abwasserinhaltsstoffen ins Grundwasser erfolgt daher in besonderer Masse durch die Infiltration von Flusswasser während solcher Trockenperioden. Deshalb minimiert der laufende Ausbau von Abwasserverbundsystemen mit regionalen Kläranlagen an grossen Vorflutern und die damit verbundene Aufhebung von Abwasserreinigungsanlagen an kleineren Gewässern die Risiken für die Grundwasserqualität.

Bedingt durch die prognostizierte Zunahme von Starkniederschlägen (vgl. Kapitel 2.3.2) wird in Siedlungen mit Mischsystem-Kanalisationen vermehrt ungeklärtes Abwasser in die Fliessgewässer gelangen und über die Flusswasserinfiltration in verdünnter Form ins Grundwasser.

## 5.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Unabhängig vom Klimawandel sind für die Entwicklung der Grundwasserqualität mutmasslich die folgenden Einflussbereiche massgebend:

- die Entwicklung der landwirtschaftlichen Bodennutzung als Folge von sich ändernden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- die zukünftige Abwasserbelastung von Bächen, welche ins Grundwasser infiltrieren
- die Dichtigkeit der Kanalisationen
- die Sanierung der Altlasten
- Grundwassernutzung zur Wärmegewinnung.

Die landwirtschaftliche Bodennutzung kann je nach Düngereinsatz und Bodenbearbeitung erhebliche Belastungen des Grundwassers bewirken. Werden die Bodenschutzanforderungen gelockert und ist die Landwirtschaft gezwungen, aufgrund sich ändernder wirtschaftlicher Rahmenbedingungen die Bewirtschaftung zu intensivieren, sind wiederum vermehrt negative Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten (BVU 2008).

In Bächen ist die Verdünnung des aus den Kläranlagen und Regenentlastungen der Kanalisationssysteme stammenden Abwassers deutlich schlechter, als in den grossen Alpenflüssen. Entsprechend schwankt auch die Wasserqualität der Bäche stark. Aus diesem Grund strebt der Kanton Aargau eine Entlastung der schwachen Vorfluter mit Abwasser an (BVU 2004).

Die Dichtigkeit der Kanalisationen hängt von der Sicherstellung des Unterhalts sowie von der Ausführungsqualität bei deren Bau ab. Um den Gesamtzustand des Abwassernetzes zu

verbessern, werden unter anderem neu erstellte Kanalisationen im Sinne einer Bauabnahme kontrolliert (BVU 2008).

Das Risiko von Auswaschungen von gewässergefährdenden Stoffen ins Grundwasser aus Altlasten wurde über den Kataster belasteter Standorte gemäss USG<sup>2</sup> eingegrenzt. Die Kantone haben dafür zu sorgen, dass Deponien und andere durch Abfälle belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen. Die entsprechende Massnahmen werden im Aargau umgesetzt (BVU 2008).

Weiter kann die Entwicklung der Grundwassernutzung zur Wärmeengewinnung in stark besiedelten Gebieten zu einer messbaren und unerwünschten Veränderung der Grundwassertemperatur und damit der Grundwasserqualität führen. Steigende Entnahmen zu Brauchwasserzwecken können die Trinkwassergewinnung auch mengenmässig konkurrenzieren (Schaub 2009b).

Kiesabbaugebiete könnten sich nur dann negativ auf die Grundwasserqualität auswirken, wenn die Gruben belastetes Auffüllmaterial enthalten. Das Volumen der Grundwasserleiter würde durch den Kiesabbau nur dann verkleinert, wenn ein Abbau unter dem höchsten Grundwasserspiegel zulässig wäre. Ein solcher ist aber in Gebieten mit nutzbaren Grundwasservorkommen gemäss GSchG untersagt.

Auf das Grundwasserdargebot kann sich ferner die permanente Zunahme der Flächenversiegelung in den Tälern langfristig negativ auswirken, da die Bebauung mit Hoch- und Tiefbauten den Oberflächenabfluss zu Lasten der Grundwasserneubildung verstärkt.

---

<sup>2</sup> Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG)

## 6 Luft

### 6.1 Einleitung

Die anthropogenen Treibhausgasemissionen beeinflussen massgeblich das heutige und künftige Klima (vgl. Kapitel 3). Das Klima und die Witterung wiederum beeinflussen die Immissionssituation im Aargau. Von Interessen sind vor allem die Ozon-, und Stickstoffdioxidsituation im Sommer und die Feinstaub- und Stickstoffdioxidsituation bei austauscharmen Wetterlagen, so genannte Inversionslagen, im Winter.

Die künftige Qualität der Luft im Aargau wird vor allem durch klimaunabhängige Entwicklungen geprägt, namentlich durch die technologische und wirtschaftliche Entwicklung und die Luftreinhaltepolitik mit der Umsetzung des Massnahmenplans Lufthygiene. Längerfristig kommt der künftigen Rolle fossiler Brenn- und Treibstoffe eine grosse Bedeutung zu.

### 6.2 Gesamtschweizerische Emission von Treibhausgasen

Die Schweiz emittierte 2007 gut 51 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente an Treibhausgasen. Dabei werden folgende Treibhausgase berücksichtigt und in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet: Kohlendioxid – Emissionen aus fossilen Energieträgern und Prozessemissionen, Methan, Lachgas und so genannte synthetische Gase (teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe, perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen machen mit knapp 44 Mio. Tonnen den weitaus grössten Teil an den Treibhausgasemissionen aus.

Hauptemittent der CO<sub>2</sub>-Äquivalente ist die Verursachergruppe Verkehr, gefolgt von der Verursachergruppe Industrie und den Haushalten (vgl. Abbildung 15).

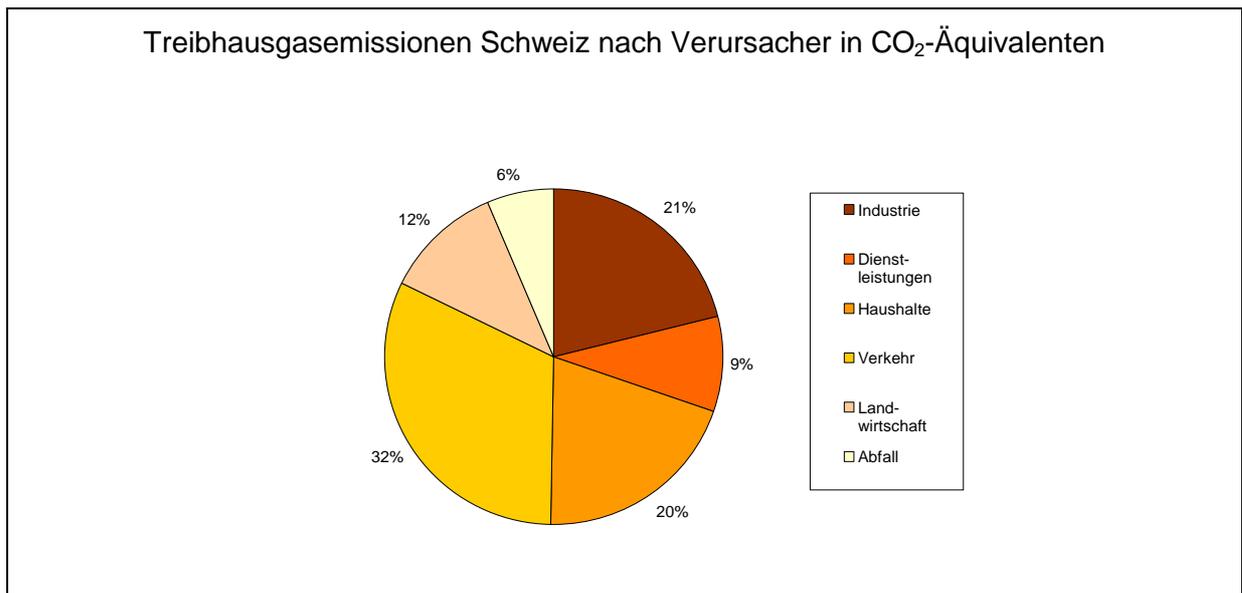


Abbildung 15: Treibhausgas-Emissionen gemäss Kyoto-Protokoll aufgeteilt nach Verursacher im Jahr 2007. Der Internationale Flugverkehr und Senkenleistungen sind nicht berücksichtigt (BAFU 2009).

Mit dem CO<sub>2</sub>-Gesetz wird in der Schweiz der CO<sub>2</sub>-Ausstoss bis zum Jahr 2010 um 10% gegenüber dem Wert von 1990 gesenkt werden (vgl. auch Kapitel 2.6 und Abbildung 16). Für Brenn- und Treibstoffe gelten je unterschiedliche Teilziele. So sollen die Emissionen der Brennstoffe (Heizungen, Industriefeuernungen etc.) gesamthaft um 15%, die Emissionen der Treibstoffe (Benzin, Diesel) gesamthaft um 8% vermindert werden. Die Schweiz erreicht ihre klimapolitischen Zielsetzungen bis 2010 mit Massnahmen im Inland sowie mit Klimaschutzprojekten im Ausland und dem internationalen Handel mit Emissionsgutschriften (Erwerb von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten) (BAFU 2009).

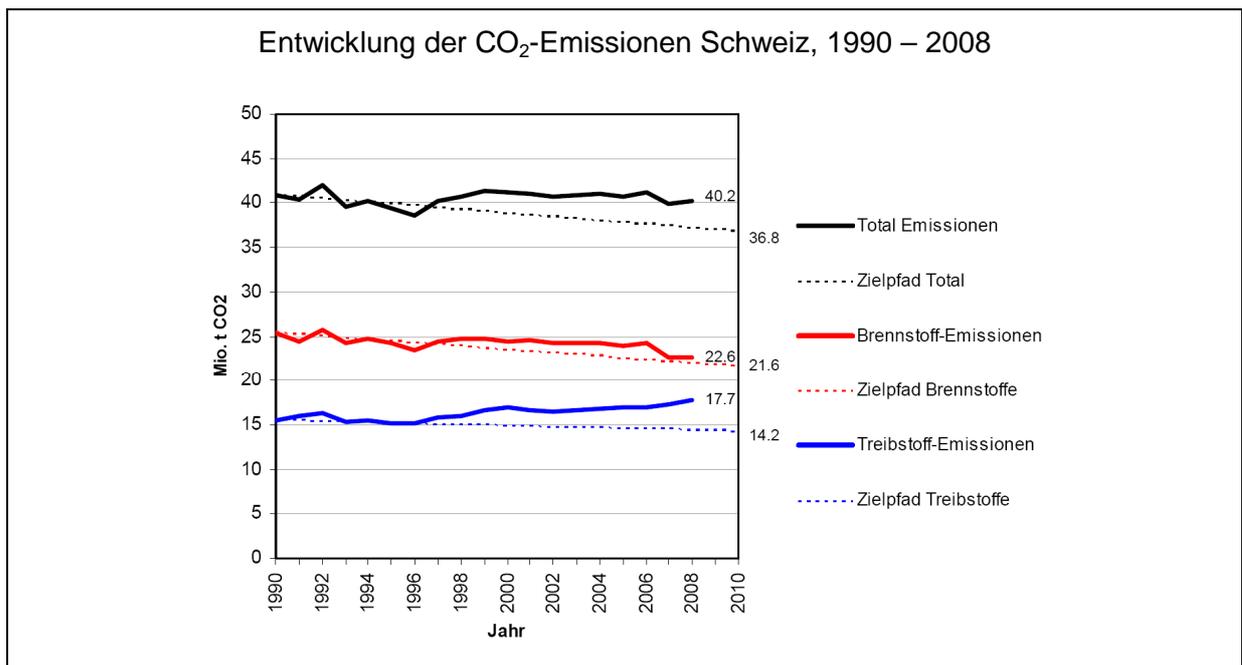


Abbildung 16: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz seit 1990. Angaben in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. Die gestrichelten Linien markieren den jeweiligen Zielpfad, ohne Berücksichtigung des Erwerbs von ausländischen CO<sub>2</sub>-Zertifikaten (BAFU 2009).

### 6.3 Emissions- und Immissionssituation Kanton Aargau

#### Emissionssituation

Die Emissionsbilanz (vgl. Infobox 12) des Kantons Aargau zeigt, dass die Hauptemittenten des klimarelevanten CO<sub>2</sub> die Quellengruppen Industrie und Gewerbe sowie Verkehr und Haushalte (inkl. Dienstleistungen) sind (Abbildung 17, BVU 2009). Auf der Basis der Software ECO<sub>2</sub>-Region wird zurzeit ein kantonales Treibhausgasinventar erstellt.

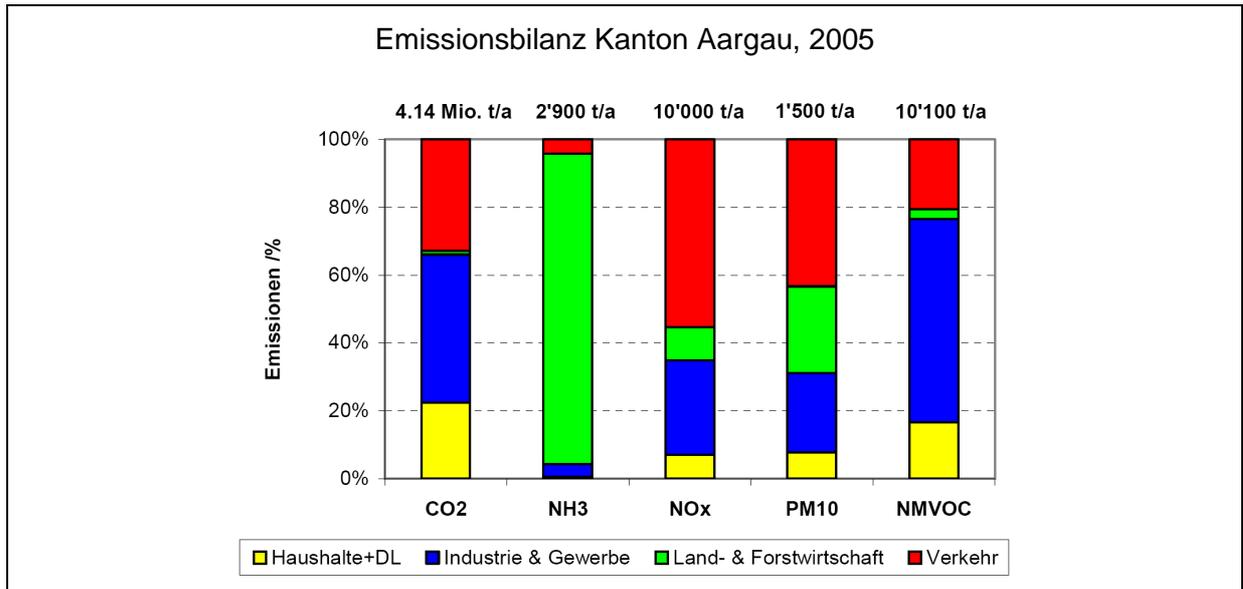


Abbildung 17: Emissionsbilanz für das Jahr 2005 für den Kanton Aargau aufgeteilt auf die vier Quellengruppen. Aufgeführt sind ebenfalls die Gesamtemissionen in Tonnen pro Jahr (BVU 2009).

**Infobox 12: Emission und Immission**

Emissionen sind Stoffe, die eine Quelle, beispielsweise ein Auto, ausstösst. Diese Stoffe werden in der Luft stark vermischt. Immissionen sind die Konzentration von Stoffen, die an einem bestimmten Punkt gemessen werden.

**Immissionssituation Ozon**

Die Ozon-Immissionen sind stark von der Sonneneinstrahlung abhängig und daher ein Problem im Sommer (Infobox 13). Im Sommer wird der Stundenmittel-Immissionsgrenzwert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Aargau flächendeckend deutlich überschritten (siehe Abbildung 18, BVU 2009). Klar ersichtlich ist der Hitzesommer 2003, wo die starke Sonneneinstrahlung und die erhöhten Temperaturen die Ozonbildung begünstigt haben.

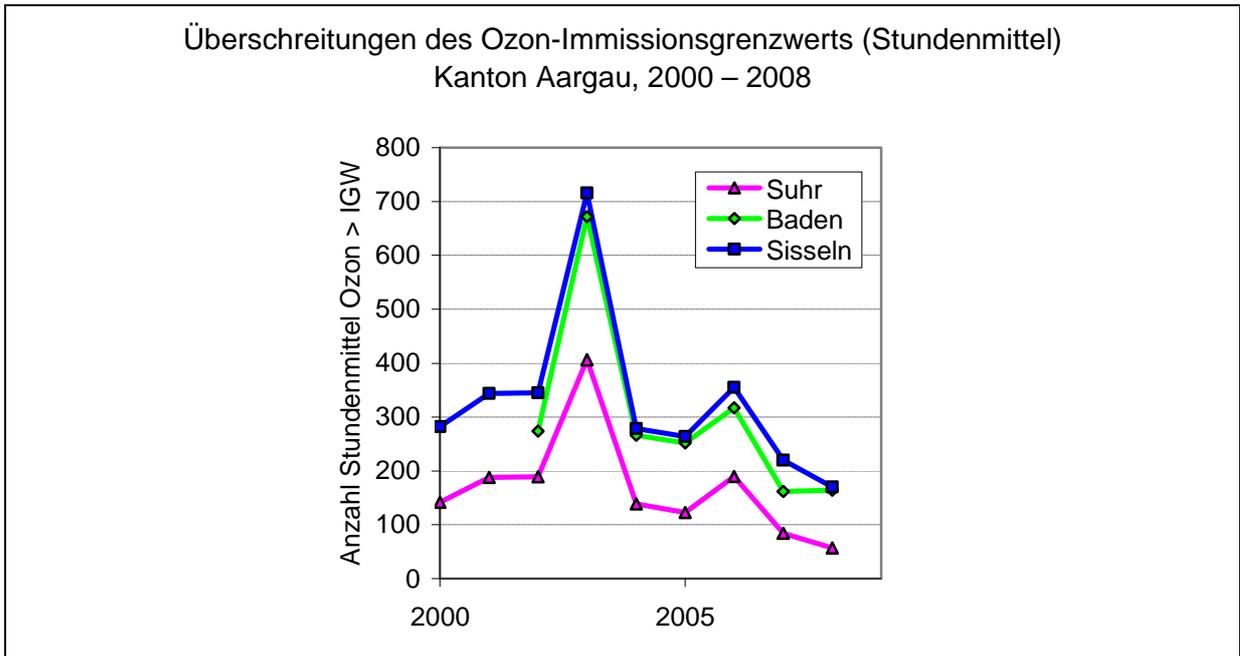


Abbildung 18: Anzahl Stundenmittel-Immissionsgrenzwert (IGW)-Überschreitungen der Aargauer Messstationen für Ozon für die Jahre 2000 bis 2008. Der Stundenmittel-IGW für Ozon beträgt  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dieser Grenzwert darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden (BVU 2009).

**Infobox 13: Ozonbildung**

„Ozon ( $\text{O}_3$ ) ist ein Gas, das natürlicherweise in kleinsten Mengen in unserer Atemluft vorkommt. In der bodennahen Troposphäre wird Ozon unter Einwirkung des Sonnenlichts aus den so genannten Vorläufersubstanzen, nämlich den flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, auch Kohlenwasserstoffe genannt) und den Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) gebildet. Je mehr VOC und  $\text{NO}_x$  in der Luft sind und je stärker die Sonne scheint, umso mehr Ozon wird gebildet. Erhöhte Lufttemperaturen begünstigen zudem die chemischen Reaktionen. Will man also den Sommersmog bekämpfen, müssen die Vorläufersubstanzen reduziert werden. VOC entstehen hauptsächlich durch den motorisierten Verkehr, in Industrie, Gewerbe und Haushalten, während Stickoxide hauptsächlich aus dem motorisierten Verkehr stammen.“ (Ozon-Info, Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute, ab Internet)

**Immissionssituation Feinstaub**

Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte für Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$ ) sind für das ganze Aargauer Kantonsgebiet ausgewiesen (vgl. Abbildung 19). In den Jahren 2003 und 2006 sind die Jahresmittel-Immissionswerte erhöht. Zu den erhöhten Werten trugen vor allem die Wintermonate mit Inversionslagen bei (ZUDK 2004, ZUDK 2007).

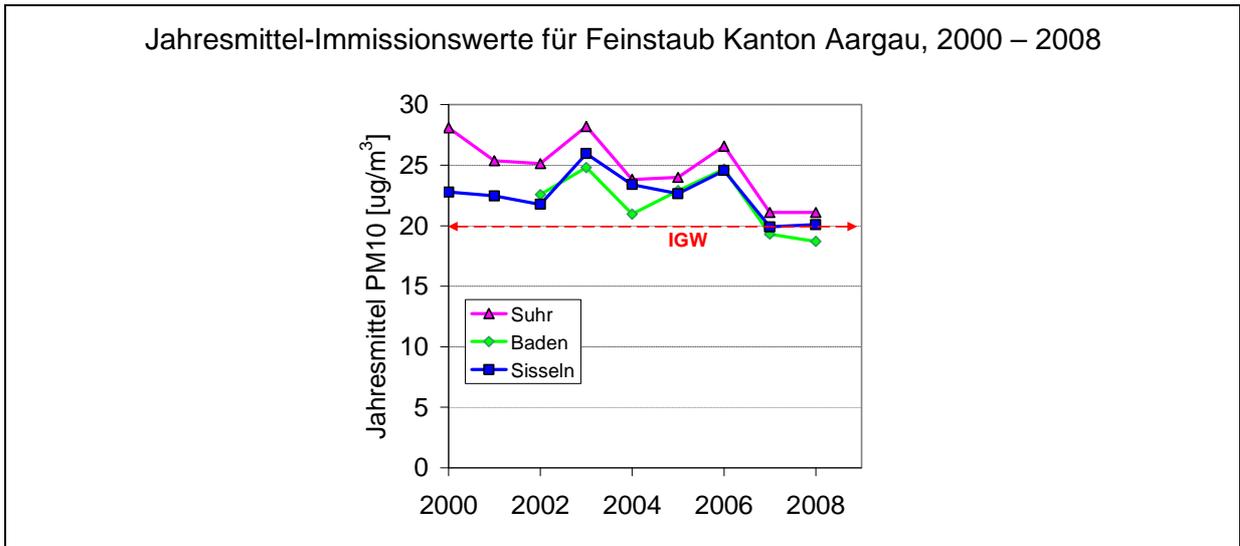


Abbildung 19: Jahresmittel-Immissionswerte der Aargauer Messstationen für den Feinstaub (PM10) für die Jahre 2000 bis 2008. Ebenfalls eingezeichnet ist der Immissionsgrenzwert gemäss Luftreinhalteverordnung (BVU 2009).

#### Immissionssituation Stickstoffdioxid

Die Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)-Immissionen sind vor allem an verkehrsexponierten Standorten hoch (Abbildung 20). In den Agglomerationen und entlang von verkehrsreichen Strassen wird der Jahresmittel-Immissionsgrenzwert von NO<sub>2</sub> überschritten (BVU 2009).

Wiederum sind in den Jahren 2003 und 2006 die Werte erhöht. Besonders hohe NO<sub>2</sub>-Immissionen traten in den Monaten März, August und September des Jahres 2003 auf (ZUDK 2004). Die hohen Werte im März können möglicherweise durch den geringen Niederschlag erklärt werden, wodurch wenig NO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ausgewaschen wurde (ZUDK 2004). Für die hohen Werte im August und September sind wahrscheinlich zwei Effekte massgebend: Das trockene, sehr niederschlagsarme Wetter und die hohen Ozon-Immissionen. Ozon kann die NO<sub>2</sub>-Bildung beschleunigen. Ozon wird für die Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub> benötigt. In diesem Prozess wird das Ozon abgebaut. Falls nun der Ozonpegel – vor allem in der Nacht – so hoch bleibt, dass genügend Ozon für die Oxidation zur Verfügung steht, wird der Prozess der NO<sub>2</sub>-Bildung beschleunigt. Dieser Prozess ist vor allem bei quellennahen, emissionsstarken Standorten, wie zum Beispiel stark befahrene Strassen von Bedeutung und unter der Voraussetzung, dass die Ozonbildung praktisch ausschliesslich durch die Stickoxide, und nicht durch das Vorhandensein der Kohlenwasserstoffe, bestimmt wird (ZUDK 2004). Im Gegensatz dazu ist die Umwandlung von NO zu NO<sub>2</sub> in quellfernen Standorten bereits abgeschlossen. Die erhöhten Werte 2006 gehen auf austauscharme Wetterlagen im Winter zurück (ZUDK 2007).

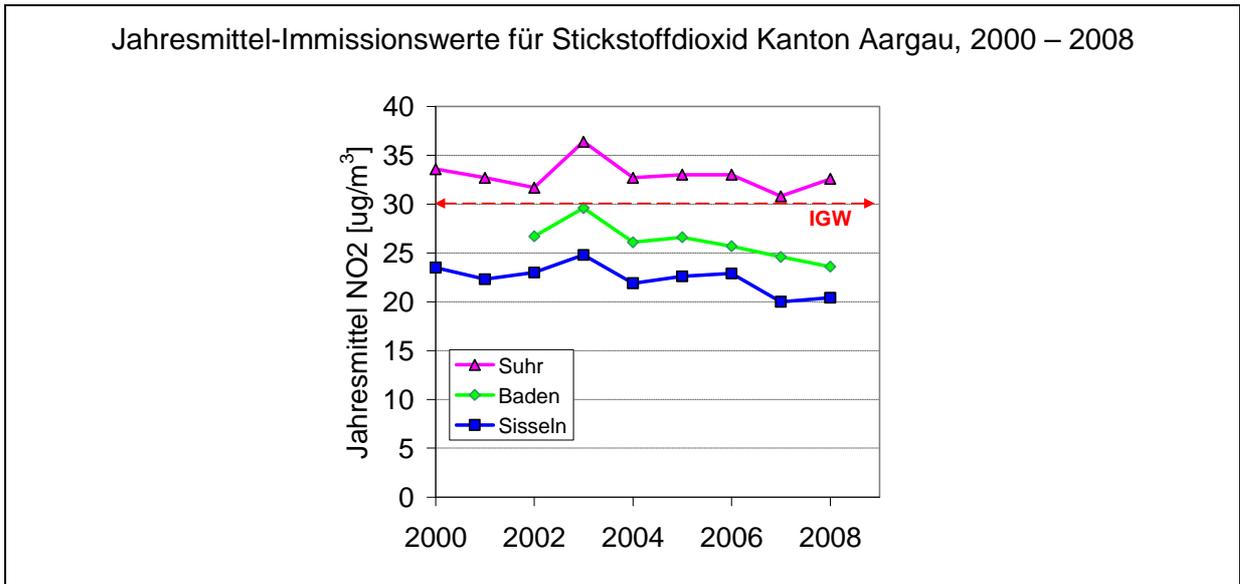


Abbildung 20: Jahresmittel-Immissionswerte der Aargauer Messstationen für das Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) für die Jahre 2000 bis 2008. Ebenfalls eingezeichnet ist der Immissionsgrenzwert gemäss Luftreinhalteverordnung (BVU 2009).

#### 6.4 Hitzesommer 2003

Wie bereits in Kapitel 6.3 dargelegt, war der Hitzesommer 2003 durch hohe Ozonkonzentrationen und erhöhte Stickstoffdioxidkonzentrationen geprägt.

#### 6.5 Auswirkungen des Klimawandels

##### Emission von Treibhausgasen

Die internationale und nationale Klimapolitik strebt eine Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen an (vgl. Kapitel 2.6 und Kapitel 14). Die Reduktion von Kohlenstoffdioxid-Emissionen führt gleichzeitig zu einer Reduktion von Luftschadstoffen, wie Stickoxide.

##### Immissionssituation

Seit dem ersten Massnahmenplan Luft des Kantons Aargau (Daten 1987) hat sich die Emissionssituation wichtiger Luftschadstoffe wie Stickoxide und flüchtige organische Verbindungen markant verbessert. Mit dem aktuellen zweiten Massnahmenplan werden die Emissionen weiter reduziert und die entsprechenden Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung sollen künftig eingehalten werden können (BVU 2009). Damit werden auch die Vorläufersubstanzen zur Bildung von Ozon weiter reduziert.

In künftig vermehrt auftretenden trocken-heissen Sommern (vgl. Kapitel 2.3.2) ist durch die künftige Einhaltung der Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung die Verfügbarkeit von Vorläufersubstanzen für die Bildung von Ozon gegenüber heute reduziert. Vermehrt trocken-heisse Sommer mit austauscharmen Wetterlagen fördern hingegen die Ozonbildung. Mögli-

cherweise führt dies immer noch zu vergleichsweise erhöhten Ozonkonzentrationen in Hitzesommern, aber auf einem tieferen Konzentrations-Niveau. Ebenfalls möglich sind vergleichsweise erhöhte Stickstoffdioxidkonzentrationen, wenn genügend Ozon zur Verfügung steht an quellennahen, emissionsstarken Standorten.

Wie der Klimawandel die winterlichen Inversionslagen beeinflusst ist nach heutigem Wissensstand schwierig vorherzusagen (OcCC 2002). Eine mögliche Entwicklung könnte sein, dass mehr Westwindlagen mit Niederschlägen und weniger ausgeprägte Inversionslagen bei gleichzeitig geringerem Heizbedarf eine Entlastung bezüglich der Konzentrationen von Feinstaub und Stickoxid bringen. Diese Entwicklung ist aber noch sehr hypothetisch. Künftig räumlich höher aufgelöste Klimamodelle und wissenschaftliche Untersuchungen werden voraussichtlich besser abgestützte Aussagen erlauben.

## 6.6 Entwicklung unabhängig vom Klimawandel

Wesentlich für die künftige Emissionssituation und Immissionssituation sind technologische Entwicklungen bei Heizsystemen und in der Mobilität sowie die wirtschaftliche Entwicklung.

## 7 Wald

### 7.1 Einleitung

Die Wälder sind einerseits wichtige Speicher im Kohlenstoffkreislauf. Die Veränderung der klimatischen Parameter Temperatur und Niederschlag wirkt sich andererseits direkt auf die Ausprägung von Vegetation und Wald im Aargau aus.

Die Wälder wirken als Speicher, indem sie Kohlendioxid aufnehmen. Die Waldnutzung beeinflusst den CO<sub>2</sub>-Haushalt der Wälder. Die Senkenleistung des Waldes wird berechnet aus der Differenz zwischen der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Wachstum lebender Biomasse und CO<sub>2</sub>-Verluste durch Ernte und Absterben. Für die Periode 1990 – 2006 wirkte der Schweizer Wald insgesamt als Senke, in einzelnen Jahren aber auch als Quelle (z.B. 2003 infolge hoher Zwangsnutzungen, BAFU 2008).

Gemäss den neusten Ergebnissen des dritten Schweizerischen Landesforstinventars (LFI 3, wichtigste Ergebnisse ab Internet) lagen im Aargau Nutzung und Mortalität in der Periode 1995 – 2005 25% über dem Zuwachs. Dies bedeutet, dass der Aargauer Wald in dieser Periode, bedingt durch hohe Zwangsnutzungen infolge des Sturms „Lothar“, als Kohlenstoffquelle wirkte. In der Vorperiode von 1983/85 bis 1993/95 betrug die Gesamtnutzung im Aargau rund 90% des Zuwachses, so dass der Wald insgesamt als Senke wirkte (Ergebnisse des LFI 2, ab Internet).

Für die Entwicklung und die Ausprägung eines Waldes sind unter anderem klimatische Faktoren zuständig, wie ein ausreichendes Wasserangebot und Temperaturen von 10°C oder mehr während mindestens einem Monat. Der prognostizierte Klimawandel verändert nun diese klimatischen Faktoren. Für den Aargau heisst das, dass sich Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung ergeben und der Häufigkeit und Intensität von intensiven Wetterereignissen wie Stürmen oder Trockenperioden. Die intensiven Wetterereignisse haben wiederum einen Einfluss auf die Entwicklung des Waldes. Die Baumartenzusammensetzung und die klimatischen Faktoren beeinflussen unter anderem die Entwicklung von forstlichen Schadorganismen. Schliesslich haben alle angesprochenen Faktoren Auswirkungen auf die Produktivität der Aargauer Wälder.

### 7.2 Entwicklung der Baumarten

In den letzten hundert Jahren reagierten die verschiedenen Baumarten auf die Erwärmung von ungefähr 1.5°C (+/- 0.2°C, vgl. auch Kapitel 2.1.1) mit verlängerter Wachstumsperiode und mit geänderten, oft erhöhtem Wachstum (Zimmermann et al. 2006). Beispielsweise treiben Bäume und Sträucher etwas 14 – 15 Tage früher aus als vor 50 Jahren (Defila 2005). Die Baumartenzusammensetzung änderte sich bisher aber kaum. Wälder sind träge Systeme. Bäume benötigen infolge ihrer langen Lebenszeit und der langen Lebenszyklen ihrer

Konkurrenz eine lange Anpassungszeit an neue Bedingungen (Rebetez 2006). Hinzu kommt, dass sie durch ihre breite ökologische Amplitude (maximale Spanne der Umweltfaktoren, vgl. Abbildung 23) fähig sind sich innerhalb eines gewissen Rahmens anzupassen. In der Paläoökologie hat sich gezeigt, dass erst Jahrhunderte nach dem Klimawandel ein neuer Vegetationstyp in dynamischem Gleichgewicht mit dem veränderten Klima entsteht. Erste Reaktionsprozesse von veränderten sichtbaren Wachstums- und Entwicklungserscheinungen, wie der Zeitpunkt des Austreibens der Blätter oder eine erhöhte Mortalität, können aber bereits innerhalb weniger Jahre bis Jahrzehnte eintreten (Wohlgemuth et al. 2006).

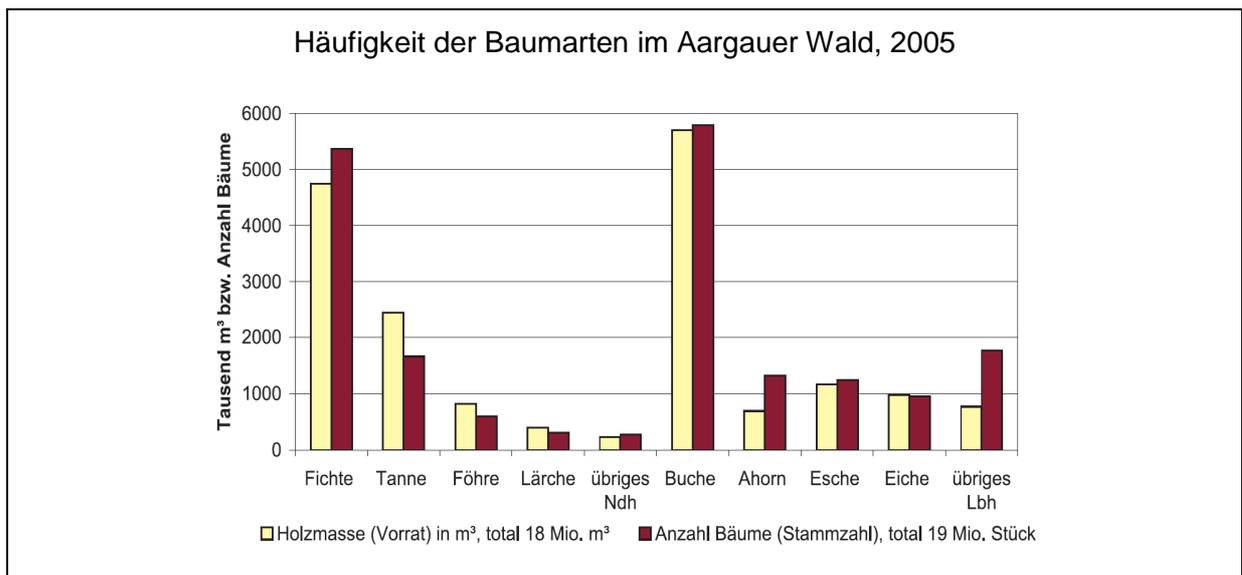


Abbildung 21: Häufigkeit der Baumarten im Aargauer Wald, Waldinventur 2005, Bäume grösser als 12 cm Durchmesser (BVU 2007).

Laut der Waldinventur von 2005 (siehe Abbildung 21) sind die Buche (32%) und die Fichte (26%) die Hauptbaumarten im Aargauer Wald, wobei die Fichte nicht zur natürlichen Waldvegetation gehört. An dritter Stelle folgt nach einem starken Abstand die Weisstanne.

### 7.3 Intensive Wetterereignisse

Die für den Wald massgebenden natürlichen intensiven Wetterereignisse sind ausgeprägte Trockenheit (vgl. auch Kapitel 7.5 zum Hitzesommer 2003) und Stürme. Als wichtigste natürliche Störung im Wald sind Stürme für einen Drittel der ungeplanten Nutzungen verantwortlich (Fuhrer et al. 2006). Die Winterstürme Vivian (1990) und vor allem Lothar (1999) führten in der Schweiz und im Aargau zu grossflächigen Windwürfen.

Das Ökosystem Wald wird zusätzlich durch anthropogen verursachte Bodenversauerung, Nährstoffeinträge und Schadstoffeinträge belastet (vgl. Kapitel 7.7).

Trockenperioden schwächen die Abwehrkraft der Bäume und machen sie anfälliger für Krankheiten, insbesondere für Angriffe durch diverse Rindenpilze und Verursacher von

Zweigsterben (Engesser et al. 2008). Starke Sommertrockenheit begünstigt Infektionen im Wurzelbereich. Dadurch wird die Gesundheit der Bäume zusätzlich zu trockenheitsbedingtem Stress beeinträchtigt (vgl. Kapitel 7.6.2). Veränderte Umweltbedingungen können auch die Wirt-Schädling-Beziehung beeinflussen. Einheimische, bis anhin harmlose Pilze treten neu als Erreger von Baumkrankheiten in Erscheinung. Beispiele dafür sind das Stigmina-Zweigsterben der Linde oder die Massaria-Krankheit der Platane. Diese Krankheiten traten erstmals nach dem trocken-heissen Sommer 2003 auf (Engesser et al. 2008).

Sturmschäden wie auch Astmaterial von Schneebruchereignissen oder Trockenperioden bieten ideales Brutmaterial für Forstinsekten. Trockenperioden, während der die Bäume physiologisch geschwächt werden, sind für die Entwicklung der Insekten von Bedeutung. Intensive Wetterereignisse wie Trocken- und Hitzeperioden oder Stürme sind beispielsweise Auslöser für Borkenkäfer-Massenvermehrungen (Engesser et al. 2008). Auch andere Käferarten haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten unter dem Einfluss von Sturmereignissen und Hitzeperioden deutlich vermehrt.

Neben der bisherigen, klimabegünstigten Zunahme und Ausbreitung einheimischer Insekten und Schädlinge, sind auch fremde, invasive Organismen zu betrachten, deren Ausbreitung auf den globalen Handel und den Klimawandel zurückgeht. Beispielsweise haben sich mehr als 100 nicht einheimische Insektenarten in den europäischen Wäldern bisher etabliert, insbesondere auf Laubbäumen (Engesser et al. 2008). Beispiel für eine eingeschleppte Krankheit ist die Ulmenwelke, welche das Ulmensterben auslöste.

Es gibt aber auch gegenläufige Entwicklungen, wo der bisherige Klimawandel dämpfend auf die Ausbreitung von Schadorganismen wirkt. Einen hemmenden Effekt bietet die Konkurrenzsituation mit anderen Arten, die gleiche oder ähnliche Nahrungsspektren brauchen. Räuber, Parasitoide oder Virulenz von Krankheitserregern können eine Insektenpopulation drastisch dezimieren (Petercord et al. 2008). In niederschlagsreicheren, milden Wintern sind insektenpathogene Pilze aktiv und führen zu hohen Mortalitätsraten bei manchen Forstinsekten. Dies trifft beispielsweise die Kiefernscädlinge (Kieferneule, Kiefernspanner, Kiefernbuschhornblattwespe), aber nicht die wärmeliebenden Laubbaumschädlinge (Eichenwickler, Schwammspinner, Eichenprozessionsspinner).

#### 7.4 Biodiversität im Wald

Waldbäume bilden das Gerüst eines vielfältigen und komplexen Ökosystems, das von den Wurzeln bis zu den Kronen Lebensraum für die Hälfte der 50'000 in der Schweiz bekannten Tier- und Pflanzenarten bietet. Ein grosser Teil davon ist existenziell auf den Wald angewiesen (BVU 2007). Der Kesslerindex, ein Mass für die Artenvielfalt, ist im Wald seit 2000 stetig angestiegen (BVU 2008, vgl. auch Kapitel 9.2).

## 7.5 Wald im Hitzesommer 2003

Im Hitzesommer 2003 war der Wald in den tieferen Lagen der Schweiz durch die ausgeprägte Hitzeperiode, die Trockenheit und die hohen Ozonwerte belastet. Das Wachstum bei Buchen beispielsweise war deshalb vermindert. Bereits zwischen Ende Juli und Anfang August begann in den Buchenwäldern des Mittellandes die Verfärbung des Laubes bis zu Laubfall. Auch der Vegetationsbeginn war beeinflusst von der aussergewöhnlichen Witterung. Beispielsweise blühten die Rosskastanie und der Schwarze Holunder zwischen 10 und 15 Tagen früher als sonst. Die Winterlinde blühte sogar 20 Tage eher. In der Schweiz wurden in 70% der Forstkreise eine erhöhte Baummortalität beobachtet. Die Baummortalität betrug 2003 knapp 1% gegenüber 0.3 bis 0.4% im langjährigen Durchschnitt (Dobbertin et al. 2009). Für Forstschädlinge waren die Bedingungen im Sommer 2003 nahezu ideal. Zwei Millionen Kubikmeter Fichte fielen dem Buchdrucker-Borkenkäfer zum Opfer. Dies entspricht fast zwei Dritteln der normalen jährlichen Nadelholznutzung in der Schweiz. Die Hitze und Trockenheit waren aber nicht der alleinige Grund für die Schwächung und den späteren Befall mit Insekten. Wäre die Fichte nicht noch durch den Sturm Lothar (1999) geschwächt gewesen, wäre der Borkenkäferbefall nicht so stark ausgefallen (ProClim 2005).

## 7.6 Auswirkungen des Klimawandels

### 7.6.1 Entwicklung der Baumartenzusammensetzung

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) prognostiziert infolge der Klimaerwärmung eine Änderung der potentiell natürlichen Baumartenzusammensetzung in den Wäldern des Mittellandes von einem Buchenwald zu einem Eichen-Hainbuchenwald (siehe Abbildung 22, siehe auch Zimmermann et al. 2006), weil die Hainbuche – auch Hagebuche genannt – gegenüber der Buche eine viel grössere Trockenheitsresistenz aufweist. Bei weitergehendem Trend zur Trockenheit wird die Hainbuche von der Eiche abgelöst und die Gefahr der Versteppung nimmt zu. Diese Modelle wurden mit der Annahme einer Erwärmung von 1.2°C und 2.4°C ohne Erhöhung der Niederschläge berechnet. Dies entspricht in etwa einer schwachen bis mittleren Erwärmung gemäss Kapitel 2.1.

### Potentiell natürliche Verbreitung der Eichen-Hainbuchenwälder und Hopfenbuchenwälder

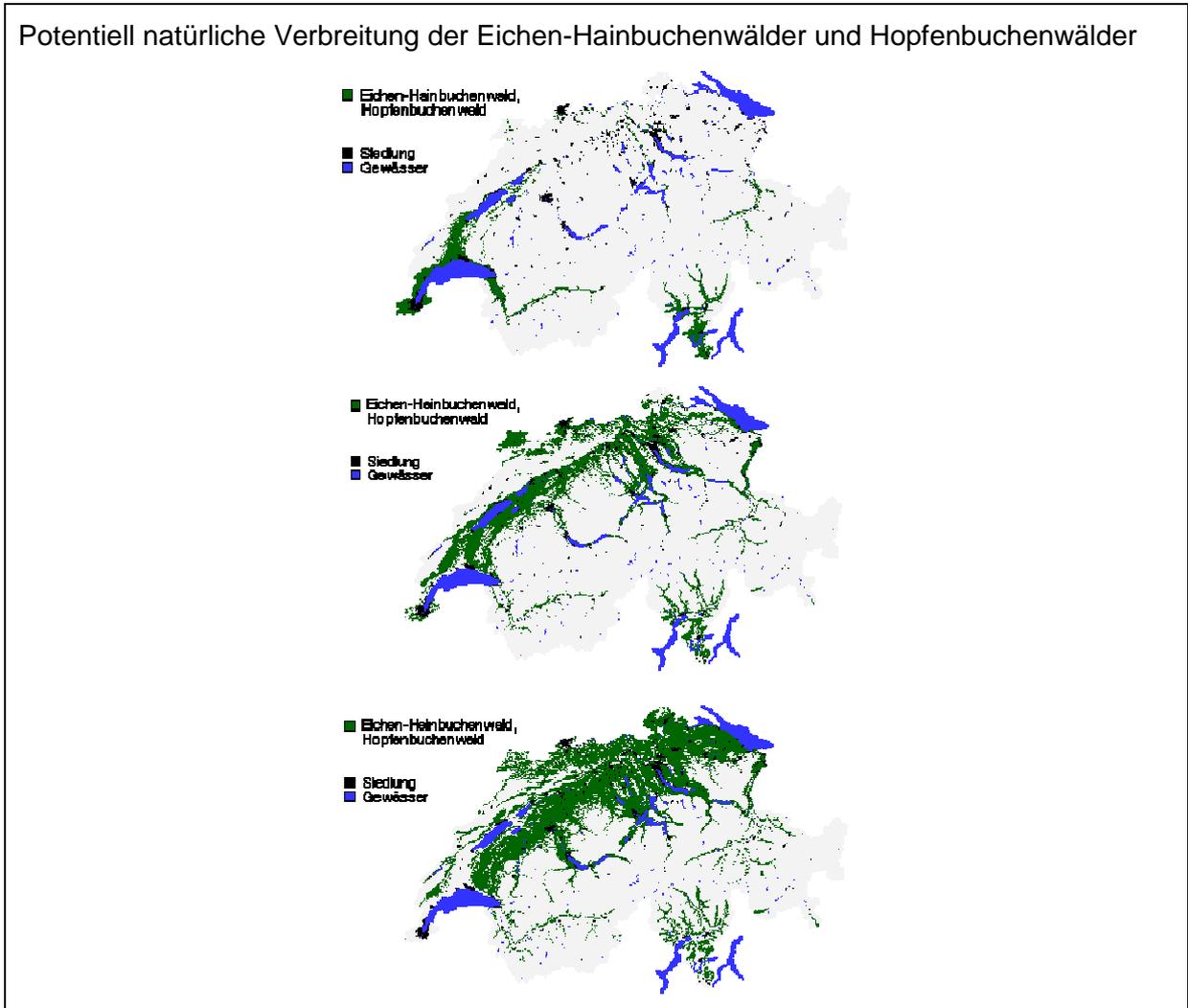


Abbildung 22: Potentiell natürliche Verbreitung der Eichen-Hainbuchenwälder und der Hopfenbuchenwälder im Tessin unter heutigem Klima (oben), nach einer Erwärmung von 1.2°C (Mitte) und nach einer Erwärmung von 2.4°C (unten) in der Schweiz (WSL, ab Internet).

Neue Studien im NFS-Klima bestätigen, dass die einheimischen Laubbäume unterschiedlich auf Bodentrockenheit reagieren. Die Hainbuche/Hagebuche schränkt ihre Transpiration unter Trockenstress ein. Die Eichen zeigen einen geringen Rückgang der Transpiration unter Trockenstress und die Buche liegt in ihrer Reaktion dazwischen (NFS-Klima 2009). Transpiration ist für Bäume lebenswichtig, da damit der Wassertransport in die Baumkrone und die Versorgung der Blätter mit Mineralstoffen angetrieben wird.

Eine starke Erwärmung um +4.7°C gegenüber dem Mittelwert der Sommertemperaturen der Jahre 1864 bis 2003 wäre mit den Bedingungen vom Hitzesommer 2003 vergleichbar. Damals herrschten in der Schweiz durchschnittlich (Mittel der Monate Juni, Juli, August) um 4 bis 5.5°C höhere Temperaturen als in den durchschnittlichen Sommertemperaturen der Jahre 1864 – 2003. Zusätzlich spielt der Niederschlag eine wichtige Rolle bei hohen durchschnittlichen Temperaturen. Bei ausreichendem Feuchtigkeitsnachschub sind die Auswir-

kungen auf die Baumarten nicht so dramatisch (vgl. Kapitel 7.3). Wenn die Bäume aber unter Trockenstress leiden, was zunehmend der Fall sein wird, wenn tatsächlich eine Abnahme der Niederschläge um 31% eintritt (vgl. Kapitel 2.2), können die Bäume schon nach einer Hitzesaison absterben. Gerade die Fichte gehört zu den Baumarten, die empfindlich auf den Klimawandel reagieren könnten. Sie hat eine schmale ökologische Amplitude, ist sturmanfällig und kann unter Trockenstress leicht Opfer von Borkenkäferbefall werden. Dies zeigt, dass die Überlebenschancen für die Fichte bei einer starken Erwärmung prekär werden. Die Buche kann mit den neuen Bedingungen tendenziell besser umgehen, da sie eine grössere ökologische Amplitude hat (siehe Abbildung 23).

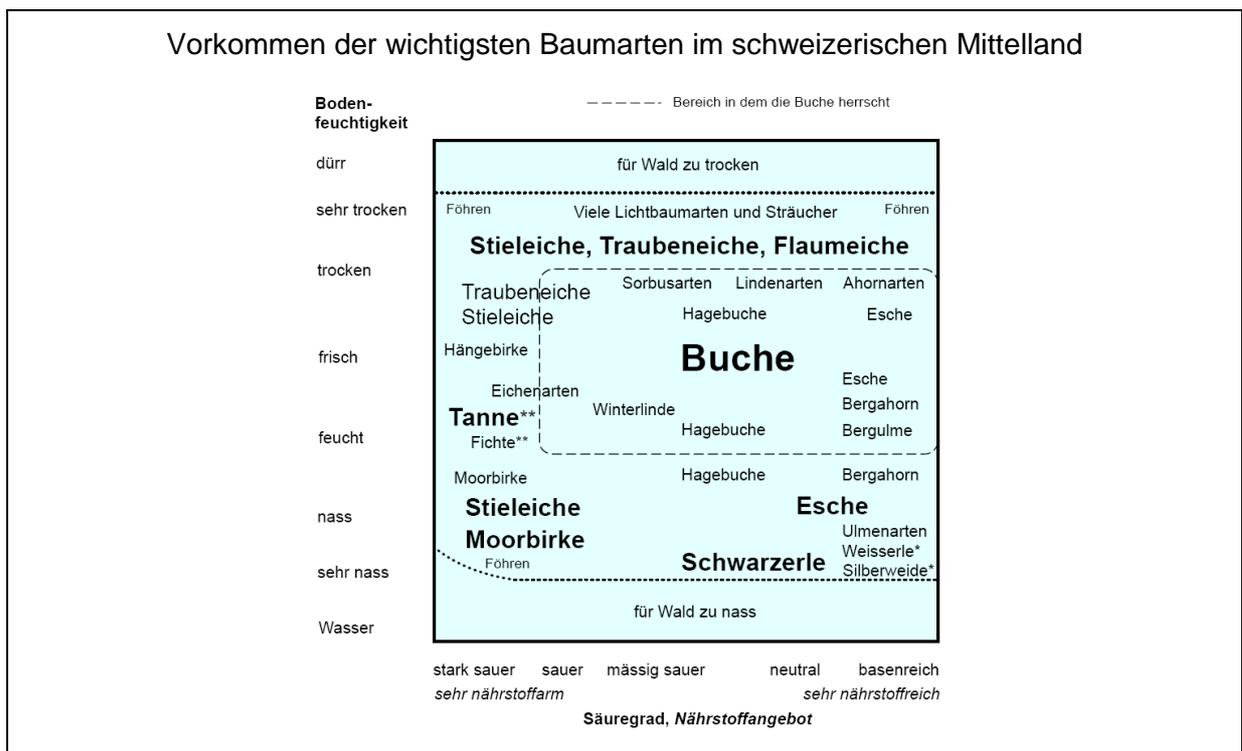


Abbildung 23: Vorkommen der wichtigsten Baumarten im schweizerischen Mittelland in Abhängigkeit der Bodenfeuchtigkeit und des Säuregrads respektive Nährstoffangebots. (\*: Arten der zeitweise überschwemmten Flussauen; \*\*: Arten im Peitschenmoos-Fichten-Tannenwald; Die Schriftgrösse drückt den Grad der konkurrenzbedingten Beteiligung an der Baumschicht aus). Die Abbildung zeigt die ökologische Amplitude, d.h. die maximale Spanne der beiden ökologischen Faktoren Bodenfeuchtigkeit und Säuregrad, innerhalb derer die aufgeführten Arten existieren können (WSL, ab Internet).

Die potentiellen Verbreitungsgebiete der Baumarten verändern sich also in Zukunft infolge der sich verändernden klimatischen Bedingungen (Zimmermann et al. 2006). Wie schnell die Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung eintreten und ob diese bis 2050 bereits klar sichtbar werden, ist angesichts der vielfältigen Wechselwirkungen natürlicher und anthropogener Faktoren im System Wald schwer prognostizierbar. Wohlgemut et al. (2006) sind der Ansicht, dass bei Simulationen von Waldentwicklungen vor 2050 kaum Veränderungen sichtbar respektive messbar werden, sofern die Wälder vor Störungen verschont bleiben. Diese Simulationen gehen von einer Klimaerwärmung in der Grössenordnung von 2 bis 4°C in den nächsten 100 Jahren aus. Dies entspricht etwa einer schwachen bis mittleren Erwärmung.

mung bis 2050 nach den Berechnungen des OcCC (siehe Kapitel 2.1). Störungen wie vermehrte Trockenheit oder vermehrter Windwurf und dadurch beispielsweise Insektenbefall können andere Arten begünstigen und die natürliche Verjüngung der bisherigen Vegetation beeinträchtigen (Zimmermann et al. 2006).

## 7.6.2 Intensive Wetterereignisse

### Trockenheit

Es wird erwartet, dass bei einer Zunahme der mittleren Sommertemperaturen häufiger Hitzeperioden mit höheren Temperaturen auftreten (vgl. Kapitel 2.3). Dadurch ist eine Zunahme des Waldbrandrisikos zu erwarten (Wohlgemuth et al. 2006). Bei Wassermangel wird die Transpiration der Bäume reduziert um den Wasserverlust zu minimieren. Gleichzeitig wird dadurch auch die Nährstoffaufnahme reduziert. Die Gesundheit der Bäume verschlechtert sich und das Wachstum wird verlangsamt (Weis 2005). Bei anhaltend hohem Stickstoffeintrag über die Atmosphäre wird die Robustheit der Bäume zusätzlich strapaziert (vgl. Kapitel 7.7). Feinwurzeln sind zuständig für die Wasseraufnahme der Bäume. Der Stickstoffeintrag begünstigt das Wachstum von Stamm und Krone, nicht aber der Wurzeln. Vergleichsweise wenig Wurzeln versorgen die Blätter der vergleichsweise grossen Krone mit Wasser. Die Feinwurzelbildung wird durch Trockenstress weiter gehemmt, wobei manche Arten besser damit umgehen können und manche weniger. Feinwurzeln der Eichen sind resistenter gegenüber Trockenheit als diejenigen von Buchen und Fichten (Gaul et al. 2008). Ein Verlust an Feinwurzeloberfläche vermindert die Wasser- und Nährstoffaufnahmekapazität während der Trockenphase aber auch nachwirkend in der Erholungsphase (Meier und Leuschner 2008).

### Stürme

Insgesamt wird infolge des Klimawandels mit weniger aber heftigeren Stürmen gerechnet (vgl. Kapitel 2.3). Die direkten Auswirkungen von Stürmen sind Sturmwurf und -bruch. Indirekt verursachen Stürme betriebswirtschaftliche Schäden durch Zwangsnutzungen, reduzieren die Gesundheit der Bäume und begünstigen waldbauliche und waldschutztechnische Folgeschäden. Laubbäume sind besser gegen Windwurf geschützt als Nadelbäume, weil sie blattlos weniger Angriffsfläche bieten. Monokulturen bieten ein grosses Schadenspotential, weil alle Individuen ähnlich reagieren. Flachwurzelnde Bäume, wie z.B. die Fichte, sind windwurfanfällig, da sie nicht gut im Boden verankert sind. Auch Bäume auf wassergesättigten Böden sind wurfanfälliger, weil sie die Wurzeln weniger gut festhalten können. Darum sind auf geneigten Flächen weniger Sturmschäden verzeichnet worden als auf ebenen Flächen. Die Sturmanfälligkeit nimmt mit der Bestandeshöhe zu, bleibt aber gleich ab 20m. Meistens nehmen Windböen, die baumwurfgefährlich sind, mit der Höhe über Meer zu (Mayer et al. 2004).

### Forstliche Schadorganismen

Die in Kapitel 7.3 beschriebenen Entwicklungen werden mit dem prognostizierten Klimawandel akzentuiert. Künftig häufiger auftretende trocken-heisse Sommer (vgl. Kapitel 2.3) schwächen die Abwehrkraft der Bäume vermehrt und begünstigen Infektionen.

Die Voraussetzungen für eine Massenvermehrung von Forstinsekten werden durch den Klimawandel begünstigt. In einem Risikomodell wurde für Österreich bei einem Anstieg der Temperatur um 1°C eine Verdreifachung der Käferholzmenge prognostiziert. Bisher hat vor allem Nadelholz unter dem Käferbefall gelitten. Beispiele in Mitteleuropa zeigen, dass auch gestresste Laubbäume vermehrt durch rinden- und holzbewohnende Käfer angegangen werden (Engesser et al. 2008).

Trockenstress wird den Wald bei einer Klimaerwärmung weniger empfindlich treffen, wenn die Baumartenzusammensetzung im Aargauer Wald sich von einem Fichten-Buchenwald zu einem Eichen-Hainbuchenwald angepasst hat. Diese Arten können durch ihre grosse ökologische Amplitude und ihre Eigenschaften als Tiefwurzler besser veränderten Umweltbedingungen trotzen. Für die Fichte wird es immer schwieriger, den Lebensraum Aargau zu besiedeln.

Es bleibt unsicher, wie ein Wald auf kumulative Effekte reagieren wird. Nach einem Einzereignis ist eine Erholung sehr wahrscheinlich. Bei einer Zunahme von intensiven Wetterereignissen bleibt dem Wald keine Zeit mehr sich zu erholen. Über längere Zeit wird sich deshalb ein neues Gleichgewicht einstellen, aber mit einer anderen Baumartenzusammensetzung, die an die künftigen klimatischen Bedingungen besser angepasst ist.

### Waldbewirtschaftung

Weniger Kälteperioden, weniger Frosttage und mehr Niederschlag im Winter führen zu höherer Empfindlichkeit der Waldböden bezüglich dem Befahren mit Fahrzeugen und Maschinen für die Holzernte. Deshalb sind die Sensibilisierung und Anreize für bodenschonende Holzernteverfahren (besonders im Winter) wichtig.

### 7.6.3 Biodiversität

Gemäss dem Waldmodell der WSL nimmt die potentielle Artenvielfalt der Wälder mit der prognostizierten Klimaerwärmung tendenziell zu, weil mit der Erwärmung die Verdunstung steigt und der Boden trockener wird. Dadurch sind die Wälder weniger dicht und mehr Sonnenlicht dringt ein, wodurch eine grössere Artenvielfalt begünstigt wird (vgl. Kapitel 9, Biologische Vielfalt, Kienast et al. 1998). Voraussichtlich ist der Wald in Zukunft wegen intensiven Wetterereignissen auch lückiger. Hitzewellen und Stürme reissen Löcher in das Waldkleid. Warme und trockene Sommer und viel Schadholz im Wald fördern Schadinsekten wie den Borkenkäfer und erhöhen das Risiko für Waldbrände. Dies führt insgesamt ebenfalls zu mehr Licht und Wärme auf dem Waldboden und damit zu einer höheren Vielfalt wärme- und lichtliebender Arten. Ungünstiger könnte es langfristig für jene Arten aussehen, die feuchte oder

schattige Standorte brauchen (Klaus et al. 2008). Als Beispiele seien der Hirschzungenfarn (*Asplenium scolopendrium* L.) oder der Märzenbecher (*Leucojum vernalis*) genannt.

Wie in Kapitel 9.4 beschrieben, stellt die Einwanderung invasiver gebietsfremder Arten, so genannter Neophyten auch im Wald einen Gefährdungsfaktor für die Artenvielfalt dar. Beispiele für Neophyten im Wald sind der Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus* L.) oder Henrys Geissblatt (*Lonicera henryi*). Die Verbreitung von invasiven gebietsfremden Arten im Wald wird durch Siedlungsnähe, hohe Temperaturen und lichte oder gestörte Waldstandorte gefördert, weshalb die Bedeutung von Neophyten im Wald in Zukunft zunimmt (Nobis 2008).

#### 7.6.4 Produktivität

Durch die Klimaerwärmung verlängert sich die Vegetationsperiode, weil einerseits früher im Jahr Temperaturen erreicht werden, bei denen die Pflanzen weiterwachsen können, andererseits später im Jahr sich Temperaturen einstellen, bei denen die Pflanzen das Wachstum unterbrechen (Menzel 2003). Im Mittel kommt der biologische Frühling in der Schweiz heute rund 12 Tage früher als vor 50 Jahren. Im Herbst zeigen sich keine eindeutigen Trends (Defila 2003). Damit steigen die Durchschnittsstandvorräte im Schweizer Wald. Es wird also mehr Biomasse produziert (Bürgi und Brang 2001). Durch Trockenstress im Sommer wird das Wachstum reduziert und die Gesundheit verschlechtert (Weis 2005). Die Produktivität und Konkurrenzkraft von Bäumen sind wahrscheinlich in erster Linie von der Wassertoleranz abhängig, wobei die Eichenarten besser mit Trockenstress umgehen können als Baumarten wie Buchen und Ahorn (Leuzinger et al. 2005, vgl. auch Kapitel 7.6.1). Entscheidend ist die Frage, wer den Platz der Fichte einnehmen wird, da die Fichte eine wichtige Funktion in der Holzindustrie innehat. Diese Themen sind derzeit auch Gegenstand der Forschung.

#### 7.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

##### Stickstoffeintrag

Unabhängig vom Klimawandel sind Stickstoffeinträge aus der Luft in die Waldböden ein Risiko für den Wald (BVU 2007, Waldner et al. 2009). Der Stickstoff stammt aus Verbrennungsprozessen und der Landwirtschaft. Die durch den Eintrag beschleunigte Bodenversauerung schwächt die Gesundheit des Waldes und erhöht damit die Sturmanfälligkeit bei schlecht gepufferten Böden (Hanewinkel 2008, Mayer et al. 2004, Infobox 14). Im Aargau bedeutet dies, dass die stark kalkhaltigen Böden im Jura und in den Talsohlen die Bodenversauerung abpuffern können und sich dieses Problem nicht stellt, aber bei den silikathaltigen Böden der Mittellandhügel fehlen die Puffersubstanzen und die Bodenversauerung nimmt zu (Flückiger und Braun 2004).

##### **Infobox 14: Bodenversauerung**

Die natürliche Bodenversauerung im Wald wird durch den Eintrag von Stickstoff aus der Luft beschleunigt und verstärkt. Beim Eintrag von Stickstoffverbindungen werden säurebildende Stoffe freigesetzt, die die Nährstoffe von der Oberfläche der Bodenteilchen in die Bodenlösung verdrängen. Dadurch werden die Nährstoffe mit dem Sickerwasser aus dem Boden entfernt. Das Milieu im Boden ändert sich, weil der pH-Wert sinkt. Die Folgen davon sind, dass weniger Nährstoffe zur Verfügung stehen (Flückiger und Braun 2004).

## 8 Jagd und Fischerei

### 8.1 Einleitung

Die prognostizierte Erwärmung führt zu einem Anstieg der Wassertemperaturen und hat damit Auswirkungen auf die Biologie der Gewässer im Aargau. Zudem zeigen die Erfahrungen des Hitzesommers 2003, dass Fische in trocken-heissen Sommern Stresssituationen ausgesetzt sind. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wild betreffen vor allem das Schwarzwild.

### 8.2 Biologische Wirkung der Wassertemperatur

Bereits im Kapitel 4.3 wurde die wichtige biologische Bedeutung der Wassertemperatur erwähnt. Für das Überleben der Fische ist die Wassertemperatur der wichtigste Umweltfaktor. Fische sind wechselwarme Tiere. Die Körperfunktionen reagieren in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die Aktivität des Fisches steigt mit der Wassertemperatur, ist jedoch begrenzt durch den Bereich des Temperaturoptimums. Zum Beispiel gedeiht die Bachforelle am besten bei Temperaturen um 4 bis 19°C, die Äsche bei ungefähr 4 bis 18°C. Höhere Temperaturen sind kritisch und die Fische können nur kurze Zeit überleben. Wenn die Fische nicht in kühlere Gewässer ausweichen können, weil z.B. Wanderhindernisse im Weg stehen oder eine Vernetzung mit Seitengewässern fehlt, ist ihr Leben bedroht. Beispielsweise kann bei Temperaturen von 28 bis 30°C die Bachforelle nicht mehr überleben. Für die Äsche ist das Überleben ab 26°C kritisch. Diese Maximaltemperaturen sind je nach Alter, Kondition und zusätzlichen Stressfaktoren besser oder schlechter zu ertragen (Gouskov Wildberg und Voser 2004). Karpfen, Barsche oder Hechte haben einen höheren Temperaturbereich, bei dem sie sich wohl fühlen. Entscheidend für die Flora und Fauna in den Gewässern ist nicht der Mittelwert der Temperatur, sondern die Dauer der Stresssituation bei erhöhten Temperaturen.

Im Kanton Aargau kommen rund 43 frei lebende Fischarten vor. Der grosse Artenreichtum ist in erster Linie auf die grossen Flüsse Rhein, Aare und Reuss zurückzuführen. Allein der Rhein beherbergt 39 Fischarten. Der Felchen im Hallwilersee ist aus quantitativer Sicht die wichtigste Fischart im Kanton Aargau. Er kann sich heute aber nicht mehr natürlich fortpflanzen, weil für das Überleben der befruchteten Eier auf dem Seegrund noch nicht genügend Sauerstoff vorhanden ist. Mit der weiteren Sanierung des Hallwilersees werden die Voraussetzungen für die natürliche Fortpflanzung geschaffen.

### 8.3 Schadorganismen

Ein Ausbruch von Krankheiten kann temperaturabhängig sein. Als Beispiel ist die proliferative Nierenerkrankung (PKD) zu nennen (BUWAL 2004). Seit 1995 werden Schweizer Fliess-

gewässer auf die proliferative Nierenerkrankung (PKD) getestet. Beim Stand März 2008 sind in den Bächen Aabach, Altachen, Bünz, Erusbach, Etzgerbach, Furtbach, Magdenerbach, Möhlinbach, Pfaffneren, Rohrdorferbach, Suhre, Surb, Uerke, Wigger und Wyna erkrankte Fische gefunden worden (Liste Sektion Jagd und Fischerei). Im Herbst 2001 wurde bei einer Untersuchung der Sektion Jagd und Fischerei in allen grossen Aargauer Flüssen Rhein, Aare, Limmat und Reuss die Krankheit nachgewiesen. Die Krankheit wird durch einen einzelnen Parasit hervorgerufen. Sie befällt besonders Forellen und verursacht eine hohe Sterblichkeit. Wenn die Wassertemperaturen unter 15°C liegen, bricht die Krankheit nicht aus, auch wenn die Fische infiziert sind. Überleben die Fische die Krankheit oder sind die Fische infiziert ohne dass die Krankheit ausbricht, dann sind sie im folgenden Jahr meist immun (Stucki 2002).

#### 8.4 Wild

Dem Aargauer Wald kommt für das Wild eine hohe Bedeutung als Lebensraum zu. Im Aargau gibt es rund 11'000 Rehe, bei den Gämsen geht man von einem geschätzten Bestand von 300 Tieren aus. Der Biberbestand umfasst rund 270 Tiere. Beim Hirsch sind Einzelbeobachtungen bestätigt. Exakte Bestandesaufnahmen zu Wildschweinen und zu den meisten anderen Arten fehlen, weil entsprechende Erhebungen schwierig und aufwändig wären.

Europaweit wird seit etwa Mitte des letzten Jahrhunderts eine markante Zunahme der Wildschweinbestände, auch Schwarzwildbestände genannt, beobachtet (Arnold 2005). Diese Zunahme ist massgeblich klimabedingt. Harte Winter führen zu hoher Wintersterblichkeit und wirken regulierend vor allem, wenn im Folgejahr das Nahrungsangebot zusätzlich beschränkt ist (keine Buchen- oder Eichenmast). Die Abnahme kalter und schneereicher Winter in den letzten Jahrzehnten hat wesentlich zur Bestandesentwicklung beigetragen. Untersuchungen aus Österreich zeigen, dass ab einer mittleren Temperatur von 0°C in den Monaten Dezember bis Februar die Wintersterblichkeit den Zuwachs nicht mehr ausreichend reduziert und exponentielles Wachstum einsetzt (Arnold 2005).

#### 8.5 Hitzesommer 2003

Wie bereits in Kapitel 4.6 erwähnt, waren die Wassertemperaturen im Hitzesommer 2003 sehr hoch. Die Flüsse Aare, Rhein und Reuss wiesen während dreier Monate (Juni bis August) durchschnittliche Wassertemperaturen über 20°C auf. Das ist eine Temperatur, bei der beispielsweise Bachforellen und Äschen Stresssymptome zeigen. Die Weissfische, als Wärme liebende Arten profitierten von den hohen Wassertemperaturen (Gousskov Wildberg und Voser 2004). Im Jahr 2003 traten schweizweit 162 von insgesamt 401 Fällen von Fischsterben aufgrund von Trockenheit und Hitze auf (siehe Abbildung 24, [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)). Im Fricktal starben trotz 27 Notabfischungen Tausende von Fischen (Gousskov Wildberg und Voser 2004). Im Sommer 2003 trat zudem ein aussergewöhnliches Aalsterben im Rhein und in der Aare auf. Grund war ein Schwimmblasen-Wurmbefall und eine bakterielle Seuche. Es

wird vermutet, dass die Seuche durch die Hitze gefördert wurde (Gouskov Wildberg und Voser 2004).

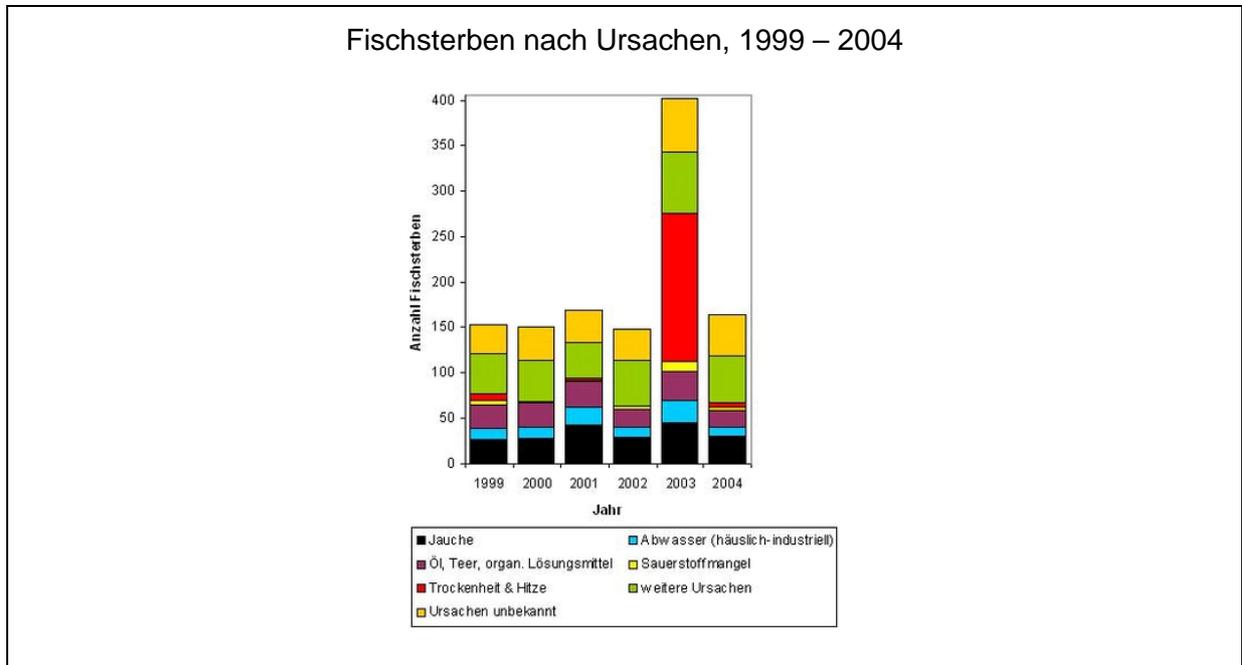


Abbildung 24: Anzahl Fälle von Fischsterben in den letzten Jahren in Abhängigkeit vom Verursacher (BAFU, ab Internet).

## 8.6 Auswirkungen Klimawandel

### 8.6.1 Wassertemperatur

Die Wirkung erhöhter Wassertemperaturen sind für die Fischpopulationen und für die Fischerei mit Vor- und Nachteilen verbunden. Einerseits werden wärmeliebende Fische gefördert, was möglicherweise eine erhöhte Nutzung bestimmter Fischarten ermöglicht. Die heute fischereilich genutzten Bachforellen, Äschen und Felchen werden wahrscheinlich längerfristig den wärmeliebenden Weissfischen weichen.

Andererseits sind kälteliebende Fischarten gefährdet. Wie bereits oben dargelegt, sind für Flora und Fauna in den Gewässern weniger die Mitteltemperaturen, sondern vielmehr die Dauer der Stresssituation bei erhöhten Temperaturen ausschlaggebend. Einer solchen Stresssituation waren die Fische im Hitzesommer 2003 ausgesetzt, was teilweise zu Fischsterben führte (vgl. Kapitel 8.5). Bei einer starken Erwärmung (vgl. Kapitel 2.3.2) könnten trocken-heisse Sommer alle paar Jahre eintreten, was das Überleben einzelner Fischarten, wie die Äsche, in Frage stellen könnte. Weitere Gefährdungen könnten von einer wärmebedingten Zunahme von Schadorganismen ausgehen (vgl. Kapitel 8.3) oder von einer Veränderung der Gewässerhabitate, wenn zum Beispiel aufgrund von Überschwemmungen während der Fortpflanzungsphase notwendige Flachwasserbereiche fehlen.

Warmes Wasser kann Sauerstoff schlechter aufnehmen als kaltes Wasser. Gerade in warmem Wasser, wo die biologische Aktivität erhöht ist, ist der Bedarf an Sauerstoff erhöht. Im warmen Wasser besteht daher vermehrt Sauerstoffmangel. Bei Fischen treten Stresssymptome auf und als Folge davon vermindert sich die Nahrungsaufnahme (BUWAL 2004).

Die erhöhten Temperaturen und die erhöhte Strahlung in trocken-heissen Sommern fördern das Wachstum von Algen und Wasserpflanzen. Diese betreiben mehr Photosynthese, welche das gelöste CO<sub>2</sub> im Wasser verbraucht. Damit steigt tendenziell der pH-Wert im Wasser. Für das Überleben der Fische sind jedoch in trocken-heissen Sommern die Stresssituationen infolge erhöhter Temperatur entscheidend.

### 8.6.2 Schadorganismen

Wie in Kapitel 4.7.4 dargelegt, steigt die durchschnittliche Wassertemperatur beispielsweise in der Aare und der Reuss bis ca. 2050 auf ca. 13 – 14 Grad an, wobei in einzelnen Jahren höhere Werte erreicht werden können. Es ist möglich, dass durch die Temperaturerhöhung Krankheiten gefördert werden (vgl. auch Kapitel 8.5).

### 8.6.3 Wild

#### Rehbestand, Gämsen und Biber

Die Wirkungen des Klimawandels auf den Rehbestand, den Gämbsbestand und den Biberbestand werden als gering eingeschätzt. Es sind keine direkten Wirkungen infolge des Klimawandels bekannt.

#### Schwarzwild / Wildschweine

Die prognostizierte weitere Klimaerwärmung führt dazu, dass der Schwarzwildbestand hoch bleibt oder sogar weiter zunimmt. Das Wildtiermanagement muss deshalb flexibel angepasst werden können.

#### Vögel

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die einheimischen und ziehenden Vogelarten, deren Schutz auch über das Jagdrecht geregelt ist, ist schwer vorhersehbar und stark artabhängig. Der Klimawandel kann den Lebensraum und die Nahrungsgrundlage der Vögel verändern, was sich schlussendlich auf deren Verbreitung und Häufigkeit auswirken kann. Häufiger auftretende intensive Wetterereignisse wie z.B. trocken-heisse Sommer können die Lebensraumsprüche für die einen Arten verbessern, für andere Arten verschlechtern. Speziell die Langstreckenzieher unter den Zugvogelarten kommen vermehrt unter Druck, wenn sich zeitliche Verschiebungen zwischen dem Ressourcenangebot und dem Ressourcenbedarf ergeben (mismatching). Beispielsweise führt die Klimaerwärmung zu einem früheren Laubaustrieb und früherem Höhepunkt der Raupenhäufigkeit. Kommen die Langstreckenzie-

her zu spät in ihr Brutgebiet, verpassen sie das Optimum der Nahrungsverfügbarkeit, was sich negativ auf den Erfolg der Jungenaufzucht auswirkt (Zbinden 2007).

#### 8.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

In den Oberflächengewässern ist die Anzahl der akuten Fischsterben durch hohe Schadstoffkonzentrationen (Unfälle) zwar seit Jahren rückläufig, doch es ist ein schleichender Fischrückgang zu beobachten. Die Fangstatistik des Hochrheins zeigt beispielhaft den Rückgang der strömungsliebenden Fischarten in den grösseren Flüssen. Im Hochrhein ist seit Ende der 70er-Jahre ein markanter Rückgang der Fänge festzustellen. Obschon die Anglerfänge nicht direkt die Bestandsentwicklung der einzelnen Arten wiedergeben, erlauben sie doch Rückschlüsse auf eine langfristige Entwicklung. Hauptgründe für den Rückgang der Fischbestände sind die verschwundene Flusssdynamik, der unterbundene Geschiebetrieb und die mangelnde Vernetzung. Massnahmen zur Verbesserung der Lebensräume für strömungsliebende Arten wurden in den letzten zehn Jahren, zum Teil im Rahmen des Auen-schutzparks Aargau, realisiert, weitere sind für die nähere Zukunft geplant.

Die Zerschneidung der Wildtierlebensräume mit Verkehrsträgern und Siedlungen führt zu teilweise oder ganz getrennten Wildtierpopulationen. Regelmässiger Austausch von Individuen zwischen den Populationen, u.a. zur Verhinderung von Inzucht, ist für das langfristige Überleben der Populationen sehr wichtig. Stirbt eine Population in einem abgetrennten Lebensraum aus, kann dieser aufgrund der fehlenden Vernetzung nicht mehr wiederbesiedelt werden, was vermutlich im Aargauer Birrfeld mit dem Feldhasen geschehen ist (Thiel 2008). Die sich in Planung befindlichen Projekte zur Verbesserung von Wildtierübergängen mildern diese Problematik.

## 9 Biologische Vielfalt

### 9.1 Einleitung

Unter biologischer Vielfalt oder Biodiversität wird die Vielfalt auf der Ebene der Gene, der Arten und der Ökosysteme verstanden. Die Biodiversität erhöht die Widerstandskraft und Reaktionsfähigkeit der Ökosysteme. Die Erhaltung und Förderung der Biodiversität ist daher die beste Strategie sich gegen die Auswirkungen des Klimawandels zu wappnen (SCNAT 2008). So kann die Fauna und Flora mit einer möglichst grossen Bandbreite an Eigenschaften auf den Klimawandel reagieren.

Im Kanton Aargau zeichnen sich mehrere Lebensräume, geprägt durch besondere Standortfaktoren (sehr feucht, sehr trocken, sehr nährstoffarm, usw.), mit besonderer Biodiversität aus (BVU 2008). Zu diesen schützenswerten Lebensräumen nationaler Bedeutung (vgl. Abbildung 25) gehören die Flach- und Hochmoore, die Trockenstandorte, die Amphibienlaichgebiete, die Auen und die naturnahen Buchenwälder. Nach allgemeinen Überlegungen zur Entwicklung der Biodiversität liegt der Fokus auf diesen Schutzgebieten.

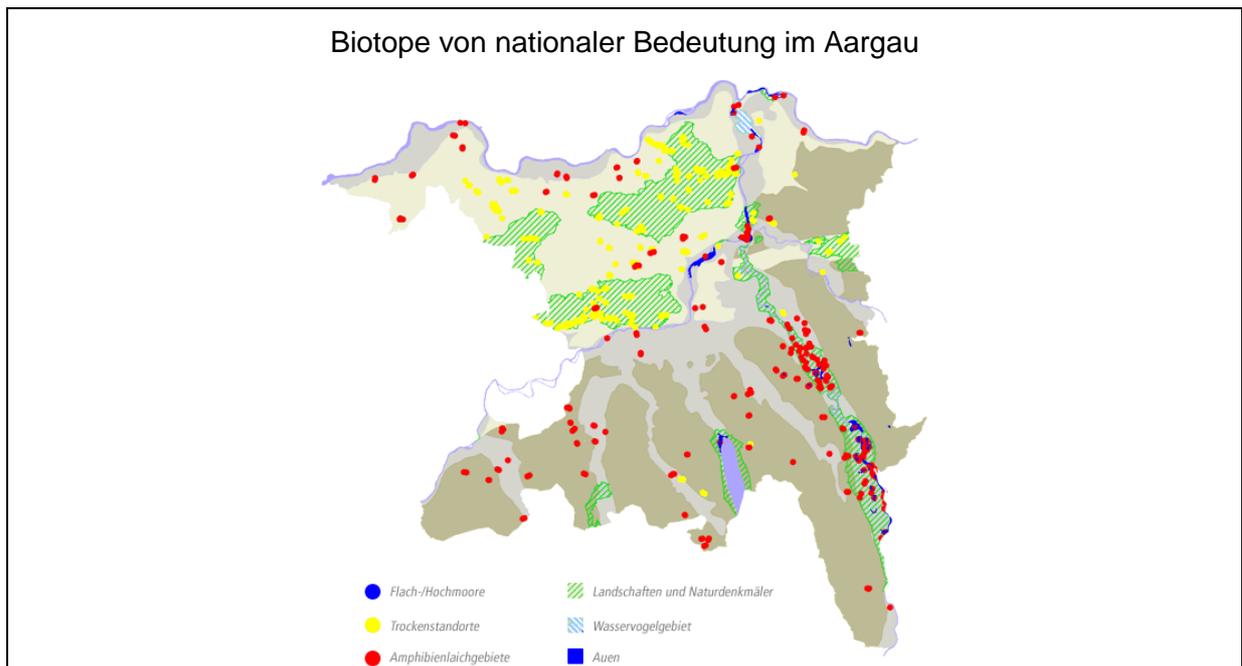


Abbildung 25: Biotope von nationaler Bedeutung im Aargau (Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Landschaft und Gewässer, ab Internet).

## 9.2 Die Entwicklung der Biodiversität im 19. und 20. Jahrhundert

Bis ins 19. Jahrhundert nahm die Biodiversität bei Blütenpflanzen und verwandten Arten in der Schweiz zu (Forum Biodiversität Schweiz, ab Internet). Traditionelle landwirtschaftliche Produktionsweisen unterstützten unter anderen diese Zunahme der biologischen Vielfalt, indem vielfältige Lebensräume wie Hochstammobstgärten, Äcker mit Ackerbegleitflora oder Hecken geschaffen wurden.

Im 20. Jahrhundert kann besonders in den am stärksten besiedelten Regionen des Mittellandes eine Abnahme der Biodiversität beobachtet werden. Diese Abnahme hat mehrere Gründe. Es sind dies die veränderte landwirtschaftliche Nutzung, die Überbauung und Zerschneidung der Landschaft, die damalige Verbauung der Fliessgewässer, die Änderung der Waldnutzung sowie die intensiveren Freizeitaktivitäten (Baur et al. 2004).

Eine wichtige Rolle spielt die Landwirtschaft, wo die früher traditionelle Wirtschaftsweise eine Zunahme der biologischen Vielfalt ermöglichte. Unter dem Einfluss der Industrialisierung wurde die landwirtschaftliche Nutzung so intensiviert, dass sie sich negativ auf die Biodiversität auswirkte. Ökologisch wertvolle Flächen verschwanden oder wurden nicht mehr genutzt, wodurch die Biodiversität ebenfalls geschmälert wurde. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts schrumpfte darum der Umfang von Hecken, Trockenwiesen, Flachmooren, Obstgärten, frei fliessenden Bächen und anderen Lebensräumen im Agrarraum des Mittellandes um mehr als zwei Drittel. 1991 wurden Rote Listen mit gefährdeten, seltenen oder ausgestorbenen Pflanzen, Tieren und Pilzen erstellt und in der Natur- und Heimatschutzgesetzgebung verankert.

In kleinen und isolierten Populationen beispielsweise gefährdeter Arten geht die genetische Vielfalt zurück, weil der Austausch der genetischen Information beschränkt ist. Die grosse Vielfalt an regionaltypischen Sorten und Rassen bei Kulturpflanzen und Nutztieren ist ebenfalls bedroht (Baur et al. 2004).

Die aktuellen Ergebnisse des Biodiversitätsmonitorings der Schweiz zeigen, dass der Artenreichtum vor allem in den Berggebieten, im Wald und punktuell in Siedlungsgebieten aber immer noch hoch ist. In den Wiesen und Weiden dagegen wird eine Homogenisierung und Trivialisierung der Vegetation beobachtet, die auf den zunehmenden Nährstoffgehalt der Böden zurückzuführen ist und einen herben Verlust an biologischer Vielfalt bedeutet (BDM 2009). Viele Arten sind gefährdet oder sogar vom Aussterben bedroht. Von den 19 in der Schweiz vorkommenden Reptilienarten gelten gemäss den Kriterien der Roten Listen 15 als „verletzlich“, „stark gefährdet“ oder „vom Aussterben bedroht“. Bei den Fischen und Rundmäulern sind es 58%. Ebenfalls bedrohlich sieht die Lage bei den Brutvögeln aus: Rund 40% der heimischen Arten stehen auf der Roten Liste (BDM 2009).

Die Entwicklung der Artenvielfalt im Kanton Aargau wird seit 2002 systematisch mit dem Kesslerindex erhoben (siehe Abbildung 26). Der Kesslerindex nahm bis 2006 leicht zu und stagnierte seither.

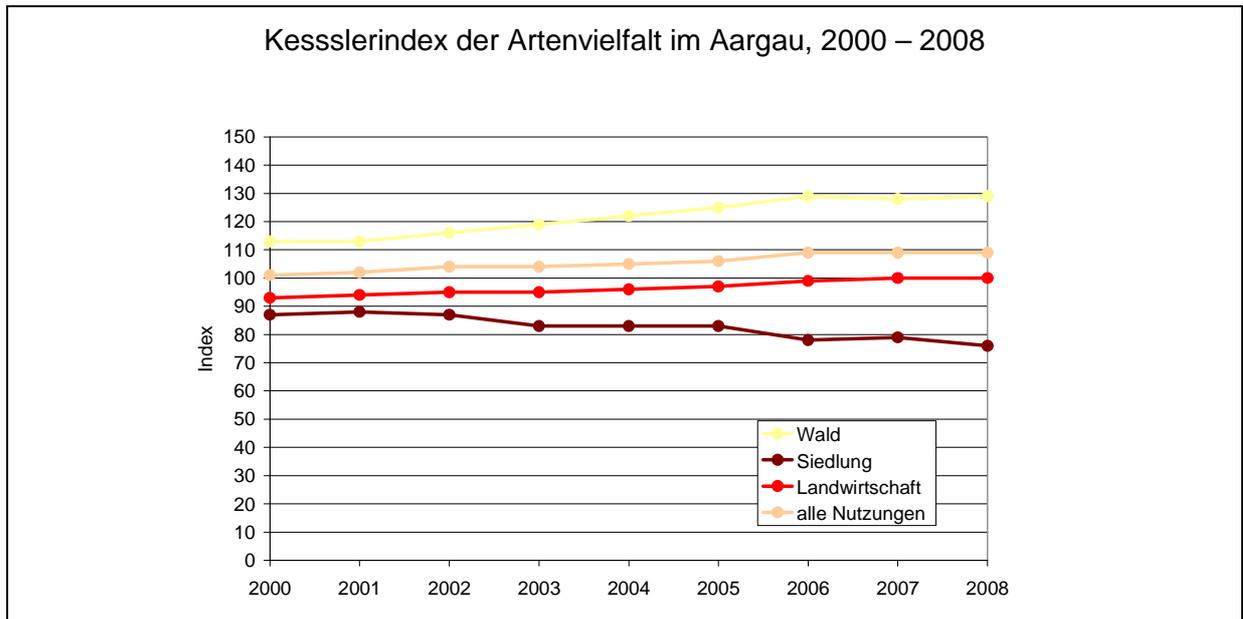


Abbildung 26: Kesslerindex der Artenvielfalt im Aargau. Die Veränderung der Artenvielfalt wird auf 517 Probeflächen am Beispiel der Artenvielfalt der Brutvögel, Tagfalter, Schnecken und Pflanzen ermittelt. Die Ergebnisse werden jährlich zu einem Index zusammengefasst (Datenquelle: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Landschaft und Gewässer).

Gemäss Biodiversitätsmonitoring Schweiz wirkt sich der Klimawandel bereits heute auf Flora und Fauna aus. Beispielsweise breiten sich Tagfalter-, Libellen- und Vogelarten aus dem Mittelmeerraum in der Schweiz aus. Besonders augenfällig sind klimabedingte Veränderungen in den Alpen: Subalpine und alpine Pflanzenarten wachsen 2006 im Durchschnitt 13 Meter weiter oben als 2001 (BDM 2009). Auch eher wärmeliebenden Pflanzen gelingt es mehr und mehr, sich bei uns zu verbreiten, häufig als Ausreisser aus Gärten und Parkanlagen. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, betrug der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert in der Deutschschweiz durchschnittlich 1.3°C.

Im Aargau nehmen wärmeliebende Ruderalpflanzen seit ca. zwei Jahrzehnten stark zu. Als Beispiel seien das Hundszahngras (*Cynodon dactylon*) oder der Sommerflieder (*Buddleja davidii*) genannt. Auch anhand der Insekten lässt sich die Verbreitung wärmeliebender Arten im Aargau beobachten, da diese mobil sind und über grosse Distanzen wandern können. Beispiele sind: Feuerwanzen (*Pyrrhocoridae apterus*), das Weinhähnchen (*Oecanthus pellucens*), eine Langflüglerschrecke, die Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*), welche vom Elsass ins Fricktal eingewandert ist, sowie die Feuerlibelle (*Crocothemis erythraea*).

### 9.3 Biotope von nationaler Bedeutung

#### 9.3.1 Auen

Der Aargau als Wasserkanton beherbergt in seinen Auengebieten auf engstem Raum eine komplexe Vielfalt an Tier- und Pflanzenarten. Eine Charakteristik von Auen ist die Vielfalt an Lebensräumen im Wasser, Kiesbänken, im Weidengebüsch oder in periodisch überfluteten Wäldern. Auen sind dynamisch. Sie werden durch Überschwemmungen, trockene Phasen, Erosion und Sedimentation immer wieder umgestaltet (BAFU, ab Internet).

#### 9.3.2 Moore

Bei den Mooren kumulieren sich mehrere Gefährdungsfaktoren, wie der Nährstoffeintrag (Eutrophierung) und der Klimawandel. Gemäss Biodiversitätsmonitoring Schweiz hat die Qualität der national bedeutenden Moore gesamtschweizerisch zwischen 1997 und 2006 deutlich abgenommen. Rund ein Viertel der Moore wurde trockener und nährstoffreicher und rund ein Fünftel wurde torfärmer (BDM 2009).

#### 9.3.3 Trockenstandorte

Trockenwiesen und -weiden sind trockene und nährstoffarme Naturräume, die eine hohe Artenvielfalt aufweisen (BAFU, ab Internet). Dieser Lebensraum ist ein von der traditionellen Landwirtschaft geschaffener Kulturraum, der im Aargau typisch für den Jura ist. Ohne einen jährlichen Schnitt würden Trockenstandorte verbuschen und später verwalden. Bei einer Düngung von Trockenwiesen wird die Charakteristik der Nährstoffarmut aufgehoben, was zu einer Abnahme der Artenvielfalt führt.

Artenreiche Wiesen sind störungsresistenter als artenarme Wiesen. Bei einer Freilanduntersuchung im Thüringer Schiefergebirge zur Beobachtung von Trockenheitsreaktionen wurde beobachtet, dass artenreiche Wiesen mit verstärkter Wurzelproduktion reagierten. Eine erhöhte Wurzelproduktion bietet Erosionsschutz und erhöht die Futterproduktion. Somit sind sie stabiler gegenüber klimatischen Entwicklungen (Buchmann 2007). Trockenheit fördert an diesen Standort angepasste Vegetation und verdrängt „Allerweltsarten“ (Ubiquisten). Aber es besteht die Möglichkeit, dass trockenheitsresistente Neophyten einwandern. Als Beispiel dafür sei das einjährige Berufskraut (*Erigeron annuus*), eine nordamerikanischen Art, genannt.

#### 9.3.4 Naturnahe Buchenwälder

Der Wald und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald werden in Kapitel 7 besprochen.

### 9.3.5 Amphibienlaichgebiete

Der Kanton Aargau beherbergt die meisten Amphibienarten, die in der Schweiz vorkommen. Die Amphibien sind stark bedroht. Die Pilzerkrankung Chytridiomykose ist mitverantwortlich für das globale Amphibiensterben. Der Erreger ist auch in der Schweiz gefunden worden. Bisher blieb aber ein Massensterben aus. Es ist unklar, woher die Krankheit kommt. Entweder ist der Pilz einheimisch und durch eine Umweltveränderung, wie z.B. der Klimawandel mit abnehmendem Niederschlag, in einen parasitischen Krankheitserreger verwandelt worden. Eine andere Möglichkeit wäre, dass der Pilz nicht einheimisch ist und aus dem Ausland eingeschleppt wurde. In Afrika wurde der Erreger das erste Mal 1938 bei Krallenfröschen nachgewiesen. Die Krallenfrösche wurden lange Zeit exportiert, wobei die Krankheit so verbreitet hätte werden können. Beide Theorien haben ihre Argumente und Gegenargumente (Koordinationsstelle für Amphibien- und Reptilienschutz in der Schweiz KARCH, ab Internet).

### 9.4 Invasive gebietsfremde Arten

Gebietsfremde, eingeschleppte Pflanzen- und Tierarten, die sich rasch ausbreiten, gelten als grosser Gefährdungsfaktor für die Biodiversität der einheimischen Flora und Fauna neben dem Verlust an Lebensraum (vgl. Infobox 15, Baur et al. 2004).

#### **Infobox 15: Invasive, gebietsfremde Arten**

Der Begriff Neobionten fasst die Neophyten (eingeschleppte invasive Pflanzenarten) und Neozoen (eingeschleppte invasive Tierarten) zusammen.

Ein Neophyt ist eine Pflanzenart, die nach dem Jahre 1500 infolge der Tätigkeit des Menschen ausserhalb ihres ursprünglichen Verbreitungsgebietes wildlebend aufgetreten ist und sich fortpflanzt.

Invasive Neophyten sind Neophyten, die leicht verwildern, sich effizient ausbreiten und in den Bereichen Biodiversität, Gesundheit oder Ökonomie Schäden verursachen sowie Neophyten, die ein solches Potential besitzen.

Neozoen sind Tierarten, welche sich analog der Neophyten nach dem Jahre 1500 infolge der Tätigkeit des Menschen ausserhalb ihres ursprünglichen Verbreitungsgebietes wildlebend aufgetreten sind und sich fortpflanzen.

Invasive Neozoen sind Neozoen, die sich analog der Neophyten effizient ausbreiten und Schäden verursachen.

Nicht alle Neophyten und Neozoen müssen invasiv sein.

(Gigon und Weber 2005).

Neophyten kommen in der Schweiz vor allem in den Tieflagen, entlang den Flusstälern vor (Abbildung 27). Es gibt eine Häufung in den städtischen Gebieten. Die Einwanderung und Etablierung von Neophyten ist erklärbar durch die Globalisierung, die bisherige Klimaerwärmung, das hohe Nährstoffangebot im Boden und den Gewässern und die vielen unbedeckten Bodenflächen infolge der grossen Bautätigkeit (Bolliger 2007).

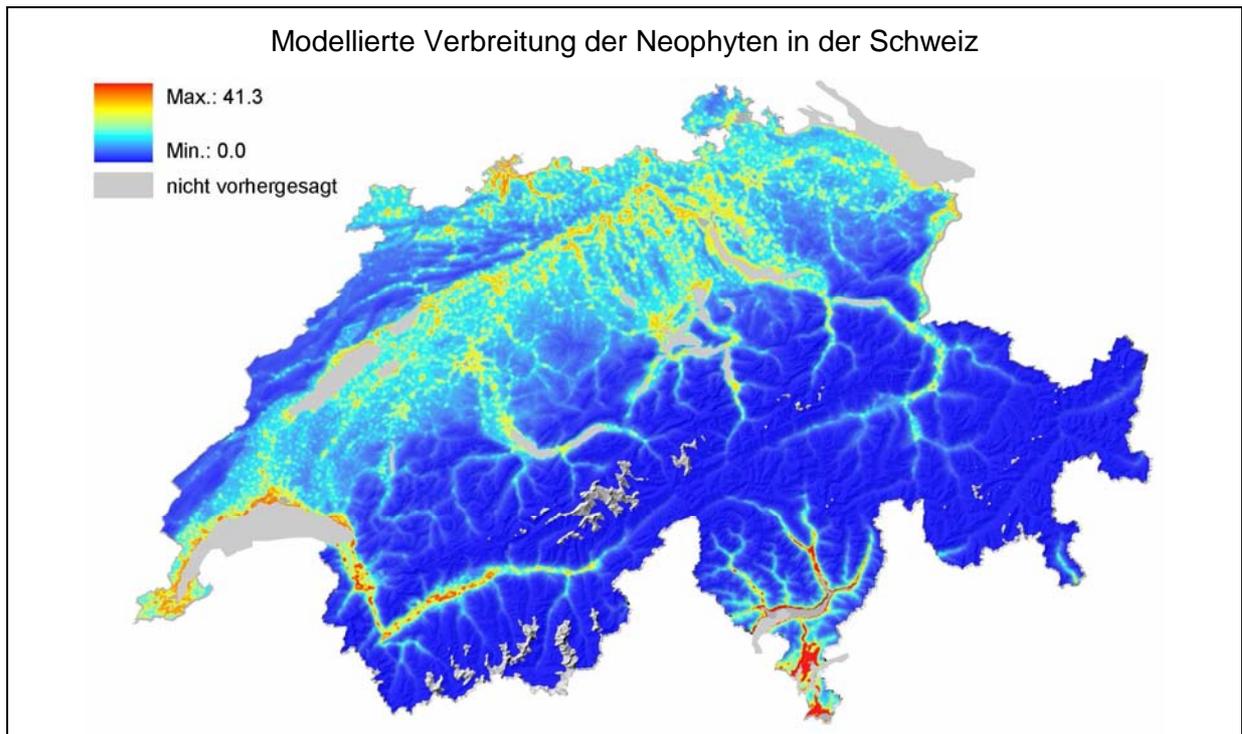


Abbildung 27: Modellierte Verbreitung der Neophyten in der Schweiz, Einheit: Neophytenarten pro Quadratkilometer (Nobis et al. 2008).

Die durch die Verbreitung der Neophyten hervorgerufenen Probleme sind vielfältig: Konkurrenz oder Verdrängung einheimischer Arten, gesundheitliche Auswirkungen an Mensch und Tier (z.B. Allergien), Schäden an Gebäuden und Strassen, usw.

Auch die Neozoen verdrängen einheimische Arten. Als Beispiele sind die Rostgänse (*Tadorna ferruginea*) in Konkurrenz mit den Turmfalken, respektive Schleiereulen, die Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) in Konkurrenz mit den Bachforellen und der asiatische Marienkäfer (*Harmonia axyridis*) in Konkurrenz mit den einheimischen Marienkäfern zu nennen. Die Neozoen werden eingeschleppt und verbreiten sich rasch, weil sie keine oder weniger Krankheiten haben, keine für sie schädlichen Pilze vorkommen, weniger Feinde haben oder bei der Reproduktion Vorteile haben. Damit geht ein Teil der Biodiversität verloren, weil es eine globale Angleichung gibt. Arten, die in anderen Regionen oder Kontinenten eine ähnliche ökologische Nische besetzen, werden hierher verschleppt und können sich etablieren. Gerade die Separierung von Lebensräumen hat die Entstehung von Arten angeregt. Wenn nun die Lebensräume durch Globalisierung wieder verbunden werden, gewinnt der Stärkere. Herausforderung zurzeit ist, dass bei vielen eingewanderten Arten keine Bekämpfungsmassnahmen bekannt sind und die Verbreitung unkontrolliert erfolgt (z.B. eingewanderte Bachflohkrebse, *Dikerogammarus Villosus*).

## 9.5 Hitzesommer 2003

Die Vegetation wurde im Hitzesommer 2003 durch das trocken-heisse Wetter und die hohen Ozonwerte in Mitleidenschaft gezogen. Sie reagierte in tieferen Lagen mit vermindertem Wachstum und stark veränderten Entwicklungsphasen, beispielsweise frühzeitiger Blattverlust bei Rotbuchen (ProClim 2005). Die Artenzusammensetzung hat sich durch dieses Ereignis nicht verändert. Eine Häufung ähnlicher Sommer, wie sie bei einer starken Erwärmung nicht ausgeschlossen werden können (vgl. Kapitel 2.3), hätte längerfristig Artenverschiebungen zur Folge, da trockenheitsresistente Arten wie Eiche und Hainbuche konkurrenzstärker werden (vgl. auch Kapitel 7.6.1). In tieferen Lagen war 2003 die Anzahl Frosttage erhöht, weil vermehrt vorkommende Hochdrucklagen zu klaren Nächten führten (ProClim 2005).

Bei einer Erwärmung des Klimas könnte die Massenausbreitung von Unkräutern, die andere Pflanzen konkurrenzieren, Bedeutung erlangen. Beobachtungen der Vegetation in Kopfsteinpflasterritzen haben gezeigt, dass 2003 neue wärmeliebende und trockenheitstolerante Arten und vermehrt Holzpflanzen gekeimt haben (ProClim 2005, vgl. auch Kapitel 11.5.2).

In den Auen haben sich im Hitzesommer 2003 Pionierpflanzengemeinschaften auf wasserfreien Flächen entwickelt. Lokal sind Neophyten aufgetreten oder abgestorben. Unmittelbar sind keine irreversiblen Schäden in Auen durch dieses singuläre Ereignis aufgetreten, da Auen eine hohe Widerstandskraft und Anpassungsfähigkeit haben. Bei wiederholtem Auftreten von Hitzesommern könnte sich die Situation aber ändern (BAFU, BWG; Meteo Schweiz 2004).

Bei den Amphibien waren im Hitzesommer 2003 vor allem die Spätlaicher betroffen, deren Laich in trocken fallenden Kleingewässern zugrunde ging. Das partielle Austrocknen von Kleingewässern reduzierte aber auch die Anzahl der Fressfeinde (BAFU, BWG; Meteo Schweiz 2004).

Für Moore liegen keine gezielten Beobachtungen bezüglich des Hitzesommers 2003 vor (BAFU, BWG; Meteo Schweiz 2004).

## 9.6 Auswirkungen des Klimawandels

### 9.6.1 Die zukünftige Entwicklung der Biodiversität

Die zukünftige Entwicklung der Biodiversität wird wesentlich von der Landnutzung und anderen Faktoren bestimmt (Kapitel 9.7). Der Einfluss des Klimawandels auf die Entwicklung der Biodiversität wird deshalb von verschiedenen Experten relativiert (OccC 2007, Baur et al. 2004, Reichmuth 2008).

Die Vegetation im Aargau ist hauptsächlich durch die Höhenstufen der kollinen und submontanen Stufe (ca. 300 – 700 m.ü.M., Eichenwald, Eichen-Hainbuchenwald, Buchenwald, Reb-

bau, Edelobstanbau, Ackerbaustufe, etc.) und wenig von der unteren Montanstufe (ca. 700 – 1000 m.ü.M., Buche, Tanne, Bergahorn, Ackerbau und Wiesland, etc.) geprägt. Durch die Klimaerwärmung schieben sich diese Gürtel tendenziell nach oben. Studien aus dem Alpenraum (Pauli et al. 2007) zeigen, dass innerhalb eines Jahrzehnts der Lebensraum für viele nivale Arten kleiner geworden ist, während sich derjenige der Arten aus den unteren Höhenlagen nach oben ausgedehnt hat.

Die Felsengebiete im Aargauer Jura zeichnen sich durch eine spezielle, den kargen Verhältnissen angepasste Vegetation aus. Die Felsenflora umfasst alpine, kontinentale sowie mediterrane Arten (Müller 2006). Die alpinen Arten können nicht nach oben ausweichen, weil die Kämme zu niedrig sind. Diese Verbreitungsgebiete werden nach Westen gedrängt, wo die Juraketten höher sind.

Die Pflanzen- und Tierwelt wird sich allgemein verstärkt jenen tiefer und südlicher gelegenen Gebieten annähern (OcCC 2007). Es ist schwierig abzuschätzen, wie viele Arten einwandern und wie viele Arten abwandern oder verloren gehen.

Im Rahmen der Erarbeitung des Artenschutzkonzepts Aargau wurden Ende 2006 erstmals diejenigen gefährdeten Arten ermittelt, für die der Kanton Aargau eine hohe Verantwortung hat (da beispielsweise ein grosser Teil der in der Schweiz vorhandenen Population im Aargau beheimatet ist). Rund 400 Arten liegen im Mittelpunkt des Artenschutzes im Aargau. Es befinden sich auch Arten darunter, welche aktuell als im Aargau ausgestorben gelten. Der Verantwortungswert wird rechnerisch ermittelt und ist abhängig von der weltweiten Verbreitung einer Art, ihrer Gefährdung in Europa und der Schweiz sowie vom Anteil der im Aargau vorkommenden Individuen an der schweizerischen Gesamtpopulation (BVU 2008).

Eine grobe Einschätzung bezüglich der Wirkung der Klimaerwärmung auf diese Verantwortungsarten ergibt folgendes Bild (Tabelle 5, vgl. detaillierte Liste Verantwortungsarten und Einschätzung im Anhang 16.5):

Total Verantwortungsarten	Anzahl Arten, welche tendenziell von einer Erwärmung profitieren	Anzahl Arten, welche tendenziell als Verlierer einer Erwärmung zu bezeichnen sind	Anzahl Arten, wo der Einfluss tendenziell neutral ist
<b>Amphibien</b>			
6	5	1	0
<b>Fledermäuse</b>			
8	8	0	0
<b>Heuschrecken</b>			
10	6	2	2
<b>Libellen</b>			
13	8	2	3
<b>Reptilien</b>			
5	4	1	0
<b>Tagfalter</b>			
33	28	5	1
<b>Vögel</b>			
46	31	14	1
<b>Pflanzen</b>			
278	185	77	16

Tabelle 5: Verantwortungsarten: Mögliche Reaktion auf den Klimawandel, grobe Einschätzung Martin Bolliger, Naturama.

In der Summenbetrachtung könnte sich im Aargau ein Anstieg der Artenvielfalt ergeben, solange die einwandernden Arten die einheimischen Arten nicht verdrängen. Bei Konkurrenzsituationen, in denen mehrere Arten dieselbe Nische besetzen, gewinnt die besser angepasste Art. Die Einwanderung gebietsfremder Arten wird durch die Globalisierung unterstützt. Allerdings sind die Verluste gemäss OcCC 2007 stärker zu gewichten, da viele der durch den Klimawandel gefährdeten Arten ganz, also weltweit, aussterben, weil sich ihr Verbreitungsgebiet verkleinert.

Szenarien, welche sich auf ganz Europa beziehen, gehen davon aus, dass bis ins Jahr 2080 zwei Drittel aller europäischen Pflanzenarten auf der roten Liste stehen, sollten sie keine Möglichkeit haben zu wandern (Abbildung 28, Klaus et al. 2008). Mit der Möglichkeit zu migrieren, reduziert sich dieser Anteil auf einen Drittel der europäischen Pflanzenarten. Die Vernetzung von Lebensräumen verbessert die Wandermöglichkeiten. Solche Modellierungen sind allerdings mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet.

### Aussterbewahrscheinlichkeit von Pflanzen infolge Klimawandel, Prognose 2080

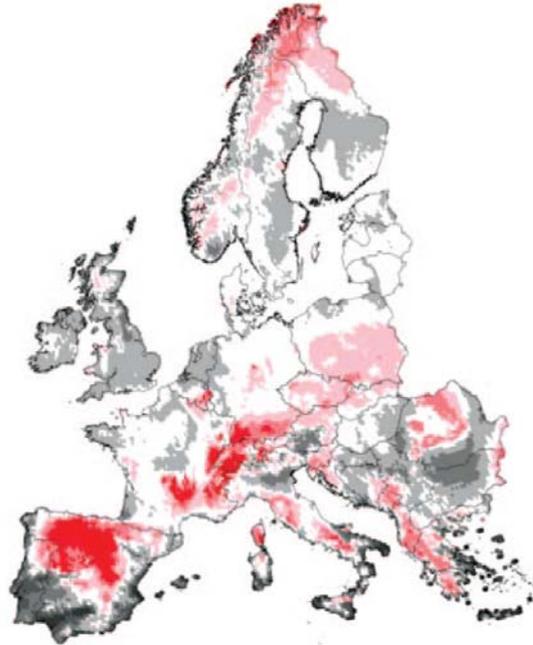


Abbildung 28: Aussterbewahrscheinlichkeit von Pflanzen infolge Klimawandel bis 2080: In den rot gekennzeichneten Gebieten ist die durch die Klimaänderung bedingte lokale Aussterbewahrscheinlichkeit von Pflanzenarten besonders hoch. In den schwarz markierten Gebieten hingegen dürfte die Artenzahl wegen des Klimawandels sogar zunehmen. Die Schweiz und insbesondere die Alpen liegen im roten Bereich (Bildquelle: Aus Thuiller W. et al. (2005): Climate change threats to plant diversity in Europe. PNAS 102/23, S. 8245 – 8250).

Gemäss Körner (Körner 2007) spielt der Frost eine wichtige Rolle für die Überlebensfähigkeit von Pflanzen. Die Pflanzen müssen mit Frost umgehen können, ansonsten können sie bei uns nicht überleben. Die Durchschnittstemperatur ist in diesem Fall zweitrangig (Körner 2007). Gemäss OcCC (2007) nimmt in Zukunft die Häufigkeit von Kälteperioden und die Anzahl Frosttage ab. Die Entwicklung des Risikos von Spätfrösten ist noch unklar, da sich die Vegetationsperiode durch die Erwärmung in den Winter verschiebt (vgl. Kapitel 2.3).

Die Anpassung an veränderte Klimabedingungen geschieht auf Artenebene und nicht auf der Ebene ganzer Lebensgemeinschaften oder Ökosysteme. Es ist also davon auszugehen, dass Lebensgemeinschaften, welche nordwärts oder aufwärts gewandert sind, sich von heutigen Lebensgemeinschaften unterscheiden (Fischlin 2007).

#### 9.6.2 Biotope von nationaler Bedeutung

##### Auen

Für die Auen relevant sind häufigere und höhere Hochwasser im Winter (vgl. Kapitel 4.7.6). Diese Hochwasser in Auen sind erwünscht, da sie die notwendige Dynamik in diese Lebens-

räume bringen. Hochwasser führen aus Landwirtschaftsgebieten ausgewaschene Nährstoffe mit. Der dadurch vermehrte Nährstoffeintrag trägt zu einer Verarmung der Vegetation bei. Der positive Effekt der grösseren Dynamik durch vermehrte Hochwasser überwiegt allfällige negative Effekte durch den Nährstoffeintrag.

Hochwasser transportieren Schwebeteilchen, welche sich in Stauräumen an der Flusssohle ablagern (Kolmatierung), was Strukturen eliminiert und beispielsweise Lebensräume für Jungfische zerstört. Schwemmh Holzablagerungen in Auen sind grundsätzlich erwünscht, da sie Strukturen schaffen.

#### Moore

Durch die Klimaerwärmung steigt die Verdunstung an und die Niederschläge nehmen gemäss den Prognosen des OcCC (2007) im Sommer im schlechtesten Fall um knapp einen Drittel ab (vgl. Kapitel 2.2). Dies führt tendenziell zu einer Verkleinerung der Moorflächen infolge Wassermangel.

Hochmoore werden durch den nährstoffarmen Niederschlag gespiesen und zeichnen sich durch Artenarmut aus. Nur Spezialisten können diesen Lebensraum besiedeln. Die Klimaerwärmung und vermehrte Trockenperioden im Sommer (vgl. Kapitel 2.3) gefährden die Moosdecke und ermöglichen das Einwandern untypischer Arten. Die untypischen Arten verdrängen die typischen Arten, welche auf Hochmoore spezialisiert sind und in einem anderen Lebensraum nicht überleben können. Sie drohen auszusterben (OcCC 2007). Im Aargau gibt es zwei Hochmoore von nationaler Bedeutung: Taumoos bei Niederrohrdorf und Fischbacher Moos in Fischbach-Göslikon.

Bei den Flachmooren kommt zusätzlich zur Erwärmung und Einwanderung untypischer Arten hinzu, dass ihre Speisung vom Flusswasserspiegel oder vom Talgrundwasserleiter abhängt. Im Reusstal, dem wichtigsten Standort für Flachmoore im Aargau, gibt es Flachmoorgebiete, welche in Verbindung mit dem Talgrundwasserleiter sind und solche, welche alleine vom Flusswasserspiegel abhängig sind. Sollte der Klimawandel dazu führen, dass die Abflussregulierung in Zukunft anders gestaltet wird, kann dies Moore, welche alleine vom Flusswasserspiegel abhängig sind, je nach dem positiv oder negativ beeinflussen. Häufigere und grössere Hochwasser überschwemmen flussnahe Flachmoore z.B. im Reusstal und tragen vermehrt Nährstoffe ein (vgl. auch Auen und Kap. 4.7.6).

#### Trockenstandorte

Trockenwiesen sind ein angepasster Vegetationstyp an Trockenheit und Wärme und somit ist nicht zu erwarten, dass sie durch den Klimawandel stark in Mitleidenschaft gezogen werden.

#### Amphibienlaichgebiete

In den prognostizierten trocken-heissen Sommern (vgl. Kapitel 2.3) können manche Gewässer austrocknen. Das muss kein Nachteil sein für Amphibien. Der Zeitpunkt ist entscheidend. Wenn das Gewässer mit dem Laich austrocknet, ist der Reproduktionserfolg betroffen (vgl. Kapitel 9.5). Pionieramphibien (Kreuzkröte, Gelbbauchunke, Geburtshelferkröte) haben di-

verse Strategien entwickelt damit umzugehen, sodass ihre Art nicht lokal verschwindet. Der Vorteil des temporären Austrocknens ist, dass auch die Fressfeinde der Amphibienlarven, die Fische, Wasserkäfer- oder Libellenlarven, sterben. Nach der Trockenphase füllt sich das Gewässer wieder und es herrschen ideale Bedingungen, weil die Fressfeinde nicht mehr da sind (KARCH, ab Internet).

Hochwasser mit Überschwemmungen stellen keine grösseren Probleme dar. Es kann sich ein Standortwechsel ergeben, der aber die Überlebensfähigkeit nicht gefährdet. Bestenfalls können durch Überschwemmungen neue Lebensräume für Amphibien entstehen.

### 9.6.3 Invasive gebietsfremde Arten

Modellierungen der künftigen Neophytenvielfalt in der Schweiz für 2020 und 2050 zeigen, dass sich der Klimawandel stärker auswirken dürfte als die weitere Ausbreitung von Siedlungen und städtischen Gebieten, wo sich bereits heute die Neophytenvielfalt häuft. Die Zunahme der Neophytenvielfalt ist aber im Siedlungsraum höher als im Umland (Nobis et al. 2008).

## 9.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Wie bereits mehrfach dargelegt, ist der Klimawandel nicht die einzige Einflussgrösse für die Entwicklung der Biodiversität (Baur et al. 2004). Wichtigste negative Auswirkungen auf die Biodiversität haben die veränderte Landnutzung, wie die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur und die intensivisierte Landwirtschaft. An zweiter Stelle stehen die gebietsfremden und invasiven Arten. Die Einwanderung invasiver gebietsfremder Arten wird durch den Klimawandel begünstigt. An dritter Stelle stehen intensive Wetterereignisse wie Sturmschäden, Starkregenereignisse, lange Trockenperioden und Feuer. Dahinter stehen, an vierter Stelle, die durchschnittlichen Veränderungen des Wasserhaushalts. An fünfter Stelle steht die durchschnittliche Klimaerwärmung. Weiter kommen noch die erhöhten Stickstoff- und Säureinträge aus der Luft in die Ökosysteme und die Auswirkungen der erhöhten Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre auf die Pflanzen hinzu.

## 10 Energie

### 10.1 Einleitung

Die Nutzung von Energie wirkt sich nicht nur auf den Klimawandel aus, dieser beeinflusst umgekehrt auch die Energienutzung und die Energieproduktion. Ein Grossteil der klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Äquivalente entsteht durch die Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen (vgl. auch Kapitel 3 und Kapitel 6).

Durch den Klimawandel ergeben sich saisonale Veränderungen in der Energienachfrage und er beeinflusst die Energieproduktion beispielsweise infolge klimabedingter Veränderungen der Abflusscharakteristik der Flüsse. Im Aargau stehen dabei die Wasserkraft und die Kernenergie im Vordergrund. Nicht betrachtet werden die Versorgungssicherheit und ökonomischen Aspekte der Energieerzeugung und Energienutzung.

### 10.2 Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen

Von den schweizerischen Treibhausgasemissionen 2007 entfallen 21.2% der CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf die Industrie, 19.9% auf die Haushalte und 9.1% auf die Dienstleistungen (BAFU 2009, vgl. Kapitel 6). Die wichtigsten Quellen bei der Industrie und den Dienstleistungen sind der Energieverbrauch beim Heizen und bei der Produktion von Gütern. Ursachen für den Treibhausgasausstoss von Haushalten sind vor allem das Heizen und die Bereitstellung von Warmwasser.

### 10.3 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch 2008 des Kantons Aargau gliedert sich nach Energieträgern wie folgt: 32% erdölbasierte Treibstoffe, 28% Elektrizität, 24% Erdölbrennstoffe und 16% Erdgas (STAAG 2009). Über den Verbrauch an Kohle, Holzenergie, Fernwärme, Industrieabfälle und übrige erneuerbare Energien liegen keine kantonalen Daten vor. Schweizweit machen diese 2008 rund 9% des Energieverbrauchs aus (BFE 2009a).

Bezüglich Heizenergie wurden bei den bewohnten Wohnungen im Aargau im Jahr 2000 63% mit Öl, 16% mit Gas, 6% mit Holz oder Kohle, 6% mit Elektrizität, 5% mit Wärmepumpe, 3% mit Fernwärme und weniger als 1% in einer anderen Form beheizt. Zwischen 1990 und 2000 nahmen die Wohnungen mit Wärmepumpe um 160%, diejenigen mit Gas um 91% und solche mit Fernwärme um 41% zu. Die Anzahl Wohnungen mit Ölheizung stieg nur leicht. Der Anteil an Raumheizungen mit Elektrizität und Holz oder Kohle nahm im gleichen Zeitraum ab (STAAG 2009). Über die verwendeten Energieträger bei den Heizungen von Unternehmen sind keine Daten verfügbar. Der Heiz- und Kühlbedarf ist neben Komfortansprüchen abhängig vom Klima.

## 10.4 Energieproduktion

Von den 2008 im Inland gewonnenen Primärenergieträgern waren 58% Wasserkraft, 22% Müll und Industrieabfälle, 15% Brennholz und 5% übrige erneuerbare Energien (BFE 2009a). Ein Teil dieser Primärenergieträger wurde, zusätzlich mit importierten Energieträgern, für die Produktion von Elektrizität eingesetzt. Die inländische Elektrizitätsproduktion verteilte sich 2008 auf 56% Wasserkraftwerke, 39% Kernkraftwerke und 5% konventionell-thermische und andere Kraftwerke (BFE 2009b). Im Kanton Aargau liegen bezüglich der kantonalen Energieproduktion lediglich Daten über die Kern- und Wasserkraftproduktion vor. Die Wasserkraftproduktion sieht wie folgt aus (Abbildung 29):

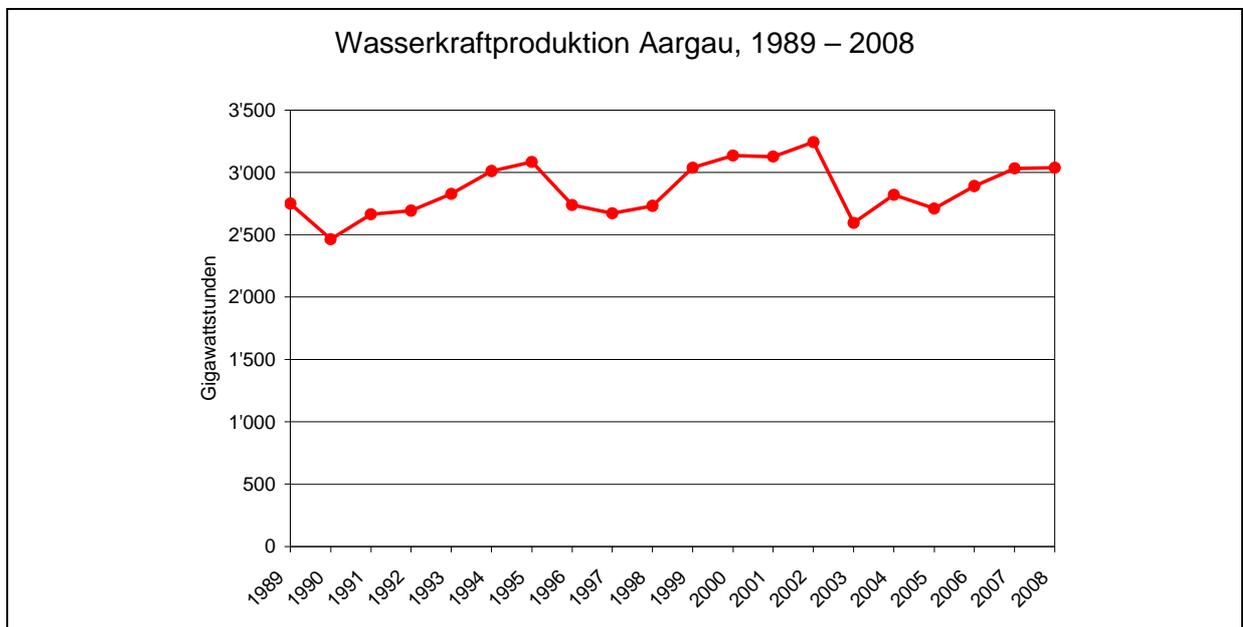


Abbildung 29: Wasserkraftproduktion im Aargau, 1989 – 2008 (Datenquelle: Statistisches Amt Kanton Aargau 2009).

Im Kanton Aargau handelt es sich bei der Wasserkraftproduktion um Flusskraftwerke (oder auch Laufkraftwerke). Insgesamt deckten die Flusskraftwerke 2008 64% des aargauischen Elektrizitätsverbrauchs. Die Produktion der Kernkraftwerke Beznau I und II und Leibstadt beläuft sich 2008 auf 15'338 GWh (STAAG 2009). 27% der schweizerischen Elektrizitätsproduktion stammte 2008 von Wasser- und Kernkraftwerken im Aargau.

Bei der Windenergie wurde 2008 im Kanton Aargau das Potenzial ausgewertet und diejenigen Flächen, welche aufgrund der Windverhältnisse geeignet sind, sollen in den Richtplan aufgenommen werden (BVU 2008). Die Nutzung der Windenergie ist bisher im Kanton Aargau kaum von Bedeutung.

## 10.5 Energieverbrauch und Energieproduktion im Hitzesommer 2003

In den Sommermonaten 2003 erhöhte sich der schweizerische Gesamtenergieverbrauch gegenüber den Vorjahren vermutlich aufgrund der vermehrten Kühlung. Hohe Raumtemperaturen sind an sonnenreichen und warmen Tagen nicht nur unangenehm, sondern können auch die Arbeitsproduktivität reduzieren. Im Hitzesommer 2003 stieg die Temperatur in einem durchschnittlichen, nicht aktiv gekühlten Büroraum trotz Nutzung der Nachtauskühlung an 22 Tagen über 26°C. Die 22 Tage lagen dabei innerhalb von vier Wochen (ProClim 2005).

Im Hitzesommer 2003 erlitten die Flusskraftwerke aufgrund der geringen Wasserführung Produktionseinbussen (ProClim 2005, BAFU, BWG, Meteo Schweiz 2004). Auch im Aargau ist diese Einbusse in Abbildung 29 sichtbar. Sie bewegt sich dabei aber im normalen längerfristigen Schwankungsbereich.

Im Aargau hat das Kernkraftwerk Beznau I und II eine Durchlaufkühlung mit Flusswasser. Aufgrund der heissen Witterung im Sommer 2003 musste dieses Kernkraftwerk an mehreren Tagen nachmittags seine Leistung um bis zu 15% reduzieren (HSK 2004).

Für die Windkraft war der Hitzesommer ungünstig, für die Solaranlagen hingegen besonders günstig (OcCC 2005).

## 10.6 Auswirkungen des Klimawandels

### 10.6.1 Energieverbrauch

Der Klimawandel hat entsprechend der Temperaturentwicklung (vgl. Kapitel 2.1) zur Folge, dass zukünftig im Winter weniger Heizenergie und im Sommer mehr Kühlenergie benötigt wird. Die Energienachfrage verschiebt sich von den Brennstoffen zu Elektrizität. Im Winter werden gemäss den Energieperspektiven 2035 die Heizgradtage bis 2030 um ungefähr 11% und bis 2050 um rund 15% gegenüber dem Durchschnitt von 1984 bis 2004 zurückgehen. Bei den Privathaushalten in der Schweiz wird als Folge des Klimawandels der Bedarf an Wärmeenergie bis 2050 um 10% gegenüber dem Referenzverlauf ohne Berücksichtigung des Klimawandels abnehmen. Die steigenden Flächen im Dienstleistungssektor werden nicht zu einer erhöhten Nachfrage nach Wärmeenergie führen, da höhere Energieeffizienz und bessere Wärmedämmung das Flächenwachstum ausgleichen können. 2050 liegt die Wärmenachfrage des Dienstleistungssektors 18% unter dem Wert des Referenzverlaufs ohne Klimawandel (OcCC 2007). Die Entwicklung des Energieverbrauchs der Industrie unterscheidet sich gemäss Energieperspektiven 2035 kaum vom Referenzverlauf ohne Klimawandel (BFE 2006). Der Grund dafür liegt darin, dass im Industriesektor der Anteil der Raumwärme am Energieverbrauch tief ist. Er lag 2006 bei 13%. Im Dienstleistungssektor lag der Anteil 2006 bei 53%, bei den Privathaushalten bei 72% (BFE 2008). Eine Reduktion der Heizgradtage hat im Industriesektor entsprechend geringe Auswirkungen.

Im Sommer werden die Kühlgradtage bis 2035 um rund 100% zunehmen. Für eine Zunahme der durchschnittlichen Temperatur von 2.5°C bis 2050 wird mit einer Erhöhung der Kühlgradtage um 150% gerechnet. Die Elektrizitätsnachfrage der schweizerischen Privathaushalte wird bis 2050 gegenüber dem Referenzverlauf ohne Klimawandel insgesamt um 10% zunehmen. Dies ist auf den gestiegenen Energieverbrauch für die angenommene vermehrte Klimatisierung des Wohnbereichs und für Kühl- und Gefriergeräte zurückzuführen. Im Dienstleistungssektor steigt der Kühlungsbedarf mittels Elektrizität und liegt 2050 170% bis 200% über dem Referenzverlauf ohne Klimawandel. Rund 70 Prozentpunkte davon gehen auf die zunehmende Anzahl Kühlgradtage zurück. Der Rest erklärt sich durch die Zunahme der klimatisierten Flächen (OcCC 2007). Wie bereits erwähnt, unterscheidet sich die Entwicklung des Energieverbrauchs der Industrie kaum vom Referenzverlauf ohne Berücksichtigung des Klimawandels (BFE 2006). Dies ist darauf zurückzuführen, dass 2006 der Energieverbrauch für Klimatisierung, zusammen mit Lüftung und Haustechnik, im Industriesektor lediglich 0.4% des sektoriellen Energieverbrauchs ausmachte und voraussichtlich auch in Zukunft kaum ansteigen wird. Im Vergleich dazu betrug 2006 im Dienstleistungssektor der Anteil für Klimatisierung und Kühlung 12% (BFE 2008).

Die genannten Referenzverläufe berücksichtigten bei der Wärmeenergie vier verschiedene Szenarien, welche davon ausgehen, dass das Energieeffizienzsteigerungspotential bezüglich der Wärmeenergie bei Gebäuden ausgenutzt wird. Das heisst der Wärmeenergieverbrauch sinkt auch ohne Klimawandel. Bei der Kühlenergie geht der Referenzverlauf davon aus, dass der Bedarf auch ohne Klimawandel leicht zunimmt.

Eine Auswertung des Bereichs Privathaushalte (BFE 2007a), des Dienstleistungssektors (BFE 2007b) und des Industriesektors (BFE 2006) zeigt, dass sowohl bei den Privathaushalten wie im Dienstleistungssektor die Einsparungen bei der Raumwärme mengenmässig grösser sind als der steigende Elektrizitätsverbrauch für die zusätzliche Kühlung. Daraus ergibt sich eine leichte Reduktion des gesamten Energiebedarfs für Heizung und Kühlung im Vergleich zum Referenzverlauf ohne Berücksichtigung des Klimawandels. Im Industriesektor gibt es, aus oben erwähntem Grund, kaum einen Unterschied zum Referenzverlauf.

Die relativen Veränderungen des Energieverbrauchs bei den Privathaushalten, im Dienstleistungs- und Industriesektor auf schweizerischer Ebene dürften auch auf die aargauischen Verhältnisse zutreffen. Zu beachten ist dabei der gegenüber dem schweizerischen Durchschnitt erhöhte Anteil des Industriesektors im Aargau. Dies bedeutet, dass sowohl der Rückgang der Aargauer Energienachfrage im Winter als auch die Zunahme der Energienachfrage im Sommer tendenziell etwas schwächer ausfallen. Ob der überdurchschnittliche Anteil des Industriesektors auch in Zukunft so bleiben wird, ist abhängig von der weiteren wirtschaftlichen Entwicklung und den staatlichen Rahmenbedingungen.

Beim Energieverbrauch des Verkehrs wird davon ausgegangen, dass er hauptsächlich von Faktoren, wie die technologische Entwicklung oder Rahmenbedingungen der Klimapolitik abhängt (OcCC 2007). Eine direkte, aber angesichts dieser Faktoren vernachlässigbare Auswirkung des Klimawandels ist ein erhöhter Kühlenergiebedarf in Autos und im öffentlichen

Verkehr in den künftig wärmeren Sommermonaten und ein verminderter Heizenergiebedarf in den Wintermonaten.

### 10.6.2 Energieproduktion

Bei den Flusskraftwerken können einerseits Niedrigwasser im Spätsommer und Herbst die Produktion der Flusskraftwerke reduzieren (vgl. Kapitel 4.7.3). Andererseits profitieren die Flusskraftwerke im Winter und Frühjahr von erhöhten Abflüssen, da heute die Turbinen in dieser Jahreszeit kaum ausgelastet sind. Die Abflussverteilung ist zudem abhängig von der Abflussregulierung, die bisher nicht auf die Maximierung der Stromproduktion, sondern auf die Verhinderung von Hochwasser ausgerichtet ist.

Generell nimmt der Abfluss gemäss Kapitel 4.7.3 langfristig tendenziell ab: Infolge der mittleren Abnahme der Niederschläge und der Zunahme der Evapotranspiration nimmt der Abfluss ab. Gemäss KOHS 2008 dürfte sich das mittlere jährliche Abflussvolumen bis 2050 um ca. 10% verringern. Diese tendenzielle Abnahme des Abflusses hat langfristig eine verminderte Elektrizitätsproduktion zur Folge. Unter Beibehaltung heutiger Ansätze führt dies zu einer leichten Einbusse bei den Erträgen aus dem Wasserzins. Die jährlichen Einnahmen aus den zweckgebundenen Wasserzinsen betragen aktuell rund 33 Millionen Franken (Regierungsrat Aargau 2009c).

Der Rückgang des mittleren Abflusses dürfte bei der Wasserkraft langfristig bis 2050 zu einer durchschnittlich 7% geringeren Stromproduktion führen (BAFU und BFE 2007). Durch die voraussichtlich häufigeren und teilweise grösseren Hochwasser im Winter (vgl. Kapitel 4.7.6) entsteht ein weiterer Produktionsverlust, der allerdings nicht quantifizierbar ist (OcCC 2007). Die Entwicklung bei der Hochwassergefahr kann auch bauliche Anpassungen der Flusskraftwerke nötig machen und entsprechende Kosten verursachen. Weiter sind höhere Unterhaltskosten denkbar durch Veränderungen im Einzugsgebiet, die zu einem höheren Geschiebe-, Schwebstoff- und Geschwemmseltrieb führen. Aktuell fehlen in der Schweiz noch Studien, die klimatologische, hydrologische und kraftwerksbetriebliche Modelle für unterschiedliche, repräsentative Einzugsgebiete und Kraftwerke verbinden und von verschiedenen Klimaszenarien in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung ausgehen (Hänggi und Plattner 2009).

Die Lebensdauer des Kernkraftwerks Beznau I und II ist begrenzt. Bei einem Ersatzkernkraftwerk für Beznau I und II würde die Flusskühlung entfallen und der Kühlwasserbedarf von 40 m<sup>3</sup>/s auf 1 m<sup>3</sup>/s (zur Verdampfung) gesenkt (Regierungsrat Aargau 2009b). Damit ergeben sich keine klimarelevanten Auswirkungen.

### 10.6.3 Erneuerbare Energien

Bei der Windkraft ist der Einfluss des Klimawandels auf die mittleren Windgeschwindigkeiten in der Schweiz unklar. Die Holzenergie wird vom Wachstum der Biomasse in den Wäldern

profitieren (vgl. Kapitel 7.6.4). Intensive Wetterereignisse, wie beispielsweise Hitzeperioden können allerdings zu geringerem Wachstum oder zum Verlust von Biomasse und damit verbundenen Zwangsnutzungen führen. Bei der Solarkraft nimmt die Sonneneinstrahlung zu (OcCC 2007).

Eine Zunahme der Nachfrage nach Energie mit geringem CO<sub>2</sub>-Ausstoss kann die Verbreitung von erneuerbaren Energien fördern (OcCC 2007), wobei Zielkonflikte zu beachten sind beispielsweise im Falle der Windkraft mit dem Landschaftsschutz.

## 10.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Neben den direkten Auswirkungen der Klimaveränderung wirken sich auch andere Einflussfaktoren wie das Wirtschaftswachstum, die technologische Entwicklung, die Bevölkerungsentwicklung, die Entwicklung des Erdölpreises und die Öffnung des Elektrizitätsmarktes auf den Energiebereich aus. Diese Veränderungen klima-unabhängiger Rahmenbedingungen wirken sich stärker auf Energieverbrauch und -produktion aus als der Klimawandel (OcCC 2007). Energie- und Klimapolitik sind aber in vielen Aspekten miteinander verknüpft, weil eine effizientere Nutzung der Energie und die Förderung erneuerbarer Energien auch im Sinne der Klimapolitik ist.

In der Schweiz werden sich klimaunabhängig drei Rahmenbedingungen im Energiebereich verändern. Die Kernkraftwerke werden zwischen 2020 und 2043 das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen. Die privilegierten Stromimportverträge mit Frankreich werden ab 2016 auslaufen. Die EU strebt langfristig eine verstärkte Harmonisierung und Integration des Energiemarktes an (Energie Trialog Schweiz 2009).

Um Strategien im Umgang mit den sich abzeichnenden Herausforderungen zu entwickeln, sind vorerst Szenarien und Einschätzungen zu den künftigen Potentialen für eine effizientere Energienutzung und zu den Potentialen erneuerbarer Energien in der Schweiz notwendig. Der Verein Energie Trialog Schweiz hat solche Abschätzungen vorgenommen, welche im Folgenden erläutert werden.

Das Potenzial für Effizienzgewinne beim Gesamtenergieverbrauch (Endenergie) pro Person wird auf 1.0% pro Jahr bis 2035 und 0.9% bis 2050 geschätzt (Basisjahr 2005). Die Endenergieintensität, der Endenergieverbrauch pro Franken Bruttoinlandprodukt, nimmt bis 2050 schätzungsweise jährlich um 1.8% ab. Beim Verhältnis Endenergieverbrauch pro Franken Bruttoinlandprodukt wächst das Bruttoinlandprodukt rascher als beim Verhältnis Endenergieverbrauch pro Person die Bevölkerung wächst. Deshalb ergibt sich beim Endenergieverbrauch pro Franken Bruttoinlandprodukt eine höhere Abnahmerate. (Energie Trialog Schweiz 2009).

Die Effizienzgewinne bei den einzelnen Energieträgern lassen sich im Vergleich zu einer „frozen-efficiency“-Entwicklung ermitteln, bei der von der heutigen Technologie ausgegangen und lediglich der Ersatz der älteren Anlagen durch die heutige Technologie zugelassen wird.

Bei der Nachfrage nach Strom sind im Vergleich zu dieser „frozen-efficiency“-Entwicklung bis 2035 1.2% und bis 2050 1.1% pro Jahr an Effizienzsteigerungen möglich. Die Effizienzsteigerungen werden allerdings überkompensiert von einer wachsenden Nachfrage durch zahlreichere Wärmepumpen, Umsteigen auf den öffentlichen Verkehr und eine zusätzliche Elektrifizierung des Verkehrs (Energie Dialog Schweiz 2009).

Die thermischen Energieträger, z.B. Heizöl, Holz und Fernwärme, weisen wiederum im Vergleich zur „frozen-efficiency“-Entwicklung ein Effizienzsteigerungspotenzial von jährlich 1.0% bis 2035 und 0.9% bis 2050 auf (Energie Dialog Schweiz 2009).

Bei den Treibstoffen verringert sich voraussichtlich die Nachfrage durch eine gesteigerte Effizienz um jährlich 1.2% bis 2035 und 1.4% bis 2050 verglichen mit der „frozen-efficiency“-Entwicklung. Die Treibstoffnachfrage wird zusätzlich reduziert durch einen Trend zur Elektrifizierung der Mobilität, dem wachsenden Anteil des öffentlichen Verkehrs am Modalsplit sowie eine leichte Fahrleistungsreduktion (Energie Dialog Schweiz 2009).

Aufgrund des hohen Ausgangsverbrauchs, weitgehend fehlender Substitutionsmöglichkeiten sowie den angestrebten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen weist der Treibstoffbereich gemäss Energie Dialog Schweiz die höchsten Effizienzsteigerungsraten auf. Obwohl der Gebäudebereich mindestens ebenso grosse Potenziale aufweist, ist angesichts der längeren Re-Investitionszyklen die Dynamik in diesem Bereich langsamer. Beim Strom überkompensiert der Nachfrageanstieg die bereits erwähnten Effizienzgewinne und führt zu einem wachsenden Verbrauch.

Die Gesamtnachfrage nach Energie lässt sich durch die abgeschätzten Effizienzsteigerungen bis 2035 um 20%, bis 2050 um 30% gegenüber dem aktuellen Verbrauch senken. Wegen der Verlagerung der Energienachfrage von fossiler zu elektrischer Energie ist aber eine „zweite Elektrifizierung“ notwendig (Energie Dialog Schweiz 2009).

Der Entwicklung der Nachfrage steht die zukünftige Energieproduktion gegenüber, längerfristig insbesondere diejenige der erneuerbaren Energien. Für die Einschätzungen zu den künftigen Potentialen erneuerbarer Energien wurde davon ausgegangen, dass keine neuen Grosskraftwerke gebaut, die bestehenden Kernkraftwerke am Ende der technischen Nutzungsdauer abgeschaltet werden und die privilegierten Stromimporte aus Frankreich nicht verlängert werden können. Verschiedene Studien kommen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. So variieren die erwarteten Gesamtpotenziale beim Strom um einen Faktor 3 bis 4, bei der Wärme um einen Faktor 2. Die erwarteten Gesamtpotenziale für die erneuerbaren Energien sind in Tabelle 6. dargestellt. Insgesamt kann das erwartete Potenzial der erneuerbaren Energien bis 2035 um rund 50% gesteigert werden. Bis 2050 ist sogar eine Verdoppelung möglich (Energie Dialog Schweiz 2009).

	Heutige Produktion [TWh]	Erwartetes Gesamtpotenzial 2035 [TWh]	Erwartetes Gesamtpotenzial 2050 [TWh]
<b>Strom</b>			
Fotovoltaik	0.02	1.0 - 2.0	8.0 - 12.0
Wind	0.02	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0
Biomasse <sup>1)</sup>	1.30	5.0	5.0
Kleinwasserkraft	3.50	5.0	4.0 - 5.0
Geothermie		0.0 - 0.5	1.5 - 3.5
Grosswasserkraft	31.2	29.8	28.3
<b>Total</b>	<b>36.04</b>	<b>41.8 - 44.3</b>	<b>48.8 - 56.8</b>
<b>Wärme</b>			
Solarthermie	0.30	1.5 - 2.5	4.0 - 5.0
Umgebungswärme	1.80	6.0 - 7.0	11.0 - 12.0
Geothermie		0.0 - 1.0	5.0 - 10.0
Biomasse <sup>1)</sup>	8.60	11.0 - 13.0	11.0 - 13.0
Abfälle <sup>2)</sup>		0.5 <sup>3)</sup>	0.5 <sup>3)</sup>
<b>Total</b>	<b>10.70</b>	<b>19.0 - 24.0</b>	<b>31.5 - 40.5</b>
Treibstoffe	0.01	5.0	5.0
<b>Total erneuerbare Energien</b>	<b>46.75</b>	<b>65.8 - 73.3</b>	<b>85.3 - 102.3</b>

1) inkl. Abfälle aus erneuerbaren Rohstoffen

2) nicht-erneuerbarer Anteil

3) Schätzung aufgrund Vergleich Grundlagenpapier „Erneuerbare Energien“ (ETS 2009) und Studie „Optimale Nutzung von Energie aus Abfällen“ (Neosys 2009)

Tabelle 6: Schätzungen für das erwartete Gesamtpotenzial von erneuerbaren Energien 2035 und 2050 (Energie Dialog Schweiz 2009):

Langfristig haben bis 2050 Fotovoltaik, Treibstoffe, Wind und Geothermie die grössten Wachstumspotenziale. Bei Fotovoltaik, Treibstoffen und Wind beträgt aufgrund einer tiefen Ausgangslage die Produktion 2050 das 150- bis 600-fache der heutigen Produktion. Nicht nur das Wachstum erneuerbarer Energien zeigt grosse Veränderungen im Schweizer Energiesystem auf, sondern auch Verschiebungen im Mix der erneuerbaren Energien. Die Fotovoltaik vergrössert ihren Anteil am Mix der erneuerbaren Energien von aktuell 0.02% auf bis zu 11.73% im Jahr 2050. Die Treibstoffe aus erneuerbaren Energien, die Umformung von Biomasse zu Biogas und Biodiesel, legen von 0.02% auf bis 5.86% zu. Bei der Windkraft dürfte ab 2035 das Potenzial an geeigneten und von der Bevölkerung akzeptierten Standorten ausgeschöpft sein. Entsprechend steigt der Anteil am Mix lediglich von 0.04% auf bis zu 2.93% 2050. Ein tieferes, aber immer noch relativ hohes Wachstum weist die Solarthermie auf, sie nimmt bis 2050 auf das 17-fache der aktuellen Produktion zu und erhöht ihren Anteil am Mix von 0.64% auf bis zu 4.89%. Die heute noch nicht genutzte Geothermie kann 2050 einen Anteil am Mix der erneuerbaren Energien von bis zu 9.78% erreichen. Die Nutzung der Umgebungswärme mit Wärmepumpen wächst bis 2050 um das sechsfache und steigert den Anteil am erneuerbaren Energiemix von 3.85% auf bis zu 12.90%. Die Grosswasserkraft wird

leicht zurückgehen, da 90% der geeigneten Bäche und Flüsse bereits genutzt werden, neue Anlagen schwierig zu realisieren sind, die Umsetzung der Restwasservorschriften zu einer Reduktion der mit Turbinen nutzbaren Wassermenge führen und wie bereits erwähnt zusätzlich die Klimaerwärmung die Abflussmenge verringern wird. Für die Stromproduktion durch Grosswasserkraftwerke wird bei einer vollständigen Umsetzung der Gewässerschutzgesetzgebung schweizweit mit einem Rückgang von 5% bis 2035 und einer Reduktion von 7% bis 2050 gerechnet (Energie Dialog Schweiz 2009). Im Aargau ist die Umsetzung der Bestimmungen zu den Restwassermengen bereits weit fortgeschritten.

Bei den dargelegten Schätzungen zu den Potentialen erneuerbarer Energien bleiben wichtige ökonomische, gesellschaftliche und technische Aspekte sowie Zielkonflikte noch unberücksichtigt, wie beispielsweise die gesellschaftliche Akzeptanz einzelner Energieformen. Zu diesen Aspekten existiert für die Schweiz bisher keine umfassende Studie.

Während heute die erneuerbaren Energien nur eine untergeordnete Rolle spielen (ohne Grosswasserkraft), decken sie nach den oben ausgeführten Schätzungen für Nachfrage und Angebot 2035 rund 40%, 2050 etwa 55% der Nachfrage ab (Energie Dialog Schweiz 2009). Die Differenz zwischen der Energienachfrage und dem inländischen erneuerbaren Energieangebot muss mit Importen oder der Nutzung nicht-erneuerbarer Energien ausgeglichen werden. Dabei gilt es, Aspekte wie CO<sub>2</sub>-Emissionen, Versorgungssicherheit, Abhängigkeiten und Integration in Energiemärkte zu beachten, die an dieser Stelle nicht vertieft werden.

Die aus Angebot und Nachfrage resultierenden Energiepreise werden nicht mehr auf das tiefe Niveau wie von 1985 bis 2000 zurückgehen. Zu dieser Entwicklung tragen die stark zunehmende globale Energienachfrage, die ebenfalls weiterhin steigende Energienachfrage in der Schweiz, die je nach politischen Entscheiden zukünftig abnehmende schweizerische Energieproduktion durch Wasser- und Kernkraft sowie die Produktionseinbussen durch vermehrte intensive Wetterereignisse. Wichtig für die Entwicklung der Energiepreise ist die Frage, ob die externen Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen internalisiert werden. Weiter können politische Verwerfungen die Energiepreise mittel- bis langfristig ansteigen lassen (OcCC 2007). In obigen Abschätzungen zu den Effizienzsteigerungspotentialen und den Potentialen erneuerbarer Energien des Energie Dialogs Schweiz sind Preissteigerungen berücksichtigt.

## 11 Ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft

### 11.1 Einleitung

Die Landwirtschaft zählt zu den Bereichen, auf welche die Klimaerwärmung grosse Auswirkungen hat. In diesem Kapitel werden dabei, wie insgesamt im Bericht, nur die Aspekte der Landwirtschaft betrachtet, die einen starken Bezug zu den Aufgaben des Departements Bau, Verkehr und Umwelt haben. Es sind dies die Themen Bewässerung, Biodiversität und Produktivität des Bodens.

Bei den schweizerischen Treibhausgasemissionen 2007 stammen 11.5% der CO<sub>2</sub>-Äquivalente von der Landwirtschaft (BAFU 2009). Der grösste Teil davon ist auf den Methanausstoss von Nutztieren zurückzuführen. Das Methan wird dabei entsprechend seinem Klimaerwärmungspotenzial in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet.

### 11.2 Wasserbedarf, Bewässerung

Die sommerliche Austrocknung der Böden hat in der Periode von 1980 bis 2006 zugenommen, wobei nicht alle Regionen gleich stark betroffen sind (vgl. Abbildung 30). Der Aargau ist vor allem im Süden, in den Bezirken Muri und Bremgarten sowie im Jura, von längeren Trockenheitsperioden betroffen (Fuhrer und Jasper 2009). Von diesen Entwicklungen ist der Wasserbedarf der Landwirtschaft unmittelbar betroffen.

Die aargauische Landwirtschaft deckt ihre Wasserversorgung hauptsächlich mit den natürlichen Niederschlägen. Am meisten Wasser benötigt der Gemüsebau, gefolgt von Ackerbau und Futteranbau. Ende März 2009 gab es zudem Bewilligungen für Wasserentnahmen aus Flüssen und Bächen für gut 1082 Liter pro Sekunde, was 61% des gesamten bewilligten Volumens ausmachte (vgl. Tabelle 7). Die restlichen Bewilligungen betreffen Gärtnereien, Baumschulen, Privatpersonen, Sportplätze und industrielles Brauchwasser. Bei den Mengen pro Jahr belief sich der landwirtschaftliche Bedarf auf 5250 Kubikmeter oder 96% des bewilligten Volumens.

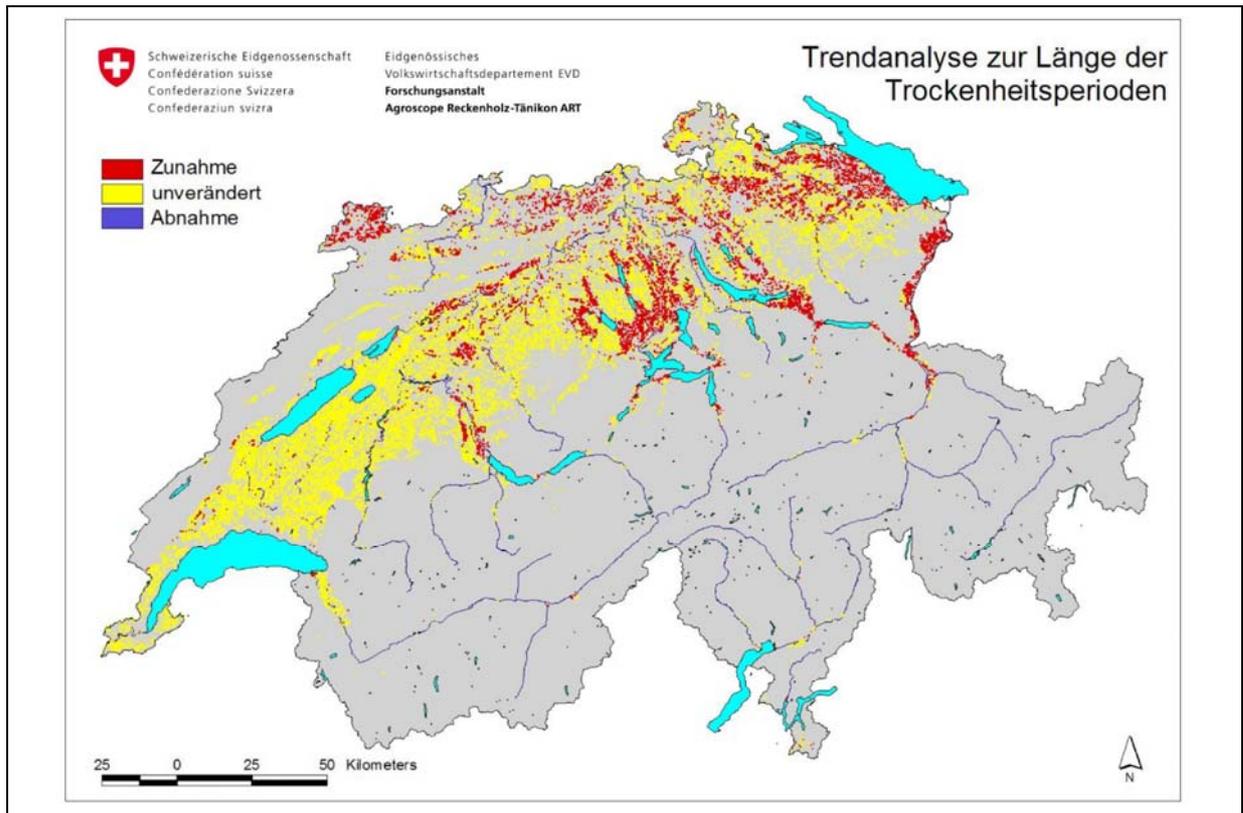


Abbildung 30: Trendanalyse zur Länge der Trockenperioden 1980 – 2006 (Fuhrer und Jasper 2009).

Bewilligungen für Wasserentnahmen	Bewilligungsart	
	Liter pro Sekunde	Kubikmeter pro Jahr
Total	1781.7	5500
davon Landwirtschaft	1081.5	5250
Anteil Landwirtschaft am bewilligten Volumen	60.7%	95.5%

Tabelle 7: Bewilligungen für Wasserentnahmen im Kanton Aargau, Stand Ende März 2009 (BVU 2009).

Die bewilligten Wassermengen sagen jedoch nichts über den effektiven Wasserbezug aus. Darüber liegen keine Daten vor. Die Bewilligungen können aber als Indikator für den Handlungsspielraum gesehen werden, den sich die aargauische Landwirtschaft für mögliche Bewässerungen offenhalten will.

Im Hitzesommer 2003 wurden ausserordentlich viele kurzfristige Bewilligungen erteilt, vor allem für die Flüsse Aare, Reuss, Limmat und Rhein. Die Entnahme aus den meisten Bächen wurde hingegen aus ökologischen Gründen (vgl. Kapitel 4.6 und 5.5) verboten (BVU 2009).

### 11.3 Biodiversität im Landwirtschaftsgebiet

Die Landwirtschaft spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Artenvielfalt. Die Entwicklung der Artenvielfalt und die Rolle der Landwirtschaft sind in Kapitel 9 beschrieben. Im Kanton Aargau waren 2005 61'836 Hektaren landwirtschaftliche Nutzfläche (DFR 2007a). Dies entspricht 44% des Kantonsgebietes. Der Kesslerindex, ein Mass für die Artenvielfalt, ist im Landwirtschaftsgebiet seit 2000 leicht gestiegen (vgl. Kapitel 9.2).

### 11.4 Ausgewählte Aspekte zur Produktivität des Bodens

Der Boden ist die Grundlage für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln. Im Hinblick auf den Klimawandel spielen neben dem verfügbaren Wasser im Boden (siehe Kapitel 11.2) auch die Erosion eine Rolle für die künftige Produktivität des Bodens.

Gemäss Bundesamt für Landwirtschaft spielt in der Schweiz Winderosion in der Regel kaum eine Rolle. Die durch Wassererosion verursachten Bodenabträge sind gering. Erosion ist aber zusammen mit Schadstoffbelastung und Unterbodenverdichtung die wichtigste Ursache von Bodenschädigungen in der Schweiz (BLW 2008).

### 11.5 Auswirkungen des Klimawandels

#### 11.5.1 Wasserbedarf, Bewässerung

Die Klimaerwärmung führt zu höheren Temperaturen und weniger Sommerniederschlag bei erhöhter Evapotranspiration (vgl. Kapitel 2). Dadurch werden die Böden trockener.

Bei einer Klimaerwärmung von mehr als 2 bis 3°C im Jahresmittel erhöht sich je nach Luftfeuchtigkeit, Bodenfeuchte, kurzweiliger Einstrahlung und dem Vegetationszustand die effektive Verdunstung und damit der Wasserverbrauch der Kulturpflanzen. Modellrechnungen prognostizieren einen klaren Rückgang der mittleren Bodenfeuchte während der Vegetationszeit. Durch die bis zu 31% verringerten Niederschläge im Sommer (vgl. Kapitel 2.2) könnte während der Anbauzeit an vielen Standorten Wassermangel viel häufiger werden.

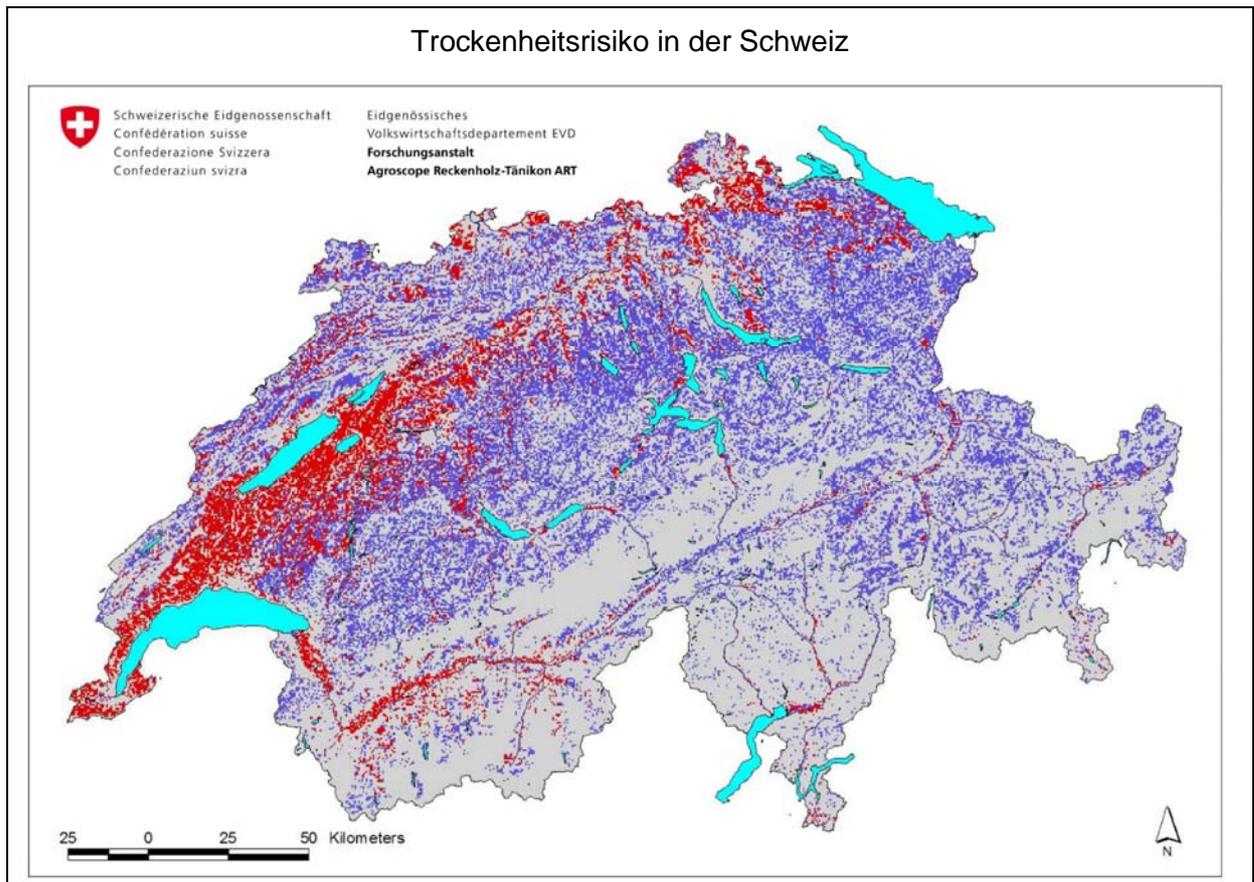


Abbildung 31: Flächen (rot), auf denen in jedem dritten Jahr ohne Bewässerung eine Ertragsminderung zu erwarten ist. Flächen (blau), auf denen keine Ertragsminderung zu erwarten ist. Das Trockenheitsrisiko wurde aufgrund des Verhältnisses von potentieller zu aktueller Evapotranspiration im Zeitraum 1980 bis 2006 berechnet (Fuhrer und Jasper 2009).

Die Abbildung 31 zeigt das Trockenheitsrisiko, basierend auf den Daten der Periode 1980 bis 2006. Rot markiert sind die Flächen, auf denen in jedem dritten Jahr ohne Bewässerung eine Ertragsminderung zu erwarten ist (Fuhrer und Jasper 2009). Der Aargau ist davon wenig betroffen, mit lokalen Konzentrationen um Möhlin und im Bezirk Zurzach.

Mit dem Klimawandel werden sich die Flächen mit Trockenheitsrisiko ausweiten. Damit steigt die Nachfrage nach Bewässerung. Betroffen sind wasserbedürftige Kulturen wie Kartoffeln und Gemüse, aber auch Mais und Getreide. Bei zunehmender Erwärmung sind auch exponierte Graslandflächen betroffen (Fuhrer und Jasper 2009).

Durch den erhöhten Wasserbedarf, auch von anderen Akteuren, bei gleichzeitiger Abnahme des Wasserdargebots entstehen bei Bächen neue Wassernutzungskonflikte oder werden bestehende verschärft (vgl. Kapitel 4.7.5).

### 11.5.2 Biodiversität im Landwirtschaftsgebiet

Die Klimaerwärmung hat neben verstärktem Reise- und Güterverkehr dazu beigetragen, dass bisher natürlicherweise nicht vorkommende Tier- und Pflanzenarten (Neobiota) den Weg in den Aargau fanden und teilweise einheimische Arten verdrängen (vgl. Kapitel 9.4). Mit erhöhten Temperaturen könnten sich auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche wärmeliebende Pflanzenarten wie Gräser subtropischen Ursprungs mit geringerem Nährwert für Tiere ausbreiten. Es könnte zu vermehrten Problemen mit holzigen Pflanzenarten und Unkräutern, wie Ackerdistel, Ampfer und Quecke kommen. Der Unkrautdruck dürfte sich erhöhen, da die Unkrautpopulationen die schnellere Anpassungsfähigkeit und eine stärkere Konkurrenzkraft gegenüber Kulturpflanzen aufweisen. Ebenfalls dazu beitragen dürfte die reduzierte Bodenbedeckung, verursacht durch Hitzeperioden und Erosionen (OcCC 2007).

Durch Anpassungen an den Klimawandel können auch neue Nutztier- und Nutzpflanzenarten eingesetzt werden oder Verschiebungen bei den bisherigen Arten stattfinden.

### 11.5.3 Produktivität des Bodens

Die Niederschläge im Winter können sich je nach Klimaerwärmung um bis zu 21% erhöhen (vgl. Kapitel 2.2, Abbildung 2). Winterliche Starkniederschläge können Schäden an Winterkulturen und verstärkte Bodenerosion verursachen. Durch die Erosion wird der Verlust von Nährstoffen gefördert und die Produktivität des Bodens gesenkt (BLW 2008).

Die aufgrund der Klimaerwärmung zu erwartende Zunahme von Sommerdürren wird vermehrt zu kritischen Bodenwasserzuständen führen (OcCC 2007, vgl. Kapitel 11.5.1). Der Wasserbedarf vieler im Aargau angebaute Kulturen wie Getreide, Hülsenfrüchte, Hackfrüchte und Ölsaaten ist mit 400 bis 700 mm relativ hoch (Doorenbos und Kassam 1979). Produktivitätsverluste treten auf, wenn das im Boden verfügbare Wasser über längere Zeit unterhalb 30 – 50% der nutzbaren Feldkapazität liegt (Allen et al. 1998). Im Hitzesommer 2003 betrug der Sommerniederschlag von April bis September im Aargau zwischen 300 und 400 mm (Kanton Aargau et al. 2004).

Wegen des stillstehenden Pflanzenwachstums begünstigen trocken-warme Sommer den Abbau der organischen Substanz und die Nährstoffanreicherung im Boden (z.B. Stickstoffmineralisierung, Bundesamt für Landwirtschaft 2006). Entsprechend beinhalten Starkniederschläge am Ende von Dürreperioden ein grosses Auswaschungsrisiko von Nitrat (vgl. Kapitel 5.4 und 5.6).

## 11.6 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Andere Entwicklungen wie die Ökologisierung der Landwirtschaft, der anhaltende Kulturlandverbrauch durch die Siedlungsentwicklung oder die Liberalisierung der Landwirtschaft und der damit verbundene Strukturwandel (DFR 2007b) dürften sich stärker auf die Landwirtschaft auswirken als die Klimaerwärmung.

## 12 Siedlungsentwicklung

### 12.1 Einleitung

Die Siedlungsentwicklung verläuft weitgehend unabhängig von der Klimaerwärmung (OcCC 2007). Die Bauweise der städtischen Gebiete und der Gebäude wird aber vom Klima beeinflusst. Indirekt ist die Siedlungsentwicklung durch die Hochwassergefährdung betroffen (vgl. Kapitel 4.5.2). Die Aspekte Abwasserreinigung und Siedlungsentwässerung sind in Kapitel 5 behandelt. Der Energieverbrauch in Gebäuden wird in Kapitel 10 betrachtet.

### 12.2 Städtische Wärmeinseln

In vielen städtischen Gebieten liegt die durchschnittliche Temperatur – in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren – um 0.5 bis 0.8°C höher als im Umland (Wypych und Bokwa 2007). Im Winter können es häufig sogar 1.1 bis 1.6°C sein. Diese Erscheinung wird städtische Wärmeinsel genannt. Ihre Intensität wird bestimmt von Wärmeemissionen, Luftverschmutzung, Oberflächengestaltung in der Stadt, Windgeschwindigkeit, Bewölkung und Verdunstung. Im Vergleich zum nicht-städtischen Umland gibt es mehr heisse Tage, weniger Frosttage, eine längere Vegetationsperiode und höhere Niederschlagssumme sowie häufigere Cumulus-Wolken. Der Kühl- und damit Energiebedarf wird durch die Wärmeinsel erhöht.

Die beiden grösseren städtischen Gebiete im Kanton Aargau sind Baden-Brugg mit 138'000 Einwohnern (BVU 2007) und das mit dem Kanton Solothurn geteilte AareLand (Aarau-Olten-Zofingen) mit 188'000 Einwohnern (Departement BVU Kanton Aargau, Departement BJD Kanton Solothurn 2007). Aufgrund der Grünflächen innerhalb der beiden Gebiete kann davon ausgegangen werden, dass der Effekt der Wärmeinsel im Vergleich zu dichter bebauten Städten geringer ausfällt. Die Auswirkungen auf den Kühl- und Heizenergiebedarf (vgl. Kapitel 10.6), die Biodiversität speziell in städtischen Gebieten sowie Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen werden an dieser Stelle nicht vertieft.

### 12.3 Hochwasser

Die in Kapitel 4.7.6 behandelten Hochwasser haben Konsequenzen für die Raumentwicklung. Für Rückhalteräume und Abflusskorridore im Ereignisfall (Überlastfall) sind genügend Flächen erforderlich, welche möglichst frei von Bauten und Anlagen sind.

Die Hochwasser 1999, 2005, 2007 und 2008 trugen weiter dazu bei, dass der Kanton Aargau bis Ende 2009 eine Gefahrenkarte Hochwasser erstellt (vgl. Kapitel 4.5.2). Diese muss bei Baubewilligungs- und Nutzungsplanungsverfahren berücksichtigt werden und kann zu Auflagen führen (BVU 2009). Die Grundlagen für die Gefahrenkarte sind im Kapitel 4.5 abgehandelt.

## 12.4 Gebäude

Infolge der bisherigen Klimaerwärmung werden an Gebäuden zunehmend Beschattungsanlagen, Dämmungen und Anlagen zur Energieerzeugung, wie Photovoltaik angebracht (OcCC 2007). Die Hagelresistenz der eingesetzten Materialien ist bei Büro- und Industriegebäuden häufig mangelnd. Dies ist ein Grund für die gestiegenen Hagelschäden, die stärker zunehmen als die Hagelereignisse (vgl. Kapitel 12.6.2). Die grossen Hagelzüge (Zugbahnlänge mindestens 100 km lang) haben sich in der Schweiz zwischen 1983 und 2003 verdoppelt (OcCC 2007). Die Häufigkeit der vier Grosswetterlagen im atlantisch-europäischen Raum, die für intensive Wetterereignisse verantwortlich waren, hat in Zentraleuropa im Sommer seit 1940 deutlich zugenommen.

Die aktuelle Hagelgefahr für den Kanton Aargau ergibt sich, basierend auf der Hagelhäufigkeit 1961 – 2004, wie folgt (Abbildung 32):

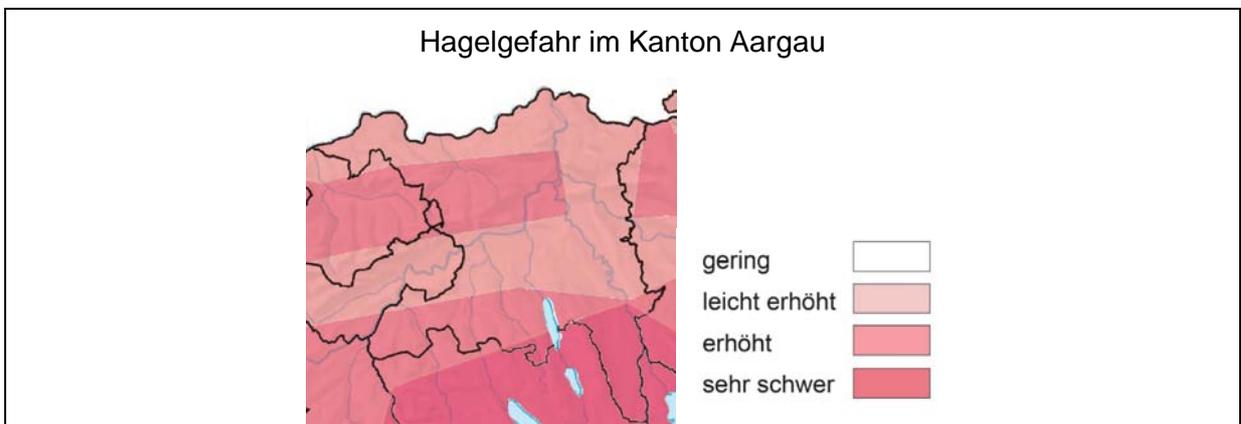


Abbildung 32: Ausschnitt aus der Hagelgefahrenkarte der Schweizerischen Hagel-Versicherungsgesellschaft (Schweizerische Hagel-Versicherung, ab Internet).

2007 wurden der Aargauischen Gebäudeversicherungsanstalt 95 durch Hagel verursachte Elementarschäden gemeldet. Die Gesamtsumme für die Hagelschäden belief sich dabei auf 312'070 Franken.

## 12.5 Hitzesommer 2003

Wie bereits im Kapitel 10.5 dargelegt, stieg im Hitzesommer 2003 die Temperatur in normalen Büroräumen unter Nutzung der Nachtauskühlung während 22 Tagen über die so genannte Komfortgrenze von 26°C. In einem durchschnittlichen Sommer ist dies an 7 Tagen der Fall (OcCC 2007).

Der Hitzesommer 2003 hat gezeigt, dass Hitzewellen Gesundheit und Wohlbefinden beeinträchtigen können. Dieser Aspekt wird hier nicht vertieft, ist aber relevant im Hinblick auf die heutige und künftige Gestaltung von Gebäuden und Siedlungen (vgl. Kap. 12.6.1).

## 12.6 Auswirkungen des Klimawandels

### 12.6.1 Städtische Wärmeinseln

Der Klimawandel mit mittleren Temperaturerhöhungen von 2.7°C bis maximal 4.7°C im Sommer und 1.8°C bis maximal 3.4°C im Winter bis 2050 (vgl. Kapitel 2.1) wird den Effekt der städtischen Wärmeinseln verstärken. Die Differenz zwischen der Temperatur im städtischen Gebiet und dem Umland wird weiter zunehmen, weil städtische Gebiete nachts weniger abkühlen und sich dieser Effekt bei höheren Temperaturen noch verstärkt. Allerdings trägt die weitere bauliche Verdichtung ebenfalls zur Förderung städtischer Wärmeinseln bei. Ob dabei die bauliche Verdichtung oder der Klimawandel die stärkere Wirkung haben wird ist abhängig vom Grad der Verdichtung (Parlow 2009).

Die städtischen Wärmeinseln sind in Kombination mit vermehrt auftretenden trocken-heissen Sommern, wie der Hitzesommer 2003 relevant für die Gesundheit und das Wohlbefinden. Gemäss OcCC 2007 wird die Zunahme von Hitzewellen bis 2050 die wichtigste klimabedingte Veränderung für die Gesundheit sein. Die heutige und künftige Entwicklung und Gestaltung des Siedlungsgebietes ist deshalb von grosser Bedeutung. Bereits heute müssen beispielsweise öffentliche Freiflächen bepflanzt werden, damit in einigen Jahrzehnten wirkungsvolle Beschattung möglich ist.

### 12.6.2 Gebäude

Die Gebäudeversicherungsanstalt erwartet, dass der bisher zunehmende Trend bezüglich Häufigkeit und Schadensausmass in Zukunft anhalten oder sogar verstärkt wird (AGVA 2008). Nehmen die vier entsprechenden Grosswetterlagen weiter zu, könnten Stürme häufiger werden und es müsste auch mit vermehrten extremen Hagelereignissen gerechnet werden. Hagelereignisse sind aber lokal sehr begrenzte Ereignisse, weshalb es schwierig ist, sie in Klimamodellen zu simulieren und Prognosen zu zukünftigen Veränderungen zu machen (OcCC 2007).

Bei Gebäuden reduziert sich im Winter der Heizenergiebedarf klimabedingt, während im Sommer die Nachfrage nach Kühlenergie steigt (vgl. Kapitel 10, Energie). Wie bei der Siedlungsentwicklung ist auch hier die heutige und künftige Bauweise und Gestaltung der Gebäude im Hinblick auf das Wohlbefinden bei vermehrt auftretenden trocken-heissen Sommern von Bedeutung.

## 12.7 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Die Siedlungsentwicklung verläuft weitgehend unabhängig von der Klimaerwärmung (OcCC 2007). Die treibenden Kräfte der Siedlungsentwicklung sind das Bevölkerungswachstum, das Wirtschaftswachstum und der zunehmende Wohlstand, der globale und schweizerisch-

föderale Standortwettbewerb und die verbesserten Erreichbarkeiten. Auf individueller Ebene sind es die Ansprüche und Bedürfnisse nach Arbeit, Wohnraum, Sicherheit, Mobilität und Freizeit, welche die Siedlungsentwicklung prägen. Die Entwicklungen werden unterstützt durch den tiefen Preis der Mobilität.

Die städtischen Wärmeinseln werden unabhängig von der Klimaveränderung durch verdichtetes Bauen in den Städten verstärkt. Dabei wird der Anteil der künstlichen Oberflächen mit anderen wärmephysikalischen Eigenschaften als beispielsweise landwirtschaftlichen Flächen oder Wald erhöht (Parlow 2009).

Bei den Gebäuden haben die Hagelschäden stärker zugenommen als die Hagelereignisse. Neben den nicht hagelresistenten Materialien haben auch das höhere Anspruchsdenken der Versicherten und Zufall das Schadensausmass beeinflusst. So könnten bei kleinräumigen Hagelzügen in den letzten Jahren stärker Gebiete mit höheren Werten getroffen gewesen sein (OcCC 2007).

## 13 Verkehr

Beim Verkehr werden an dieser Stelle der Strassen- und Schienenverkehr betrachtet, da im Kanton Aargau der kommerziellen Schifffahrt eine geringe Bedeutung zukommt und kein internationaler Flughafen betrieben wird. Der Strassen- und Schienenverkehr wird vom Klima, hauptsächlich von der Häufigkeit und Intensität von intensiven Wetterereignissen, beeinflusst.

Der Verkehr trägt mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus Treibstoffen massgeblich zur Klimaerwärmung bei. Bei den schweizerischen Treibhausgasemissionen 2007 entfallen knapp 32% der CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf den Strassenverkehr. Der Schienenverkehr hat einen Anteil von 0.1% (BAFU 2009).

### 13.1 Strassen- und Schienenverkehr

Im Kanton Aargau befinden sich Ende 2006 mit 5593 Kilometern knapp 8% des Schweizer Strassennetzes (STAAG 2008). Das dichte Strassennetz weist gegenüber dem Schienennetz den Vorteil auf, dass teilweise alternative Fahrtrouten vorhanden sind, wenn ein Streckenabschnitt ausfällt (OcCC 2007). Im Kanton Aargau sind 303.5 km Schienenwege vorhanden. Das entspricht gut 10% des schweizerischen Schienennetzes (STAAG 2003). Der Kanton tritt als Besteller von Bahn-Verkehrsleistungen auf und entrichtet Beiträge an die ungedeckten Betriebskosten des Regionalverkehrs.

### 13.2 Hitzesommer 2003

Im Sommer können an Hitzetagen Gleisverwerfungen zu Betriebsstörungen im Schienenverkehr führen (Fleischhauer 2009). Im Hitzesommer 2003 traten solche Verwerfungen schweizweit rund 50% häufiger auf als in einem Durchschnittssommer (OcCC 2007). Um Entgleisungen zu verhindern, müssen die Züge bei Gleisverwerfungen die Geschwindigkeit reduzieren oder können im Extremfall die Strecke nicht mehr befahren.

### 13.3 Auswirkungen des Klimawandels

#### 13.3.1 Strassenverkehr

Der Rückgang von Kälteperioden und Frosttagen (vgl. Kapitel 2.3) wird eine Reduktion der Einschränkungen mit sich bringen. Schneeärmere Winter (vgl. Kapitel 2.2) senken zudem den Aufwand für den Strassenunterhalt.

Die erwarteten häufigeren und teilweise stärkeren Hochwasser im Winter (vgl. Kapitel 4.7.6 und 12.3) und die seltener werdenden, aber intensiveren Stürme (vgl. Kapitel 2.3) können vermehrt zu kurzfristigen Verkehrsunterbrüchen und Schäden an der Verkehrsinfrastruktur (Unterspülungen) führen (Fleischhauer 2009, OcCC 2007). Hanginstabilitäten beispielsweise infolge von Starkniederschlägen sind aufgrund der aargauischen Topografie und Geologie vor allem im Jura und in den Molassegebieten nördlich der Lägern ein Risiko. Potentielle Bewegungsareale sind Hanglagen mit anstehenden oder zu Hanglehm verwittertem Tongesteinen oder Mergeln, die zum Beispiel im Bereich der Antiklinalkerne der Juraketten vorkommen, bzw. im Molassegebiet ausgedehnte Hangbereiche betreffen können. Im Aargau handelt es sich um die Areale, deren Instabilitäten in der Regel schon heute bekannt sind.

Ingenieurbauwerke wie Brücken, Tunnels und Durchlässe können die Temperaturzunahme der Klimaerwärmung ohne bauliche Probleme aufnehmen. Bei grösseren Hochwassermengen kann es zu vermehrten Kolkerscheinungen und Durchflussproblemen bei Brücken und Durchlässen kommen (OcCC 2007).

Im Sommer können vermehrte Hitzeperioden zu Schäden an der Strasseninfrastruktur führen. Schäden am Strassenbelag, zum Beispiel durch Spurrillen, sind möglich (Fleischhauer 2009). Solche Hitzeschäden gab es bisher im Aargau aufgrund der Härte der Beläge wenig (Abteilung Tiefbau Kanton Aargau 2009). Sollten künftig hitzebeständigere Beläge notwendig werden, dürfen diese nicht lärmintensiver sein als heutige Beläge.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, der weltweiten Ressourcenknappheit bei steigendem Wohlstand sowie lokaler Lärm- und Luftbeeinträchtigungen wird der Verbrennungsmotor beim Auto längerfristig durch alternative Systeme ersetzt, wobei Elektromotoren im Vordergrund stehen. Elektrofahrzeuge sind, falls der Strom aus erneuerbaren Quellen stammt, umweltschonend und energieeffizient. Ihre Reichweite ist zur Zeit noch beschränkt und die Batterien sind teuer. Bereits heute werden aber Hybridfahrzeuge standardmässig produziert und längerfristig ist eine weitere Elektrifizierung des Verkehrs wahrscheinlich. Gemäss Beckmann 2009 werden ab 2011 Plug-in-Hybride und reine Elektrofahrzeuge von fast allen grossen Automobilherstellern in Grossserien angeboten werden. Analysten rechnen in Europa mit einem Marktanteil von Hybridautos um 25% bis 2020 (Beckmann 2009).

Die Elektrifizierung des Verkehrs bedingt auf der Versorgungsseite ein entsprechendes Angebot an CO<sub>2</sub>-armem Strom. Welche Auswirkungen die längerfristige Elektrifizierung des Verkehrs auf die Verkehrsplanung und die Verkehrsinfrastruktur hat, ist zu analysieren.

### 13.3.2 Schienenverkehr

Die prognostizierte Niederschlagszunahme im Winter (vgl. Kapitel 2.2) sowie die vermehrten winterlichen Starkniederschläge erhöhen die Gefährdung der Trassenstabilität, insbesondere bei Böschungen und Hängen. Aucherspülungen von Trassen sind möglich. Im Mittelland kann für Trassen eine zukünftig erhöhte Abrutschgefahr von künstlichen Böschungseinschnitten ausgehen (OcCC 2007). Für das Gebiet südlich der Aare ist diese Problematik aufgrund der geologischen Verhältnisse allerdings höchstens lokal relevant. Nördlich der

Aare ist die Aufmerksamkeit auf Böschungen in Tongesteinen des Juras zu richten. Die konkrete Gefährdungssituation hängt von den lokalen geologischen Verhältnissen (Schichtneigung, Exposition, Verwitterungszustand usw.) ab.

Im Hinblick auf häufigere trocken-heisse Sommer, könnte sich die Problematik der Geleiseverwerfungen akzentuieren. Sommerliche Wärmegewitter stellen für Fahrleitungen eine Gefahr durch Blitzeinschläge dar. Diese können zu Betriebsunterbrüchen und Beschädigungen der Fahrleitungsanlagen führen. Bis jetzt können allerdings keine Prognosen für Sommergewitter gemacht werden und die Veränderung dieses Risikos kann nicht abgeschätzt werden.

#### 13.4 Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel

Der Verkehr wird stark beeinflusst von der wirtschaftlichen Entwicklung und dem Mobilitätsverhalten, welches sich durch die räumliche Verteilung von Wohnen, Arbeiten und Freizeit ergibt (BVU 2006). Für das Strassennetz haben andere Faktoren, zum Beispiel eine höhere Gewichtslimite bei Lastwagen, die Transportkosten oder ein vermehrtes Aufkommen schwerer Fahrzeuge, mit grosser Wahrscheinlichkeit grössere Folgen als die Klimaerwärmung (OcCC 2007).

## **14 Handlungsfelder**

In diesem Kapitel werden die wichtigsten in den Kapiteln 4 – 13 diskutierten Wirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des BVU, verbunden mit dem heutigen Handlungsbedarf, dargelegt (siehe auch tabellarische Zusammenfassung im Anhang 16.1).

Die Auswahl der Wirkungen orientiert sich an der Art und Intensität, wie sich der Klimawandel voraussichtlich auswirken wird. Die Art und Intensität der Wirkungen hängt wiederum stark mit den spezifischen Eigenheiten des Kantons Aargau zusammen. Wie bereits in der Einleitung dargelegt, soll vor allem aufgezeigt werden, wo künftig das Augenmerk liegen muss, um Risiken und Chancen frühzeitig zu erkennen und um handlungsfähig zu bleiben. Die Handlungsfelder berücksichtigen den Handlungsbedarf, soweit er bereits heute besteht, und die Handlungsmöglichkeiten des Kantons. Die genannten Aufgabenbereiche entsprechen dem Aufgaben- und Finanzplan des Kantons Aargau (Kanton Aargau 2009).

### **Gewässer (Kapitel 4) – Aufgabenbereich Umweltentwicklung (625): Hochwassermanagement**

Das regionale und kantonsübergreifende Hochwassermanagement ist weiter zu entwickeln. Künftig häufigere und höhere Hochwasserspitzen und grössere Sedimentfrachten bedingen entsprechende Gerinnequerschnitte und Ablagerungsräume. Für Rückhalteräume und Abflusskorridore im Ereignisfall sind genügend Flächen erforderlich, welche möglichst frei von Bauten und Anlagen sind. Im Hinblick auf den Klimawandel kommt der Betrachtung der Überlastszenarien, welche die Dimensionierung von Schutzmassnahmen deutlich übertreffen, eine grosse Bedeutung zu. Hochwasserschäden müssen durch eine konsequente Umsetzung der Gefahrenkarte präventiv reduziert werden.

### **Grundwasser und Wasserwirtschaft (Kapitel 5) – Aufgabenbereiche Umweltentwicklung (625), Umweltschutz (620) sowie Wald, Jagd und Fischerei (645): Niedrigwassermanagement**

Das Niedrigwassermanagement für Bäche in trocken-heissen Perioden ist auszubauen. Die Wasserentnahme aus Bächen zu Bewässerungszwecken wirkt sich in trockenen Sommern negativ auf die Grundwasserinfiltration und die Gewässerökologie aus. Bewirtschaftungskonzepte sind daher erforderlich. Bei der Erarbeitung und Weiterentwicklung von Bewirtschaftungskonzepten sind die Zielkonflikte zwischen dem Gewässerschutz (z.B. Fischbestand, Wasserqualität), der Sicherung der Trinkwasserversorgung und dem Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft zu beachten.

### **Grundwasser und Wasserwirtschaft (Kapitel 5) – Aufgabenbereich Umweltschutz (620): Sicherstellung Wasserversorgung**

Die Wasserversorgung ist über einen konsequenten Netzverbund langfristig zu sichern. Die stärkste Gefährdung der Versorgungssicherheit angesichts des prognostizierten Klimawandels besteht in den oberen Einzugsgebieten der Bäche des Mittellandes und in den Juratä-

lern, sofern diese Regionen nicht in Verbundsysteme integriert sind, welche Grundwasser aus den grossen Flusstälern einspeisen können.

Die Risiken für die Gefährdung der Grundwasserqualität sind zu minimieren. Die Risikogebiete für kurzfristige Anstiege der Nitratkonzentration im Grundwasser als Folgeerscheinung von Niederschlägen nach langen Trockenperioden im Sommerhalbjahr zeichnen sich durch geringe Flurabstände des Grundwassers und eine intensive Landwirtschaft aus. Im Zuströmbereich von Trinkwasserfassungen sind allenfalls Bewirtschaftungsauflagen erforderlich, um die Grundwasserqualität gewährleisten zu können.

#### **Wald (Kapitel 7) – Aufgabenbereich Wald, Jagd und Fischerei (645): Baumartenzusammensetzung**

Standortgerechte Baumarten sind weiter zu begünstigen um die Bestände zu stabilisieren. Die Begünstigung von standortgerechten Baumarten in ihrem ganzen Spektrum, indem man differenzierte Verjüngungsverfahren und Mischungsregulierung darauf ausrichtet, fördert die Anpassung an den Klimawandel und mindert Risiken. Dies gilt insbesondere auch für Risiken infolge Schadorganismen. Höhere Temperaturen, trockene Sommer und Witterungsextreme führen zu einer Erhöhung der Vermehrungsraten von Schadorganismen und gleichzeitig zu einer Schwächung der Wirtspflanzen. Der Aufbau eines national eingebetteten, kantonalen Monitoringsystems hilft frühzeitig ungünstige Entwicklungen zu erkennen. Die Bereitschaft für die Bewältigung von Sturmwurf und -bruch ist zu verbessern. Da die Intensität künftiger Stürme zunehmen könnte, ist die Vorbereitung im Hinblick auf die unmittelbare Ereignisbewältigung und die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung von Folgeschäden wichtig.

#### **Biologische Vielfalt (Kapitel 9) – Aufgabenbereich Umweltentwicklung (625): Vernetzung und Weiterentwicklung Neobiota-Strategie**

Die Vernetzung von Lebensräumen ist zu fördern, invasive Neobiota sind zu bekämpfen. Eine ausreichende und langfristig gesicherte Vernetzung von Lebensräumen ist längerfristig massgebend für die Artenvielfalt, dies nicht nur wegen dem Klimawandel sondern auch weil viele wertvolle Lebensräume klein sind und nur unter der Bedingung einer engen Vernetzung für das Weiterbestehen vieler Arten ausreichen. Die Vernetzung ermöglicht aber gleichzeitig die Ausbreitung unerwünschter invasiver gebietsfremder Arten. Deshalb muss die kantonale Neobiota-Strategie weiterentwickelt und konsequent umgesetzt werden.

Synergien im Hochwasserschutz und Auenschutz sind zu nutzen: Die für den Aargau wichtigen Fluss begleitenden Auen sind sehr anpassungsfähige Standorte und profitieren von der vergrösserten Dynamik infolge vermehrter Hochwasser. Gleichzeitig dienen Auen als Rückhalteräume für Hochwasser.

#### **Energie (Kapitel 10) – Aufgabenbereich Energie (615): Verbesserung Energieeffizienz und Förderung CO<sub>2</sub>-armer Energien**

Der Klimawandel und seine Ursachen sind globaler Natur. Deshalb braucht es zur Verminderung der Treibhausgasemissionen Anstrengungen auf internationaler und nationaler Ebene (vgl. Kapitel 2.6). Auf kantonaler Ebene geht es darum, die nationalen und internationalen

Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu unterstützen und Massnahmen, welche die kantonale Ebene betreffen umzusetzen. Mit der konsequenten Umsetzung des Förderinstruments „Das Gebäudeprogramm“ des Bundes auf kantonaler Ebene kommen auch erneuerbare, CO<sub>2</sub>-arme Energien im Gebäudebereich zur Anwendung. Wichtige Stossrichtungen, wie die Verbesserung der Energieeffizienz und Reduktion des Kohlenstoffdioxidausstosses im Gebäudebereich sind in die Revision des Energiegesetzes eingeflossen. Der erwünschte Ausbau der erneuerbaren Energien (Wind, Wasserkraft, Bioenergie etc.) kann in Widerspruch zu Zielen des Landschaftsschutzes und der Biodiversität stehen. Deshalb sind diese Zielkonflikte fallweise zu berücksichtigen.

### **Siedlungsentwicklung (Kapitel 12) – Aufgabenbereich Raumentwicklung (610): Gestaltung der Siedlungen und Gebäude**

In der Siedlungsentwicklung und Gestaltung der Bauten sind die Auswirkungen des Klimawandels stärker einzubeziehen. Die bauliche Verdichtung ist aus Sicht des haushälterischen Umgangs mit dem Boden zwingend. Gerade deshalb sind die klimatische Entwicklung und Anliegen der ökologischen Vernetzung innerhalb der Siedlungen zu berücksichtigen. Korridore für Frischluftzufuhr, Begrünungen und Beschattungen von Freiflächen und Trottoirs sowie vermehrte Wasserflächen können die Wärmebelastung in dicht bebauten Siedlungen reduzieren. Dies fördert nebst dem Wohlbefinden und der Ästhetik bei entsprechender Ausgestaltung auch die ökologische Vernetzung. Auf planerischer Ebene bedingt dies die Analyse der lokalklimatischen Verhältnisse und die Berücksichtigung lufthygienischer und klimatologischer Verhältnisse.

Bei den Gebäuden müssen künftig stärkere Witterungseinflüsse berücksichtigt werden. Die Befestigungen von Leichtfassaden und Dachbelägen, die Hagelresistenz von Dachverglasungen sowie die Witterungsbeständigkeit von Beschattungs- und Solaranlagen müssen auf das zu erwartende Klima abgestimmt werden. Von Bedeutung sind auch Massnahmen zur Verminderung der Wärmebelastung im Sommer: Free-Cooling-Systeme nutzen so weit als möglich freie Kälte (niedrige Aussentemperaturen in der Nacht, Verdunstung, Wärmepumpen-Erdsonden) zur Kühlung der Decken, Böden, Wände. Architektonische Massnahmen (Sonnenschutz, Raumtiefe, Fenstergrösse und Ausrichtung, Bäume, Grünflächen, Wasseranlagen) können die Wärmebelastung vermindern. Die integrale Konzeption und Planung von Neubauten muss die künftige klimatische Entwicklung berücksichtigen (Isolation, Ventilation, Beschattung, Fenster, etc. Betrachtung Lebenszykluskosten statt Investitionskosten).

### **Verkehr (Kapitel 13) – Aufgabenbereich Verkehrsinfrastruktur (640): Elektrifizierung des Verkehrs**

Es wird längerfristig mit einem steigenden Anteil von Hybridautos und Elektroautos am Fahrzeugpark gerechnet. Es stellt sich die Frage, wie eine künftige Elektrifizierung des Verkehrs die heutige und künftige Verkehrsplanung und Verkehrsinfrastruktur beeinflusst und welche Folgen für die heutige Verkehrsplanung absehbar werden. Dies auch vor dem Hintergrund der langen Planungsfristen. Deshalb sind weitere Abklärungen notwendig.

### **Entwicklungen unabhängig vom Klimawandel**

Allgemein kann bezüglich allen Wirkungen und Handlungsfelder festgehalten werden: Je höher die künftige Erwärmung ausfällt, desto stärker ausgeprägt sind negative Wirkungen. Klimabedingte Auswirkungen werden aber auch überlagert von anderen, klimaunabhängigen Prozessen in der Biosphäre, von wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Entwicklungen. Unter Umständen sind diese klimaunabhängigen Entwicklungen ebenso wirksam für die künftige Entwicklung. Dies gilt namentlich für die künftige biologische Vielfalt, für die künftige Qualität der Luft, für die künftige Energieproduktion und den Energieverbrauch sowie die Siedlungsentwicklung. Dies bedeutet aber nicht, dass die klimaabhängigen Entwicklungen vernachlässigt werden können. Es heisst viel mehr, dass die klimaabhängigen Entwicklungen zwingend in eine Gesamtbetrachtung einzubeziehen sind.

### **Technologische Entwicklung**

Die Herausforderungen infolge des Klimawandels und die Chancen, welche sich bieten, betreffen nicht nur das Departement Bau, Verkehr und Umwelt. Die Aufgaben betreffen alle Aufgabenbereiche der öffentlichen Hand und der Wirtschaft. Weitere technologische Entwicklungen sind für die markante Steigerung der Energieeffizienz und die Substitution fossiler Brenn- und Treibstoffe unabdingbar. Die bisherige technologische Entwicklung hat bereits zu einer Erhöhung der Energieeffizienz geführt. Beispielsweise hat der Energieumsatz pro Wertschöpfungseinheit im OECD-Raum von 1974 bis 1994 abgenommen (Schipper 1997). Eine weitere deutliche Erhöhung der Energieeffizienz ist mit heutigen oder in absehbarer Zeit verfügbaren Technologien realisierbar (Boulochos 2009). Als Beispiele für verfügbare Technologien können die Gebäude-Wärmedämmung, Wärmepumpen, leichtere Fahrzeuge, effiziente Stromgeräte oder Motoren mit höherem Wirkungsgrad genannt werden. Längerfristig sind radikal verbesserte Technologien entscheidend für die Erhöhung der Energieeffizienz und Entkarbonisierung der Energie. Es handelt sich um: kostengünstige solare Elektrizität, effiziente Energiespeicherung und geschlossene Material- oder Stoffkreisläufe (z.B. CO<sub>2</sub>-Rezyklierung) (Boulochos 2009). Allein um die künftige Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten, ist es für die Schweiz vorteilhaft, beim technologischen Wandel eine aktive Rolle zu übernehmen. Dabei sind die Politik, die Forschung und die Privatwirtschaft gefordert.

## 15 Kosten des Klimawandels für die Volkswirtschaft

Neben den Überlegungen zu den Wirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des BVU und zu den Handlungsfeldern, sind ökonomische Überlegungen von zentraler Bedeutung, denn es geht um die Allokation begrenzter finanzieller Ressourcen.

Die Ermittlung der Kostenfolgen verschiedener Strategien und Massnahmen sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts und würden separate Studien erfordern. Es bestehen aber grobe Schätzungen zu den Kostenfolgen des Klimawandels für die globale und schweizerische Volkswirtschaft. Diesen werden teilweise die Kosten für Vermeidungs- und Anpassungsmassnahmen gegenübergestellt. Die verschiedenen Schätzungen werden im Folgenden kurz dargelegt.

### Stern Report: Kostenschätzungen für die globale Volkswirtschaft

Sir Nicolas Stern, von 2000 bis 2003 Chefökonom der Weltbank, veröffentlichte 2006 den durch die britische Regierung in Auftrag gegebenen Bericht «The Economics of Climate Change». Kernaussage des Berichts ist, dass die Kosten für die Reduktion der Treibhausgasemissionen auf ein „klimaverträgliches“ Mass rund ein Prozent des Weltsozialprodukts ausmachen. Demgegenüber sind gemäss Stern die Folgekosten des Klimawandels, wenn nichts dagegen unternommen wird, auf 5 bis 20% des Weltsozialprodukts zu beziffern. Solch globale Schätzungen weisen aus methodischen und inhaltlichen Gründen grosse Unsicherheiten auf, entsprechend wurde der Stern-Bericht nach seiner Publikation auch kontrovers diskutiert.

### Kostenschätzungen für die schweizerische Volkswirtschaft: nationale Einflüsse

Die Schätzungen der Kostenfolgen des Klimawandels für die Schweiz, zeigen eine Grössenordnung erwarteter Kosten auf. Diese Grössenordnung lässt sich nur bedingt auf den Aargau übertragen, da beispielsweise der Beitrag des Wintertourismus zur Wertschöpfung im Aargau unbedeutend ist. Demgegenüber spielt die Energieproduktion eine grosse Rolle im Aargau.

Gemäss Arbeitsgemeinschaft Ecoplan/Sigmaplan 2007 sind klimabedingte Folgeschäden für die Schweizer Volkswirtschaft bis 2050 moderat und steigen bis 2100 deutlich an. Im Jahr 2050 wird der zu erwartende mittlere Schaden auf 0.15 BIP% pro Jahr (Schaden in % des BIP im Jahre 2050) geschätzt. Der zu erwartende mittlere Schaden im Jahr 2100 liegt bei 0.48 BIP% (Schaden in % des BIP im Jahre 2100). Im Zeitraum von 2050 bis 2100, wird der mittlere jährlich zu erwartende Schaden (Median) auf rund 1 Mrd. CHF (zu heutigen Preisen und einer Diskontrate von 2%) geschätzt. Die Unsicherheiten bei diesen Schätzungen sind beträchtlich, entsprechend hoch ist die Bandbreite möglicher Entwicklungen. Im Jahr 2100 reicht die Bandbreite der möglichen Schäden von bescheidenen 0.15 BIP% bis zu massiven Schäden von knapp 1.6 BIP%. Die Unsicherheiten können zu mehr als 40% auf die unsichere Temperaturentwicklung zurückgeführt werden. Die restlichen 60% ergeben sich aus den unsicheren Monetarisierungsannahmen.

Die Schätzungen berücksichtigen die Bereiche Tourismus, Bauten und Infrastruktur, Energie sowie menschliche Gesundheit. Für das BVU von Interesse sind die Bereiche Bauten und Infrastruktur sowie Energie. „Der mittlere Erwartungsschaden ist im Energiebereich am grössten, dies trotz den positiven Effekten aufgrund von wärmeren Wintern und weniger Heizenergiebedarf (...). Für die negativen Auswirkungen im Energiebereich sind vor allem die Verluste bei der Stromproduktion in Wasserkraftwerken und die vermehrte Klimatisierung im Wohn- und Arbeitsbereich verantwortlich. Die stark steigenden Ausgaben für die Klimatisierung sind als Anpassungskosten zu verstehen, die verhindern, dass vor allem im Bereich der menschlichen Gesundheit nicht grössere Schäden entstehen.“ (Ecoplan/Sigmaplan 2007). „Der erwartete Schaden bei den Bauten und der Infrastruktur ist vor allem auf Hochwasser/Überschwemmungen und Murgänge zurückzuführen und ist im Vergleich zu den anderen Schadensbereichen (Energie, Tourismus, Gesundheit, eigene Anmerkung) aber gering.“ (Ecoplan/Sigmaplan 2007). Schäden, wie Auswirkungen auf Ökosysteme und Landschaft sowie Risiken von Kippeffekten sind nicht in Franken bezifferbar und sind in den Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Kostenschätzungen für die Schweizerische Volkswirtschaft: internationale Einflüsse  
In obigen Schätzungen ist die Verflechtung der Schweiz mit den internationalen Güter- und Faktormärkten, d.h. dem Rohstoffmarkt oder Kapitalmarkt, etc. nicht berücksichtigt. Eine Schätzung dieser Einflüsse kommt zum Schluss, dass die internationalen Einflüsse der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft wahrscheinlich insgesamt grösser sind, als die direkt in der Schweiz spürbaren nationalen Einflusskanäle (Infras, Ecologic, Rütter und Partner 2007). Gemäss ersten Abschätzungen könnten bis zum Jahr 2050 jährlich ungefähr 1,4 bis 3,1% der Schweizer Exporte gefährdet sein. Dies bedeutet nicht zwingend, dass dieser Exportanteil wegfällt. Aber dieser Teil ist besonders gefordert bei der Suche nach anderen Märkten und Abnehmern oder neuen Produkten. Beispielsweise kann die Uhrenindustrie von einem schrumpfenden Luxusgütermarkt betroffen sein.

#### Vermeidungskosten in der Schweiz

Die schweizerische Vermeidungskosten-Kurve schätzt Potentiale für die Senkung der schweizerischen Treibhausgasemissionen und die dazugehörigen Kosten und Nutzen ab. Gemäss den neusten Abschätzungen des Beratungsunternehmens McKinsey (McKinsey 2009) kann die Schweiz ihre inländischen Treibhausgasemissionen um bis zu 45% bis ins Jahr 2030 senken. Dies mit technischen Verbesserungen in Gebäuden, Verkehr, Energieerzeugung, Industrie und Landwirtschaft. Mit 40 bis 80% der technischen Massnahmen können längerfristig durch die Einsparung von Öl auch Kosten gespart werden. Die Bandbreite von 40 bis 80% der technischen Massnahmen ergibt sich je nach postuliertem langfristigem Ölpreis von 52 Dollar pro Fass oder 100 Dollar pro Fass. Beide Szenarien identifizieren einen beträchtlichen Anteil an Massnahmen, welche weniger als 100 Euro pro reduzierte Tonne CO<sub>2</sub> kosten und auf heute verfügbarer Technologie basieren. Um diese letzteren Massnahmen zu realisieren, müssten rund 0.7% des schweizerischen Bruttoinlandprodukts jährlich investiert werden.

## 16 Anhang

16.1	Tabellarische Übersicht der wichtigsten Wirkungen des Klimawandels und entsprechenden Handlungsfelder mit Handlungsbedarf bereits heute .....	116
16.2	Liste der Aufgabenbereiche des BVU und betroffene Kapitel in diesem Bericht .	120
16.3	Verwendete Literatur .....	121
16.4	Klimamodelle und deren Aussagekraft, Vertiefung zu Kapitel 2.....	130
16.5	Liste der Verantwortungsarten im Kanton Aargau gemäss Kapitel 9 .....	132
16.6	Glossar.....	141

16.1 Tabellarische Übersicht der wichtigsten Wirkungen des Klimawandels und entsprechenden Handlungsfelder mit Handlungsbedarf bereits heute

Einfluss Klimawandel	Mögliche künftige Situation	Handlungsfelder BVU, Kanton
<b>Kap. 4 Gewässer – Aufgabenbereiche Umweltentwicklung (625), Umweltschutz (620) sowie Wald, Jagd und Fischerei (645)</b>		
<p><b>Hochwasser:</b> Häufigere und höhere Hochwasserspitzen im Winter, evtl. moderatere Hochwasser im Sommer. Zunehmender Feststofftransport.</p>	<p>Veränderte Ausgangslage beim Hochwasserschutz, verstärkter Hochwasserschutz ist notwendig. Verstärkte Hochwassersicherheitsmassnahmen bei Kraftwerken.</p>	<p>Regionales und kantonsübergreifendes Hochwassermanagement weiter verbessern. Genügend freie Flächen für Rückhalteräume und Abflusskorridore. Betrachtung von Überlastszenarien. Konsequente Umsetzung Gefahrenkarte. Hochwasserschutz im Rahmen von Konzessionen für Kraftwerke berücksichtigen.</p>
<p><b>Niedrigwasser:</b> Wasserstand Niedrigwasser im Winter wird gehoben (Flüsse), vermehrt Niedrigwasser in trocken-heissen Sommern (Bäche).</p>	<p>Wasserbedarf für die Landwirtschaft erhöht sich in trocken-heissen Sommern, wenn Bäche Niedrigwasser führen (bsp. Bünztal), siehe Kapitel 11. Vermehrt Situationen wie im Sommer 2003, wo Fischsterben auftraten und Notabfischungen notwendig wurden, siehe Kapitel 8.</p>	<p>Bewirtschaftungskonzepte für Wasserentnahmen aus Bächen in trocken-heissen Sommern erarbeiten und weiterentwickeln. Zielkonflikte zwischen dem Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft, der Gewässerökologie (u.a. Fischbestand) und der Sicherung der Trinkwasserversorgung (geringere Grundwasserinfiltration, siehe unten) berücksichtigen.</p>
<b>Kap. 5 Grundwasser und Wasserwirtschaft – Aufgabenbereiche Umweltschutz (620)</b>		
<p><b>Grundwasserspiegel und Quellschüttungen:</b> Grössere Spanne zwischen Maximal- und Minimalständen in Tälern mit kleinen und mittleren Fliessgewässern. Langfristiges Absinken der mittleren Grundwasserspiegel in Tälern ohne grosse Fliessgewässer bei starker Erwärmung. Versiegen von Quellen mit kleinen oder verkasteten Einzugsgebieten in Trockenjahren.</p>	<p>Einschränkungen der Grundwassernutzung in und nach Trockenjahren, insb. bei unvollkommenen Grundwasserbrunnen in höher gelegenen Talabschnitten. Evtl. temporär reduzierte Grundwasserförderung in Trockenperioden in Juratälern. Starke Reduzierung Fördermengen bei Grundwasserbrunnen in grosser Entfernung zum Vorfluter bei starker Erwärmung.</p>	<p>Regionale und überregionale Wasserversorgung mit konsequentem Netzverbund, um Engpässe im Sommer zu vermeiden. Konsequente Umsetzung Leitbild Trinkwasserversorgung.</p>
<p><b>Grundwasserqualität:</b> Anstieg der Nitratkonzentration im unteren Aaretal, Bünztal und Suhrental bei Starkniederschlägen im Anschluss an vermehrte, lange Trockenperioden.</p>	<p>Veränderte Ausgangslage für Grundwassernutzung, Trinkwasseraufbereitung.</p>	<p>Bewirtschaftungsauflagen in Nitratgebieten im Zuströmbereich.</p>

Einfluss Klimawandel	Mögliche künftige Situation	Handlungsfelder BVU, Kanton
<b>Kap. 7 Wald – Aufgabenbereich Wald, Jagd und Fischerei (645)</b>		
<p><b>Baumartenzusammensetzung:</b> Entwicklung vom Buchenwald zum Eichen-Hainbuchenwald und zum Eichenwald. Fichte im Aargau stark gefährdet.</p> <p>Trocken-heisse Sommer und Witterungsextreme führen zu einer Erhöhung der Vermehrungsraten von Schadorganismen und Schwächung der Wirtspflanzen. Trockenheit fördert Rinden- und Wurzelkrankheiten. Vermehrt Massenvermehrungen von Borkenkäfern.</p>	<p>Veränderte Baumartenzusammensetzung und Walddynamik. Je nach Baumartenzusammensetzung verminderte Ertragsfähigkeit.</p> <p>Zwangsnutzungen, Folgeschäden, wirtschaftliche Einbussen infolge von Schadorganismen.</p>	<p>Risikoverteilung und Risikoverminderung durch Begünstigung von standortgerechten Baumarten (Baumartenportfolio), breite Baumartengarnitur und hohe Diversität sowie einem naturnahen Waldbau.</p> <p>Monitoring in Waldreservaten, um Erkenntnisse über ablaufende Prozesse zu erhalten.</p> <p>Beobachten und analysieren von Veränderungen. Förderung und Mitwirkung an einem nationalen/kantonalen Frühwarnsystem.</p> <p>Strategien zur Vermeidung von Folgeschäden bei Sturmwurf und -bruch.</p>
<b>Kap. 9 Biologische Vielfalt – Aufgabenbereich Umweltentwicklung (625)</b>		
<p><b>Entwicklung der biologischen Vielfalt:</b> Vegetationsgürtel schieben sich nach oben: alpine Arten Felsenflora Jura wandern nach Westen ab, wärmeliebende Arten wandern ein, invasive fremde Tiere und Pflanzen wandern ein.</p>	<p>Veränderte Lebensgemeinschaften.</p> <p>Anstieg der Artenvielfalt wärmebedingt, positive Entwicklung möglich. Aber auch Verlust von Spezialisten (z.B. alpine Felsenflora im Jura).</p> <p>Verlust von Artenvielfalt infolge invasiver Neobiota.</p>	<p>Ausreichende und langfristig gesicherte Vernetzung von wertvollen Lebensräumen um Wanderungsmöglichkeiten für Arten zu schaffen. Zielkonflikte mit Ausbreitung Neobiota berücksichtigen und kantonale Neobiota-Strategie weiterentwickeln und konsequent umsetzen.</p>
<p><b>Auen:</b> Zunahme Hochwasser im Winter.</p>	<p>Grössere Dynamik durch Hochwasser, positive Entwicklung für die Auen.</p>	<p>Synergien Hochwasserschutz und Auenschutz nutzen: Auen als Rückhalteräume für Hochwasser.</p>

Einfluss Klimawandel	Mögliche künftige Situation	Handlungsfelder BVU, Kanton
<b>Kap. 10 Energie – Aufgabenbereich Energie (615)</b>		
<p><b>Emission von Treibhausgasen:</b></p> <p>Die Verwendung von Brennstoffen vor allem für das Heizen von Gebäuden in der Industrie, im Dienstleistungssektor und bei den Haushalten trägt zur Hälfte zu den schweizerischen Treibhausgasemissionen bei.</p>	<p>–</p>	<p>Förderung Energieeffizienz und Verminderung CO<sub>2</sub>-Ausstoss (siehe auch Zielsetzungen Revision Energiegesetz).</p> <p>Konsequente Umsetzung des Förderinstruments „Das Gebäudeprogramm“, womit auch erneuerbare, CO<sub>2</sub>-arme Energien im Gebäudebereich zur Anwendung kommen.</p>
<p><b>Energieverbrauch:</b></p> <p>Geringerer Verbrauch von Heizenergie (mehrtlich fossile Energie) im Winter.</p> <p>Erhöhter Kühlungsbedarf in den Gebäuden (Wohnen, Dienstleistungen) im Sommer.</p>	<p>Reduktion bei der Wärmeenergie übersteigt Mehrverbrauch bei der Kühlungsenergie, insgesamt leichte Reduktion des gesamten Energiebedarfs für Heizung, Kühlung im Vergleich zum Referenzverlauf.</p> <p>Verlagerung der Nachfrage bei den Energieträgern von fossiler Energie zu Elektrizität.</p>	<p>Förderung Energieeffizienz und Verminderung CO<sub>2</sub>-Ausstoss.</p> <p>Bauweise Gebäude, z.B. natürliche Belüftung statt Klimatisierung, vgl. Punkt 12 Siedlungsentwicklung, Stichwort Gebäude.</p>
<b>Kap. 12 Siedlungsentwicklung – Aufgabenbereiche Raumentwicklung (610) und Energie (615)</b>		
<p><b>Städtische Wärmeinseln, Wärmebelastung in Siedlungen:</b></p> <p>Erhöhung der durchschnittlichen Temperatur verstärkt die Temperaturdifferenz zwischen städtischem Gebiet und Umland. Stärkere Wärmebelastung in Siedlungen.</p>	<p>Verstärkter Kühlenergiebedarf, gesundheitliche Auswirkungen auf Risikogruppen (nicht BVU-Aufgabenbereich). Bedarf an Schatten in öffentlichen Freiräumen.</p>	<p>Analysen der lokalklimatischen Verhältnisse vor relevanten Planungen, Berücksichtigung lufthygienischer und klimatologischer Verhältnisse bei raumwirksamen Planungen.</p> <p>Korridore für Frischluftzufuhr, Begrünungen und Beschattungen von Fussgängerzonen und Langsamverkehrswegen, etc. zur Reduktion von Wärmebelastungen in dicht besiedelten Gebieten.</p>
<p><b>Gebäude:</b></p> <p>Erhöhte Raumtemperaturen in Gebäuden im Sommer.</p> <p>Beschattungsanlagen, Dämmungen und Anlagen zur Energieersparnis/-erzeugung mit ungenügender Hagelresistenz.</p>	<p>Kühlbedarf im Sommer, siehe Punkt 10, Energie. Beeinträchtigt Wohlbefinden von Personen in den Räumen.</p> <p>Möglicherweise mehr Hagelschäden bei Gebäuden.</p>	<p>Architektonische Massnahmen für die Kühlung von Gebäuden: Sonnenschutz, Raumtiefe, Fenstergrösse und Ausrichtung, Bäume, Grünflächen, Wasseranlagen. Free-Cooling-Systeme zur Nutzung der freien Kälte. Integrale Planung von Neubauten: Isolation, Ventilation, Beschattung, Fenster, etc.</p> <p>Witterungsbeständigkeit von Beschattungsanlagen, etc. berücksichtigen.</p>

Einfluss Klimawandel	Mögliche künftige Situation	Handlungsfelder BVU, Kanton
<b>Kap. 12 Verkehr – Aufgabenbereich Verkehrsinfrastruktur (640)</b>		
<p><b>Emission von Treibhausgasen:</b>            Von den schweizerischen Treibhausgasemissionen 2007 gehen knapp 32 % der CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf die Verwendung von Treibstoffen zurück.</p>	<p>–</p>	<p>Spezifischer Treibstoffverbrauch des Fahrzeugparks senken.            Es wird längerfristig mit einem steigenden Anteil an Hybridautos und Elektroautos am Fahrzeugpark gerechnet. Dabei stellt sich die Frage, wie diese Entwicklung die heutige und künftige Verkehrsinfrastruktur beeinflusst. Diesbezüglich sind Abklärungen notwendig.</p>

16.2 Liste der Aufgabenbereiche des BVU und betroffene Kapitel in diesem Bericht

Aufgabenbereiche des BVU	Kapitel
610 Raumentwicklung und Recht	4 Gewässer 12 Siedlungsentwicklung 13 Verkehr
615 Energie	4 Gewässer 7 Wald 10 Energie 12 Siedlungsentwicklung
620 Umweltschutz	4 Gewässer 5 Grundwasser und Wasserwirtschaft 6 Luft 11 Ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft
625 Umweltentwicklung	4 Gewässer 5 Grundwasser und Wasserwirtschaft 7 Wald 9 Biologische Vielfalt 10 Energie 11 Ausgewählte Aspekte der Landwirtschaft 12 Siedlungsentwicklung
630 Umweltsanierung	–
635 Verkehrsangebot	10 Energie 13 Verkehr
640 Verkehrsinfrastruktur	4 Gewässer 13 Verkehr
645 Wald, Jagd und Fischerei	4 Gewässer 7 Wald 8 Jagd und Fischerei 10 Energie

## 16.3 Verwendete Literatur

### **Kapitel 2: Zukünftige klimatische Änderungen Schweiz und Aargau**

- Albrecht A., Schindler D., Grebhan K., Kohnle U., Mayer H. (2008): Klimawandel und Stürme über Europa – eine Literaturübersicht FVA einblick+ 01/08: 20 – 23
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. Bern. September 2003.
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, Bern, März 2007.
- Bundesamt für Energie (Hrsg.) (2009): Stand der Energiepolitik in den Kantonen. Bern. Juli 2009.
- Häckel, H. (1999): Meteorologie, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 413 S.
- Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. In: „Wasser, Energie, Luft“ 99. Jahrgang, 2007, Heft 1. Baden.
- MeteoSchweiz, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (2007): Klimaänderung und Naturkatastrophen in der Schweiz. 01/2007.
- Moret F., Kessler S., Kasser F., Iten R. (2009): Globalbeiträge an die Kantone nach Art. 15 Energiegesetz EnG: Wirkungsanalyse kantonaler Förderprogramme – Ergebnisse der Erhebung 2008.
- ProClim (2005): Hitzesommer 2003. Synthesebericht. Basierend auf den Referaten und Beiträgen zum Forum Hitzesommer 2003 vom 7. Juli 2005 sowie weiteren Forschungsarbeiten und Berichten zum Thema. Bern, November 2005.
- IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Maquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A. und Appenzeller C. (2004): The role of increasing temperature variability for European summer heat waves, *Nature* 427, 332 – 336.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK (2007): Klimabericht. Bericht des UVEK über die künftige Klimapolitik der Schweiz.
- ProClim: [www.proclim.ch](http://www.proclim.ch)
- Meteo Schweiz: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)

### **Kapitel 3: Modelle und deren Aussagekraft**

- Cubasch U., Voss R., Hegerl G.C., Waszkewitz J. und Crowley T.J. (1997): Simulation of the influence of solar radiation variations on the global climate with an ocean-atmosphere general circulation model. In: *Climate Dynamics*, 13, 757 – 767.
- Frei, C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. ([www.occc.ch/Products/CH2050/CH2050-Scenarien.pdf](http://www.occc.ch/Products/CH2050/CH2050-Scenarien.pdf), 07.01.2009)

- IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Maquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- Jacobeit, J. (2007): Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem. In: Endlicher, W. und Gerstengarbe, F.-W., Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, Potsdam – Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, S. 1 – 16.
- Nationaler Forschungsschwerpunkt Klima NFS Klima (Hrsg.) (2009): Klimaforschung. Variabilität, Vorhersagbarkeit und Risiken. Acht Jahre NFS Klima. NFS Klima, 2009.
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderungen und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim.
- Paeth, H. (2007): Klimamodellsimulationen. In: Endlicher, W. und Gerstengarbe, F.-W., Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, Potsdam – Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, S. 1 – 16.
- Schönwiese, Ch.-D. (1995): Klimaänderungen. Berlin/Heidelberg, 224 S.
- Schönwiese, Ch.-D. (2003): Klimatologie. Stuttgart, 440 S.
- Titz S. (2009): Die verzwickten Wolken. Rückkopplungseffekte erschweren die Vorhersage der globalen Erwärmung. In: NZZ vom 27.10.2009.
- Solarenergie-Förderverein Deutschland (SFV): [www.sfv.de](http://www.sfv.de)
- SF Meteo: [www.meteo.sfv.tv](http://www.meteo.sfv.tv)
- Meteo Schweiz: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)

#### **Kapitel 4: Gewässer**

- Aschwanden, H. (2000): Hochwasser 1999. Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen Nr. 28. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern 2000.
- Basler und Hofmann, 2008: Überlastfall Reusstal – Machbarkeitsstudie Hochwasserschutz, im Auftrag der Abteilung Landschaft und Gewässer, Departement Bau, Verkehr und Umwelt.
- Belz J.U., Brahmer G., Buiteveld J., Engel H., Grabher R., Hodel H., Krahe P., Lammersen R., Larina M., Mendel H.-G., Meuser A., Müller G., Plonka B., Pfister L. und W. van Vuuren (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. KHR-Schriften Bd. 1 – 22, Koblenz und Lelystad.
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Bezzola G. R., Hegg C. (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- BUWAL (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369.
- Denzler L. (2007): Strategien gegen Schwemmh Holz. In: Tec21 Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt.
- Gander B. (2009): Klimaänderung und Wasserversorgungen. Information und Anpassungsstrategien. In: gwa 04/09. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches.
- Gousskov Wildberg A. und Voser P. (2004): Der Dürresommer 2003 – Fische im Stress, Umwelt Aargau, Nr. 24.

- Hänggi P., Plattner Ch. (2009). Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Schlussbericht der Vorstudie. Netzwerk Wasser im Berggebiet. Geographisches Institut Universität Bern. Bern und Davos, 2009.
- Kantone Aargau, Luzern, Zug, Zürich, Bundesamt für Umwelt (2008): Schlussbericht. Arbeitsgruppe Reuss. Hochwasser 2005. Koordination Reuss. Kantone Aargau, Luzern, Zug, Zürich und Bundesamt für Umwelt. Mitarbeit der Kraftwerke CKW AG, EWL Luzern, Perlen Papier AG, AEW Energie AG, Proma Energie AG, unpubliziert.
- Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. In: „Wasser, Energie, Luft“ 99. Jahrgang, 2007, Heft 1. Baden.
- Petrascheck A. (2003): Hochwasser, in: Extremereignisse und Klimaänderung, OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern 2003.
- ProClim-Forum for Climate und Global Change (Hrsg.) (2005): Hitzesommer 2003. Synthesebericht. Bern, November 2005.
- Rempfer J., Livingstone D. M., Forster R., Blodau Ch. (2009): Response of hypolimnetic oxygen concentrations in deep Swiss perialpine lakes to interannual variations in winter climate. In: Verh. Internat. Verein. Limnol. vol. 30. S. 717 – 721. Stuttgart, January 2009.
- Stöckli A. und Märki M. (2007): Sanierungsmassnahmen verbessern die Wasserqualität. In: Sanierung Hallwilersee. 20 Jahre Seebelüftung. Sondernummer Umwelt Aargau Nr. 24. Dezember 2007.
- Tschannen, M. (2009): Hochwassergefährdung bei mir zu Hause?, in: Umwelt Aargau Nr. 44, Aarau: BVU.
- Meteo Schweiz: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)
- NZZ Online: [www.nzz.ch](http://www.nzz.ch)

## **Kapitel 5: Grundwasser und Wasserwirtschaft**

- BAFU, BWG, Meteo Schweiz, (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern.
- Berner A., Mäder P., Schaub D., Ott M.: Feldrandkompostierung – ein Problem für das Grundwasser, Umwelt Aargau, Nr. 26, November 2004.
- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. August 2008).
- Gander B. (2009): Klimaänderung und Wasserversorgungen. Gwa 4/2009.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU, Abteilung Umwelt: Karte der Nitratbelastung des Aargauer Grundwassers. Durchschnitt der Jahre 2000, 2001 und 2002.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU, Abteilung Umwelt (2001): Untersuchung von Herbiziden in Aargauischen Trinkwasserfassungen. Umwelt Aargau, Sondernummer 10.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2004): Gewässerschutzstrategie Aargau. Umwelt Aargau, Sondernummer 18.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt (Abteilung Umwelt), Aargauisches Versicherungsamt (Feuerwehrwesen) (2007): Leitbild Wasserversorgungen Aargau.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2008): Statusbericht Umwelt, Februar 2008, Aarau.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2009): Bewilligungen für Wasserentnahmen, Stand 31.03.2009, Aarau: BVU
- Schaub D. (2009a) mündliche Mitteilung Sektionsleiter Boden und Wasser, Abteilung Umwelt, BVU
- Schaub D. (2009b): Regionale Wasserversorgung im Zeichen des Klimawandels. Regio Basiliensis, 50/1 2009 S.53 – 60.

## **Kapitel 6: Luft**

- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2002): Das Klima ändert – auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichts des IPCC aus der Sicht der Schweiz.
- Bundesamt für Energie (Hrsg.) (2009): Stand der Energiepolitik in den Kantonen. Bern. Juli 2009.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2009): Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz und Kyoto-Protokoll. Bern.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2009): Massnahmenplan Luft des Kantons Aargau vom Februar 2009.
- ProClim (Hrsg.) (2005): Hitzesommer 2003. Synthesebericht. Basierend auf den Referaten und Beiträgen zum Forum Hitzesommer 2003 vom 7. Juli 2005 sowie weiteren Forschungsarbeiten und Berichten zum Thema. Bern. November 2005.
- Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen (ZUDK) in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau (Hrg.) (2004): Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2003. Nr. 6. April 2004.
- Zentralschweizer Umweltschutzdirektionen (ZUDK) in Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau (Hrsg.) (2007): Luftbelastung in der Zentralschweiz und im Kanton Aargau. Detaillierte Messdaten 2006. Nr. 9. Juni 2007.

## **Kapitel 7: Wald**

- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2008): Schätzung der Senkenleistung des Schweizer Waldes für die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls 2008 – 2012.
- Bürgi A., Brang P. (2001): Das Klima ändert sich – wie kann sich der Waldbau anpassen? Wald und Holz 82:43 – 46.
- Defila C. (2005): Phänologische Trends bei den Waldbäumen in der Schweiz. Schweiz. Z. Forstwes. 156, 6: 207 – 210.
- Defila C., Müller-Ferch G. (2007): Erste Spuren der Klimaänderung in der Pflanzen- und Tierwelt. In: Climate Press Nr. 16, Juni 2003. ProClim und OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung).
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt (2008): Statusbericht Umwelt.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2007): Bericht zur Entwicklung des Waldes im Aargau.
- Dobbertin M., Hug Ch., Waldner P. (2009): Kronenverlichtung, Sterberaten und Waldwachstum in Langzeitstudien – Welche Indikatoren beschreiben den Waldzustand am besten? Forum für Wissen 2009: 7 – 20.
- Engesser R., Forster B., Meier F., Wermelinger B. (2008): Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 10/2008 S. 344 – 351.
- Flückiger W. und Braun S. (2004): Wie geht es unserem Wald? Ergebnisse aus Dauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 2004, Bericht 2; Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch.
- Fuhrer J., Beniston M., Fischlin A., Frei Ch., Goyette S., Jasper K. und Pfister Ch. (2006): Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland, Climate Change 79:79 – 102.
- Gaul D., Hertel D., Berker W., Matzner E. und Leuschner Ch. (2008): Effects of experimental drought on the fine root system of mature Norway spruce. Forest Ecology and Management 256, 1151 – 1159.
- Kienast F., Wildi O., Brzeziecki B., Zimmermann N. und Lemm R. (1998): Klimaänderung und mögliche langfristige Auswirkungen auf die Vegetation der Schweiz. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

- Klaus G., Pauli D. (2008): Tagungsbericht Biodiversität im Zeichen des globalen Wandels. Swiss Forum on Conservation Biology SWIFCOB 8, 31. Oktober 2008, Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern. Swiss Biodiversity Forum.
- Leuzinger S., Zotz G., Asshoff R. und Körner C. (2005). Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiology* 25, 641 – 650.
- Mayer P., Brang P., Dobbertin M. und Zimmermann S. (2004): Sturmschäden auf sauren Standorten häufiger. Informationsblatt Forschungsbereich Wald: Nr. 16, Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Meier I.C. und Leuschner Ch. (2008): Genotypic variation and phenotypic plasticity in the drought response of fine roots of European beech. *Tree Physiology* 28, 297 – 309.
- Menzel A. (2003): Anzeichen des Klimawandels in der Pflanzen- und Tierwelt. *LWFaktuell* Nr. 37: 14 – 18.
- Nationaler Forschungsschwerpunkt Klima NFS Klima (Hrsg.) (2009): Klimaforschung. Variabilität, Verhersagbarkeit und Risiken. Acht Jahre NFS Klima. NFS Klima, 2009.
- Nobis M. (2008): Ausbreitung invasiver Arten. Invasive Neophyten auch im Wald? In: *Wald und Holz* Nr. 8. 2008, 46 – 49
- Petercord R., Schröter H., Veit H. (2008): Forstinsekten im Klimawandel – alte Bekannte mit neuem Potenzial? In: *FVA einblick+ 01/08*: 34 – 37.
- ProClim – Forum for Climate and Global Change, Platform of the Swiss Academy of Sciences (2005): Hitzesommer 2003, Synthesebericht, S. 25.
- Rebetez M. (2006): Welche Konsequenzen hat die Klimaerwärmung auf Waldökosysteme? Jahrestagung 2006, Arbeitsgemeinschaft für den Wald, Bitsch.
- Waldner P., Schmitt M., Schaub M., Graf Pannatier E., Thimonier A. (2009): Stickstoffeintrag und Ozonbelastung im Schweizer Wald aus der Sicht der Langfristigen Waldökosystemforschung. *Forum für Wissen* 2009: 113 – 124.
- Weis W. (2005): Trockenjahre beeinflussen Sickerwasserchemie und Bodenversauerung. In: *LWFaktuell* Nr. 43: 19 – 20.
- Wohlgemut Th., Bugmann H., Lischke H., Tinner W. (2006): Wie rasch ändert sich die Waldvegetation als Folge von raschen Klimaveränderungen? *Forum für Wissen* 2006: 7 – 16.
- Zimmermann N., Bolliger J., Gehrig-Fasel J., Guisan A., Kienast F., Lischke H., Rickenbusch S., Wohlgemuth Th. (2006): Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren. *Forum für Wissen* 2006: 63 – 71.
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL: [www.wsl.ch](http://www.wsl.ch).  
Insbesondere Simulation künftiger Waldtypen:  
<http://www.wsl.ch/land/products/klimaanimation/welcome.html>
- Schweizerisches Landesforstinventar: [www.lfi.ch](http://www.lfi.ch)

## **Kapitel 8: Jagd und Fischerei**

- Arnold W. (2005): Schwarzwild: Hintergründe einer Explosion. Forschungsinstitut für Wildtierkunde und Ökologie. In: *Weidwerk* Nr. 1, 2005.
- BUWAL, BWG, Meteo Schweiz, (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern.
- Thiel D. (2008): Der Feldhase ist weiter auf dem Rückzug, *Umwelt Aargau* Nr. 42, November 2008.
- Gousskov Wildberg A. und Voser P. (2004): Der Dürresommer 2003 – Fische im Stress. *Umwelt Aargau* Nr. 24 Mai 2004.
- Stucki T. (2002): Eine Nierenkrankheit macht den Bachforellen zu schaffen, *Umwelt Aargau* Nr. 17, Mai 2002.
- Zbinden N.; Keller V., Schmid H. (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Vogelwelt. In: *Hotspot* Nr. 16, Oktober 2007.
- Bundesamt für Umwelt: [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)

## **Kapitel 9: Biologische Vielfalt**

- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT (2008): Biodiversität und Klima – Konflikte und Synergien im Massnahmenbereich. Ein Positionspapier der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz.
- BAFU, BWG, Meteo Schweiz, (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern.
- Baur B., Duelli P., Edwards P.J., Jenny M., Klaus G., Künzle I., Martinez S., Pauli D., Peter K., Schmid B., Seidl I., Suter W. (2004): Biodiversität in der Schweiz. Zustand Erhaltung Perspektiven. Paul Haupt, Bern.
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Bolliger M. (2007): Neophyten als Spiegel von Globalisierung und Klimaveränderung. Umwelt Aargau Nr. 36, Mai 2007: 31 – 36.
- Buchmann N. (2007): Biodiversität als Versicherung. Artenreiche Wiesen trotz dem Klimawandel. In: Hotspot Biodiversität und Klimawandel Nr. 16 Oktober 2007: 16.
- Departement für Bau und Umwelt BVU (2008): Statusbericht Umwelt, Februar 2008, Aarau.
- Fischlin A. (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosysteme. In Hotspot. Biodiversität und Klimawandel. Nr. 16. Oktober 2007: 5 – 6.
- Gigon A., Weber E., (2005): Invasive Neophyten in der Schweiz. Lagebericht und Handlungsbedarf. Geobotanisches Institut der Universität Zürich. März 2005.
- Klaus G., Pauli D. (2008): Tagungsbericht Biodiversität im Zeichen des globalen Wandels. Swiss Forum on Conservation Biology SWIFCOB 8, 31. Oktober 2008, Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern. Swiss Biodiversity Forum.
- Koordinationsstelle Biodiversitäts-Monitoring Schweiz BDM (2009): Zustand der Biodiversität in der Schweiz. Ergebnisse des Biodiversitäts-Monitorings Schweiz (BDM) im Überblick. Stand: Mai 2009. Umwelt-Zustand Nr. 0911. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Körner Ch. (2007): „Die beste Vorsichtsmassnahme gegen den Klimawandel ist die Erhaltung einer möglichst grossen Biodiversität“. Ein Interview mit Prof. Dr. Christian Körner, Botanisches Institut der Universität Basel und Dr. Olivier Biber, Abteilung Artenmanagement des Bundesamtes für Umwelt. In: Hotspot Biodiversität und Klimawandel Nr. 16 Oktober 2007: 7 – 9.
- Müller St. (2006): Human impact on the vegetation of limestone cliffs in the northern Swiss Jura mountains, Inauguraldissertation, Universität Basel.
- Niedermair M., Lexer M.J., Plattner G., Formayer H., Seidl R. (2007): Klimawandel und Artenvielfalt – Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? Österreichische Bundesforste AG.
- Nobis M., Brose H., Zimmermann N. und Jaeger J. (2008): Neophytenvielfalt auf Landschaftsebene – Bedeutung von Siedlungsentwicklung und Klimawandel. Poster. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft 2008.
- Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C., Grabherr G. (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994 – 2004) at the GLORIA\* master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biol.13, 147 – 156.
- ProClim – Forum for Climate and Global Change, Platform of the Swiss Academy of Sciences (2005): Hitzesommer 2003, Synthesebericht, S. 25.
- Reichmuth, A. (2008): Verdreht und hochgespielt. Wie Umwelt- und Gesundheitsgefahren instrumentalisiert werden. Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Landschaft und Gwässer: [www.ag.ch/alg/de/pub/](http://www.ag.ch/alg/de/pub/)  
Bundesamt für Umwelt: [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)  
Forum Biodiversität Schweiz: [www.biodiversity.ch](http://www.biodiversity.ch)  
Koordinationsstelle für Amphibien- und Reptilienschutz in der Schweiz KARCH: [www.karch.ch](http://www.karch.ch)

## **Kapitel 10: Energie**

- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Bundesamt für Energie BFE (2009a): Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008, Bern: BFE
- Bundesamt für Energie BFE (2009b): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2008, Bern: BFE.
- Bundesamt für Energie BFE (2008): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2006 nach Verwendungszwecken, Bern: BFE.
- Bundesamt für Energie BFE (2007a): Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte, 1990 – 2035, Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer, Bern: BFE.
- Bundesamt für Energie BFE (2007b): Der Energieverbrauch der Dienstleistungen und der Landwirtschaft, 1990 – 2035, Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer, Bern: BFE.
- Bundesamt für Energie BFE (2006): Der Energieverbrauch der Industrie, 1990 – 2035, Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer, Bern: BFE
- BAFU, BWG, Meteo Schweiz (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2009): Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz und Kyoto-Protokoll. Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Energie BFE (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse), Schlussbericht, BAFU: Bern.
- Bundesamt für Statistik BFS (2007): Betriebszählung, Neuchâtel: BFS.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2008): Potenzial für Windenergie in den Richtplan aufnehmen, Medienmitteilung vom 22.12.2008, Aarau: BVU.
- Energie Dialog Schweiz (2009): Energie-Strategie 2050, Impulse für die schweizerische Energiepolitik, Grundlagenbericht, Zürich: Energie Dialog Schweiz.
- Finsterwald, U. und Nauser, M. (2005): Ein Vorgeschmack auf das Klima der Zukunft. Umwelt 2/05 Klima.
- Hänggi P. und Plattner Ch. (2009): Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Schlussbericht der Vorstudie. Netzwerk Wasser im Berggebiet. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern und Davos. 2009.
- Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK (2004): Jahresbericht 2003 über die nukleare Sicherheit und den Strahlenschutz in den schweizerischen Kernanlagen, Würenlingen: HSK.
- Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS) (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. In: „Wasser, Energie, Luft“ 99. Jahrgang, 2007, Heft 1. Baden.
- Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (2008): Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE), Ausgabe 2008, Chur: EnDK.
- ProClim – Forum for Climate and Global Change, Platform of the Swiss Academy of Sciences (2005): Hitzesommer 2003, Synthesebericht, Bern: OcCC/ProClim.
- Regierungsrat Aargau (2009a): Zweiter Bericht Nachhaltige Entwicklung im Kanton Aargau, Aarau: RR.
- Regierungsrat Aargau (2009b): Interpellation der Fraktion der Grünen vom 16. Dezember 2008 betreffend Klimaauswirkungen neuer Atomkraftwerke in Gösgen, Mühleberg und Beznau; Beantwortung, Aarau: RR.
- Regierungsrat Aargau (2009c): Jahresbericht mit Jahresrechnung 2008, Berichte und Auswertungen, Aarau: RR
- Statistisches Amt des Kantons Aargau STAAG (2009): Statistisches Jahrbuch 2009, Aarau: STAAG.

## **Kapitel 11: Landwirtschaft**

- Allen R.G., Perreira L.S., Raes D., and Smith M. (1998): Crop evapotranspiration: guidelines für computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56, Food an Agriculture Organization of the United nations (FAO), Rom.
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2008): Themenpapier 5: Klimawandel, Luftverschmutzung, Bern: BLW.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2008): Themenpapier 7: Boden, Bern: BLW.
- Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2006): Klima, Bern: BLW.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2009): Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz und Kyoto-Protokoll. Bern.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2009): Bewilligungen für Wasserentnahmen, Stand 31.03.2009, Aarau: BVU.
- Departement Finanzen und Ressourcen DFR (2007a): Bodennutzung, Aarau: DFR.
- Departement Finanzen und Ressourcen DFR (2007b): landwirtschaftAARGAU, Gesamtstrategie Landwirtschaft, Aarau: DFR.
- Doorenbos J., Kassam A.H. (1979): Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, Food an Agriculture Organization of the United nations (FAO), Rom.
- Fuhrer J. und Jasper K. (2009): Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima, AGRARForschung, 16 (10), 396 – 401.
- Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt; Kanton Luzern, Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement (2004): Regendaten für die Siedlungswasserwirtschaft Niederschlagsmessnetze der Kantone Aargau und Luzern. Jahresbericht 2003.

## **Kapitel 12: Siedlungsentwicklung**

- Aargauische Gebäudeversicherungsanstalt AGVA (2008): Geschäftsbericht 2007, Aarau: AGVA.
- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2009): Hochwassergefährdung bei mir zu Hause?, Umwelt Aargau Nr. 44, Aarau: BVU.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2007): Agglomerationsprogramm Verkehr und Siedlung, Aargau-Ost, Schlussbericht, Aarau: BVU.
- Departement BVU Kanton Aargau, Departement BJD Kanton Solothurn (2007): Agglomerationsprogramm Verkehr und Siedlung, AareLand – Netzstadt AarauOltenZofingen, Schlussbericht, Aarau: BVU.
- Parlow, E. (2009): E-Mails vom 10. Juni 2009 und 16. Juni 2009.
- Schweizerische Hagel-Versicherungs-Gesellschaft (ab Internet, 22.05.2009): Hagelgefahr in der Schweiz, [http://www.hagel.ch/fileadmin/dat/3052\\_A3.pdf](http://www.hagel.ch/fileadmin/dat/3052_A3.pdf) (22.05.2009).
- Wypych, S. und Bokwa A. (2007): Klima in Städten, Städtische Wärmeinseln, Environmental Science Published for Everybody Round the Earth, [http://www.atmosphere.mpg.de/enid/3863afeb3f0d8c71d86c776b555faf48,0/2\\_Stadtklima/\\_Waerme-Inseln\\_41r.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/3863afeb3f0d8c71d86c776b555faf48,0/2_Stadtklima/_Waerme-Inseln_41r.html) (04.05.2009).

## **Kapitel 13: Verkehr**

- Abteilung Tiefbau Kanton Aargau ATB (2009): E-Mail von Herrn Fridolin Vögeli am 26.06.2009.
- Beckmann J. (2009): Das gute Auto. Chancen und Herausforderungen der Elektromobilität. Mobilitätsakademie. Working Paper 2, Februar 2009.

- Beratendes Organ für Klimafragen OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, OcCC/ProClim Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2009): Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz und Kyoto-Protokoll. Bern.
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt BVU (2006): mobilitätAARGAU, Gesamtverkehrsstrategie, Aarau: BVU.
- Fleischhauer M. (2009): Klimawandel zukunftsfähig gestalten! Risiken im Bereich der kommunalen Infrastruktur, Dortmund: Technische Universität, Institut für Raumplanung.
- Keller, D. (2008): Stadtklima und Klimaanalyse Zürich, anthos 4, La Chaux-de-Fonds: Bund Schweizer Landschaftsarchitekten und Landschaftsarchitektinnen.
- Statistisches Amt des Kantons Aargau STAAG (2003): Eigentümlängen Schienenverkehr 1997, Aarau: STAAG.
- Statistisches Amt des Kantons Aargau STAAG (2008): Strassenlängen nach Kanton, Aarau: STAAG.

#### **Kapitel 14: Handlungsfelder**

- Boulouchos, K. (2009): Eindämmung des Klimawandels – Ein Transformationspfad für die Schweiz. Konstantinos Boulouchos, Institut für Energietechnik / EnergyScience Center, ETH Zürich. Referat anlässlich der öffentlichen Veranstaltung Klimawandel – wohin steuert die Schweiz? vom 12.11.2009 an der ETH Zürich.
- Energie Dialog Schweiz (2009): Energie-Strategie 2050, Impulse für die schweizerische Energiepolitik, Grundlagenbericht, Zürich: Energie Dialog Schweiz.
- Kanton Aargau (2009): Aufgaben und Finanzplan 2010 – 2013 mit Budget 2010. AFP. Vom Grossen Rat beschlossen und genehmigt am 1. Dezember 2009.
- Schipper, L. (1997): Indicators of Energy Use & Efficiency: Understanding the Link Between Energy and Human Activity.

#### **Kapitel 15: Kosten des Klimawandels für die Volkswirtschaft**

- Arbeitsgemeinschaft Ecoplan/Sigmaplan (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Schlussbericht. Im Auftrag von: Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Energie (BFE). Bern 2007.
- Infras, Ecologic, Rütter und Partner (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (Internationale Einflüsse). Im Auftrag von: Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Energie (BFE). Bern 2007.
- McKinsey&Company (2009): Swiss Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. Zürich, January 2009.
- Stern, N. (2006): The Economics of Climate Change. The Stern Review.

## 16.4 Klimamodelle und deren Aussagekraft, Vertiefung zu Kapitel 2

Im Rahmen des EU Projektes PRUDENCE (in Kapitel 2 sind Resultate vorgestellt) wurde eine probabilistische Klimavorhersage mittels mehrerer Simulationen von 16 verschiedenen Klimamodellketten erarbeitet). Probabilistisch bedeutet die Annahme, dass es keine absolut wahren, sondern nur wahrscheinliche Aussagen über die Realität gibt. Die Modellketten bestehen aus unterschiedlichen Kombinationen von IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Emissionsszenarien, vier verschiedenen globalen Klimamodellen (grobe Auflösung, globale Abdeckung) und acht regionalen Klimamodellen (feine Auflösung, Abdeckung Europa). Das Rechengebiet umfasst den gesamten europäischen Kontinent mit einer Auflösung von 50 km. Für die Schweiz wird die Klimavorhersage in die Gebiete nördlich und südlich der Alpen eingeteilt, siehe Abbildung 33. Die Alpen wirken als Klimaschranke. Die Südschweiz wird vom Mittelmeer beeinflusst und ist im Durchschnitt 2 – 3°C wärmer (Meteo Schweiz, ab Internet).

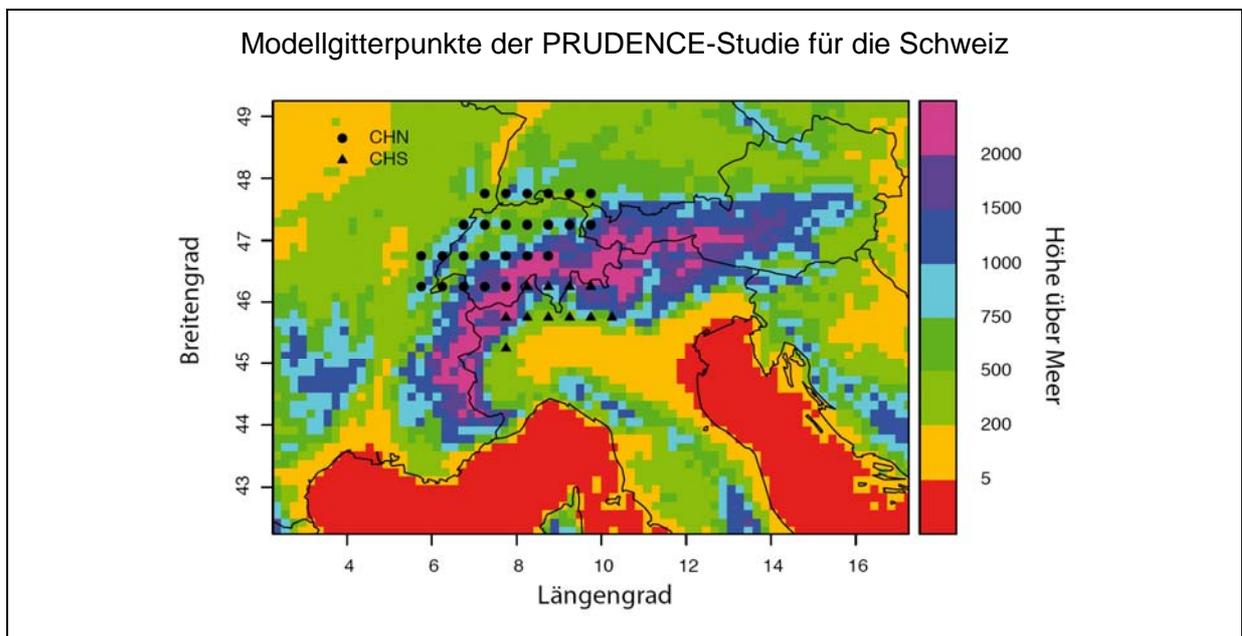


Abbildung 33: Modellgitterpunkte der PRUDENCE-Studie aufgeteilt in die Alpennordseite (CHN) und die Alpensüdseite (CHS). Die Topografie ist mit einer 15 km-Auflösung angegeben (Frei 2004).

Die verwendeten globalen Klimamodelle sind gekoppelte Atmosphären-Ozean-Modelle. Um die Auflösung zu vergrössern, werden die regionalen Klimamodelle in die globalen Klimamodelle eingebettet. Die Modellierungen zum künftigen Klima basieren auf verschiedenen Emissionsszenarien des IPCC für anthropogene Treibhausgase. Diese Emissionsszenarien basieren wiederum auf verschiedenen Annahmen zur wirtschaftlichen und demographischen Entwicklung. Für die nächsten Jahrzehnte wird aber nicht von einer grundsätzlich veränderten wirtschaftlichen Entwicklung ausgegangen, so dass für den Zeitraum bis 2050 die verschiedenen Emissionsszenarien nach wie vor nahe beieinander liegen.

Die Szenarien beinhalten weiter keine zusätzlichen Klimainitiativen, wie beispielsweise das Kyoto-Protokoll. Massnahmen zur Treibhausgaskenkung sind wegen der Verweildauer der Gase in der Atmosphäre erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wirksam.

Für die Vorhersage wird vorausgesetzt, dass sich die regionale Temperatur- und Niederschlagsänderung proportional zur globalen Temperaturänderung verhält. Die globale Temperaturänderung ist abhängig von der zukünftigen Änderung in der Treibhausgaskonzentration und von der Klimasensitivität (Mass für die Stärke der Rückkopplungen). Für die Abschätzung der Treibhausgaskonzentrationen wurden alle Emissionsszenarien gleich gewichtet um Unsicherheiten in den globalen Emissionsentwicklungen zu berücksichtigen. Trotzdem bleiben längerfristig Unsicherheiten bestehen, da die sozio-ökonomische, demographische und technologische Entwicklung unserer Zivilisation nur sehr ungenau vorhersagbar ist. Diese Angaben sind aber entscheidend für eine Abschätzung zukünftiger Treibhausgasemissionen.

Unsicherheiten oder Fehlerquellen in der PRUDENCE Studie bestehen darin, dass nur zwei verschiedene, gekoppelte Atmosphären-Ozean-Klimamodelle vertreten sind, die eine sehr ähnliche Änderung der grossskaligen Zirkulation in der Atmosphäre und im Ozean aufweisen. Ein Problem könnte in einer Unterschätzung der bestehenden Unsicherheiten in punkto „überraschender“ Entwicklungen liegen. Das wären zum Beispiel eine starke Abschwächung oder sogar ein Abschalten des Golfstroms. Weiter wird in den Modellen nicht berücksichtigt, inwiefern das Klima natürlich (Variation der Sonnenstrahlung, usw.) variiert. Anthropogen induzierte Schwankungen werden auch in Zukunft die natürlichen Klimaschwankungen überlagern. Das Wissen über die Prozesse im Klimasystem ist beschränkt und birgt damit Unsicherheiten in der Erfassung aller Teilbereiche des Klimawandels (Frei 2004). Die Resultate der PRUDENCE-Studie sind trotz dieser Unsicherheiten bis heute gültig und anwendbar. In rund drei Jahren wird gemäss Aussagen von Meteo Schweiz eine neue regionale Klimastudie publiziert, die mit kleineren Unsicherheitsbereichen ein genaueres Bild der Zukunft zeigen soll.

## 16.5 Liste der Verantwortungsarten im Kanton Aargau gemäss Kapitel 9

Für sämtliche aargauischen Farn- und Blütenpflanzenarten sowie für die sieben naturschützerisch wichtigsten Tiergruppen wurden anhand eines Kriterienkatalogs Verantwortung, Dringlichkeit und Machbarkeit von Fördermassnahmen erarbeitet, welche zum Schluss in drei Zahlen umgerechnet wurden: Verantwortungs-, Dringlichkeits- und Machbarkeitswert. Anhand dieser drei Zahlenwerte liessen sich unter anderem jene Arten ermitteln für die der Kanton Aargau eine besondere Verantwortung trägt.

Quelle: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Landschaft und Gewässer, ergänzt um Spalte „Möglicher Einfluss des Klimawandels“, Stand 6.3.2008

- Art aktuell im Aargau ausgestorben
- Ungenügende Datenlage

### Möglicher Einfluss des Klimawandels

- + Einfluss tendenziell positiv, Art profitiert tendenziell von einer Erwärmung
- Einfluss tendenziell negativ
- 0 Einfluss tendenziell neutral

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
	max. 18	max. 18	max. 7	
<b>Amphibien</b>				
Geburtshelferkröte	11	13	6	+
Gelbbauchunke	10.5	15	6	+
Kreuzkröte	11.5	14	6	+
Laubfrosch	9.5	9	6	+
Kammolch	8	14	6	+
Fadenmolch	6	3	6	–
<b>Pflanzen</b>				
Spornlos	5	2	6	+
Dichtblättriger Eisenhut	6	12	2	–
Sommer-Adonis	5	15	6	+
Feuerroter Adonis	6	10	6	+
Wohlrichender Odermennig	5	13	4	0
Grasblättriger Froschlöffel	6	15	6	+
Lanzettblättriger Froschlöffel	5	14	6	+
Kugeliger Lauch	9	15	5	+
Schlangen-Lauch	5	14	7	+
Knorpelmöhre	8	15	5	+
Blauer Gauchheil	6.5	12	6	+
Kleiner Gauchheil	7	16	6	+
Wald-Windröschen	7	15	5	+
Stinkende Hundskamille	5	15	5	+
Kriechender Sellerie	11	15	3	–
Dolden-Gänsekresse	5	12	2	0
Gewöhnliche Osterluzei	7	16	7	+
Lämmerlattich	9	16	4	+

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Acker-Meister	6	7	6	+
<b>Färber-Meister</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>+</b>
Spiessblättrige Melde	6	16	7	+
Schwarze Schwarznessel	8	12	6	+
Weisse Schwarznessel	6.5	13	5	+
Nickender Zweizahn	6	16	7	+
<b>Spätblühender Bitterling</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>3</b>	<b>+</b>
Acker-Trespe	5	16	6	+
<b>Dicke Trespe</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>+</b>
Japanische Trespe	5	15	2	+
Trauben-Trespe	8	16	5	-
Roggen-Trespe	6	15	6	+
<b>Erdkastanie</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>+</b>
Rundblättriges Hasenohr	6	8	6	+
Schwanenblume	5	3	6	+
Graues Reitgras	5	7	6	-
Aufsteigender Bergthymian	8	7	2	+
<b>Minzen-Bergthymian</b>	<b>6.5</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>+</b>
Calepine	7	16	1	+
Saat-Leindotter	5	10	6	+
Borsten-Glockenblume	7	16	2	-
Sumpf-Schaumkraut	6	7	7	-
Weg-Distel	7	8	2	+
<b>Zyperbinsen-Segge</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>+</b>
Buxbaums Segge	5	7	6	-
<b>Rankende Segge</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>-</b>
<b>Hartmanns Segge</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>-</b>
Magere Segge	5.5	12	2	-
Fuchs-Segge	6	7	6	-
Haftdolde	5	10	6	+
Hain-Flockenblume	8	7	4	+
Zartblättrige Flockenblume	5.5	3	6	+
Sonnenwend-Flockenblume	7	6	4	+
Gefleckte Flockenblume	7	7	6	+
<b>Schmalblättrige Spornblume</b>	<b>6.5</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>-</b>
<b>Klebriges Hornkraut</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>+</b>
Niedriges Hornkraut	6.5	13	4	+
Untergetauchtes Hornblatt	6	5	6	-
<b>Mauer-Gänsefuss</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>+</b>
Schneeballblättriger Gänsefuss	7	16	2	+
Stinkender Gänsefuss	6	16	2	+
Wasserschierling	6	14	6	+
Knollige Kratzdistel	6	7	6	+
<b>Schierling</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>+</b>
Feld-Rittersporn	5	16	6	+
Berg-Kronwicke	5.5	12	6	-
Niederliegender Krähenfuss	7	16	2	+
Abgebissener Pippau	5	14	6	+
Echte Hundszunge	5	6	4	+
Stachliges Kammgras	6	13	2	+

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Gelbe Zyperbinse	5	7	6	+
Braune Zyperbinse	5	7	6	+
Lange Zyperbinse	5	7	2	+
Frauenschuh	8	16	6	-
Schwarzwerdender Geissklee	5	12	2	+
Aschersons Knautgras	6	3	5	0
Fleischfarbene Orchis	12	9	6	-
Strand-Schmiele	9	15	3	-
Grenobler Nelke	6	5	6	0
Deutscher Backenklee	7	15	1	+
Krautiger Backenklee	9	3	6	+
Quirlblättriger Tännel	7	15	4	+
Österreichische Sumpfbirse	5.5	4	6	+
Eiförmige Sumpfbirse	6	8	6	+
Schmallippige Sumpfwurzel	5.5	0	3	-
Rauhzähniger Schachtelhalm	8	15	1	-
Leberbalsam	5	12	5	-
Schlanke Wollbinse	10	7	6	-
Feld-Mannstreu	6	8	5	+
Sichel-Wolfsmilch	6	15	1	+
Sumpf-Wolfsmilch	5	7	6	-
Kleiner Augentrost	5	6	2	-
Sicheldolde	8	16	6	+
Raublättriger Schwingel	5	12	0	0
Acker-Fadenkraut	5	13	2	+
Kleines Fadenkraut	9	15	3	+
Deutsches Fadenkraut	7	15	3	+
Sechskronblättrige Spierstaude	5	14	6	-
Rankender Erdrach	5	16	1	+
Vaillants Erdrach	7	16	4	+
Wiesen-Gelbstern	8	16	6	0
Acker-Gelbstern	6	15	6	+
Ausgerandeter Hohlzahn	6	13	2	+
Blaugrünes Labkraut	7	11	4	+
Pariser Labkraut	6	16	2	+
Dreihörniges Labkraut	6	15	5	+
Feld-Enzian	5	2	5	-
Aufgeblasener Enzian	5	12	6	-
Knotiger Storchschnabel	5.5	0	2	-
Gewöhnliche Gladiole	9	7	6	0
Sumpf-Gladiole	8.5	16	6	0
Grosses Süßgras	5	3	6	+
Gelbes Ruhrkraut	5	15	3	+
Gnadenkraut	5	16	6	0
Mauer-Gipskraut	6	16	6	+
Kriechendes Gipskraut	5	11	5	0
Sonnenwende	5	8	6	+
Grüne Nieswurz	6.5	2	4	0
Hasenohrartiges Habichtskraut	5	12	5	-
Bocks-Riemenzunge	7	8	6	+

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Wasserfeder	7	14	6	0
Froschbiss	7	11	6	+
Wassernabel	5	7	6	-
Bilsenkraut	6	10	7	+
Schönes Johanniskraut	7	0	4	-
Bitterer Bauernsenf	6	15	4	+
Wiesen-Alant	6	16	5	+
Schweizer Alant	7	15	6	+
Rauher Alant	5	7	6	+
Zwiebel-Simse	6	8	4	-
Kopf-Simse	7	15	5	-
Pfeilblättriges Leinkraut	5	15	6	+
Weidenblättriger Lattich	6	16	2	+
Gift-Lattich	6	14	5	+
Bastard-Taubnessel	7	13	5	+
Preussisches Laserkraut	8	16	6	-
Verschiedenblättrige Platterbse	5	12	7	+
Rauhhaarige Platterbse	7	15	4	+
Gras-Platterbse	8	13	4	+
Sumpf-Platterbse	5	15	6	-
Knollige Platterbse	5	16	6	+
Wilder Reis	6	8	6	+
Bastard-Frauenspiegel	9	15	6	-
Bucklige Wasserlinse	10	15	2	+
Echter Löwenschwanz	6	8	7	+
Feuer-Lilie	6.5	17	5	0
Dingel	6.5	13	5	+
Schlammkraut	6	16	1	-
Glanzkraut	9	7	6	-
Strandling	6	15	4	-
Taumel-Lolch	7	16	2	+
Ludwigie	7	15	3	-
Überschwemmter Bärlapp	5	15	4	-
Ysopblättriger Weiderich	7	15	4	+
Portulak-Sumpfuquendel	6	15	1	+
Kleefarn	7	16	7	+
Acker-Wachtelweizen	5	16	6	+
Polei-Minze	7	8	2	+
Bastard-Miere	6	16	6	+
Feld-Löwenmaul	5	16	5	+
Brunnen-Quellkraut	6	12	2	+
Übersehene Bisamhyazinthe	6	16	4	+
Verschiedenfarb Vergissmeinnicht	8	16	2	+
Mäuseschwanz	7	16	6	+
Gewöhnliche Katzenminze	6	12	2	+
Rispiges Ackernüsschen	5	7	6	+
Acker-Schwarzkümmel	6	5	6	+
Früher Zahntrost	6	16	4	+
Wasser-Rebendolde	6	15	6	-
Röhren-Rebendolde	6	15	4	-

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Lachenals-Rebendolde	9	15	6	-
Eselsdistel	5	16	2	+
Kleine Spinnen-Ragwurz	5	11	6	+
Blasse Orchis	6.5	13	6	+
Sumpf-Orchis	5	12	6	-
Purpur-Orchis	5	15	6	+
Grossblütige Strahlendolde	5	10	6	+
Nickender Milchstern	7	10	6	+
Vogelfuss	9	15	5	+
Elsässer Sommerwurz	6	12	4	+
Gelbe Sommerwurz	6	15	4	+
Purpur-Sommerwurz	5	12	1	+
Sand-Mohn	7	16	6	+
Wald-Läusekraut	7	12	4	-
Rispen-Lieschgras	6	15	5	+
Berg-Föhre	5	12	6	-
Waldbewohnendes Rispengras	5	3	2	0
Nagelkraut	6	16	2	+
Acker-Knorpelkraut	7	15	7	+
Grosses Knorpelkraut	6	15	5	+
Buchsblättrige Kreuzblume	5	14	4	-
Fries Laichkraut	6	14	2	-
Grasartiges Laichkraut	5	14	6	-
Schweizerisches Laichkraut	8	16	5	-
Gefärbtes Laichkraut	8	15	6	-
Palmer Laichkraut	5	15	6	-
Schmalblättriges Laichkraut	6	12	3	-
Schimmerndes Laichkraut	6	15	2	-
Siebenblättriges Fingerkraut	7	7	6	+
Graues Fingerkraut	6	7	6	+
Weisse Brunelle	6	16	2	+
Gewöhnliche Küchenschelle	8	15	6	+
Grünblütiges Wintergrün	5	16	4	-
Wasser-Hahnenfuss	5	14	4	+
Acker-Hahnenfuss	5	16	6	+
Steifblättriger Hahnenfuss	5	14	6	-
Zungenblättriger Hahnenfuss	5	11	6	-
Polyanthemusblättriger Hahnenfuss	5	13	1	-
Kriechender Hahnenfuss (selten)	6	12	5	-
Wurzelnder Hahnenfuss	5	12	2	-
Färber Reseda	5	16	7	+
Felsen-Kreuzdorn	6	0	4	+
Rostrote Alpenrose	5	4	6	-
Teichkresse	5	4	6	+
Tannen-Rose	5	4	4	+
Jundzills Rose	5.5	4	6	+
Zimt-Rose	5	12	4	+
Übersehene Rose	6.5	12	5	+
Apfel-Rose	5	12	5	+

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Ufer-Ampfer	8	7	4	+
Meer-Ampfer	7	15	2	+
Schöner Ampfer	7	15	2	+
Knotiges Mastkraut	5	15	5	-
Pfeilblättriges Pfeilkraut	6	15	5	+
Rotes Seifenkraut	5	2	7	-
Knöllchentragender Steinbrech	6	14	6	+
Venuskamm	6	10	6	+
Dreikant-Teichbinse	8	14	6	+
Einjähriger Knäuel	5	13	6	+
Dickblatt	6	12	6	+
Moor Mauerpfeffer	7	12	3	-
Wasser-Kreuzkraut	5.5	4	6	-
Kurzborstige Borstenhirse	6	16	6	+
Nelken-Leimkraut	6.5	16	7	0
Französisches Leimkraut	8	15	3	+
Ackerelke	5	15	6	+
Steife Rauke	7	13	5	+
Moor-Gänsedistel	6	13	2	+
Speierling	8	15	7	+
Kleinfrüchtiger Igelkolben	6	14	5	-
Übersehener Igelkolben	6	14	5	-
Kleiner Igelkolben	6	14	6	-
Sommer-Wendelorchis	10	7	6	-
Acker-Ziest	6	15	4	+
Tisdälie	9	15	4	+
Knoblauch-Gamander	6	15	6	+
Bauhins Wiesenraute	8	15	5	+
Bayrischer Bergflachs	5.5	11	6	-
Leinblättriger Bergflachs	8	13	4	-
Pyrenäen-Bergflachs	5	13	5	-
Schnäbelfrüchtiger Bergflachs	7	13	5	-
Spatzenzunge	6	8	5	+
Acker-Borstendolde	5	16	4	+
Kleiner Bocksbart	9	16	5	+
Wassernuss	11	15	5	+
Erdbeer-Klee	5	7	7	+
Gelblicher Klee	7	16	6	+
Wilde Tulpe	8	8	6	+
Klettendolde	7	15	5	+
Kleiner Rohrkolben	10	16	5	+
Shuttleworths Rohrkolben	10	14	6	+
Bremis Wasserschlauch	8	15	6	-
Mittlerer Wasserschlauch	6	17	6	-
Kuhkraut	7	16	4	+
Wiesen-Baldrian	6	3	2	0
Hügel-Baldrian	5	7	2	0
Gezählter Nüsslisalat	5	16	4	+
Gefurchter Nüsslisalat	7	16	6	+
Schabenkraut	5	3	7	+

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Windenblumenähnlich Königskerze	6	16	6	+
Flockige Königskerze	6	14	7	+
Kalaminthenblättriger Ehrenpreis	7	9	2	+
Lockerähriger Ehrenpreis	6	14	6	+
Dreiblättriger Ehrenpreis	5	15	5	+
Graue Wicke	5	13	1	+
Hecken-Wicke	5.5	12	2	+
Zottige Wicke	6	13	1	+
Bunte Wicke	7	15	5	+
Moor-Veilchen	6	7	6	-
Trespen-Federschwingel	7	15	4	+
<b>Fledermäuse</b>				
Mopsfledermaus	9	10	2.5	+
Breitflügel-Fledermaus	5	3	3.5	+
Bechsteinfledermaus	6.5	6	2.5	+
Wimperfledermaus	6.5	6	1.5	+
Grosses Mausohr	6.5	7	7	+
Riesenabendsegler	5.5	3	0	+
Kleiner Abendsegler	6	3	4.5	+
Graues Langohr	5.5	7	7	+
Grosse Hufeisennase	9.5	11	7	+
<b>Heuschrecken</b>				
Italienische Schönschrecke	5	12	5	+
Wanderheuschrecke	7	10	3	+
Zweifarbige Beissschrecke	7	11	7	0
Rotflügelige Oedlandschrecke	6	14	6	+
Westliche Beissschrecke	5.5	11	6	+
Rotflügelige Schnarrschrecke	5	14	6	-
Sumpfgrippe	5	3	6	+
Blaufügelige Sandschrecke	5	5	6	+
Sumpfschrecke	5	11	7	-
Westliche Dornschrecke	6	11	3	0
<b>Libellen</b>				
Helm-Azurjungfer	11.5	15	6.5	0
Westliche Keiljungfer	5	10	6	+
Gelbe Keiljungfer	11.5	0	3	0
Glänzende Binsenjungfer	7	12	5	0
Kleine Binsenjungfer	7	14	5.5	+
Zierliche Moosjungfer	10	7	5.5	+
Grosse Moosjungfer	7	10	5.5	-
Grüne Keiljungfer	8	5	5.5	+
Östlicher Blaupfeil	7	5	7	+
Kleiner Blaupfeil	5.5	7	6.5	-
Sumpf-Heidelibelle	6.5	7	7	+
Gefleckte Heidelibelle	6	13	2.5	+
Gebänderte Heidelibelle	7	14	3	+
<b>Reptilien</b>				
Schlingnatter	5	12	7	+
Europäische Sumpfschildkröte	12.5	12	3	+
Ringelnatter	5	8	7	+

Artname deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Juraviper, Aspisviper	10	11	7	+
Kreuzotter	6	12	4	-
<b>Tagfalter</b>				
Kleiner Schillerfalter	6	15	4	+
Baumweissling	5	14	2	+
Kleiner- /Grosser Sonnenröschen-Bläuling-Komplex	5	14	4	+
Hainveilchenperlmutterfalter, Magerrasen-Perlmutterfalter	5	13	7	+
Braunfleckiger Perlmutterfalter	5	12	4	+
Weisser Waldportier	6	14	4	+
Malven-Dickkopffalter	7	7	7	+
Heilziest-Dickkopffalter, Betonien-Dickkopffalter	6	15	4	+
Rostbraunes Wiesenvögelchen, Rotbraunes Wiesenvögelchen	5	16	5	+
Grosses Wiesenvögelchen	13	12	6	-
Kurzschwänziger Bläuling	7	7	4	+
Skabiosenscheckenfalter, Goldener Scheckenfalter	8	10	7	+
Frühlings-scheckenfalter, Brauner Würfelfalter, Perlbinde, Schlüsselblumen-Würfelfalter	5	13	5	+
Rostbinde, Ockerbindiger Samtfalter	8	15	4	+
Segelfalter	6	15	5	+
Grosser Eisvogel	6	15	4	+
Gelbringfalter	10	16	6	+
Kleiner Ampferfeuerfalter, Lilagold-Feuerfalter	6.5	13	4	-
Kleiner Moorbläuling, Lungenenzian-Ameisen-Bläuling	11	16	6	-
Dunkler Moorbläuling, Dunkler Wiesenknopf-Ameisen-Bläuling	10	16	6	-
Grosser Moorbläuling, Heller Wiesenknopf-Ameisen-Bläuling	10	17	6	-
Westlicher Scheckenfalter	7	12	5	+
Flockenblumen-Scheckenfalter	6	12	4	+
Apollo	9	12	4	-
Grünadern/Bergweissling-Komplex	5	0	5 6	0
Idas-Bläuling	5	12		+
Grünblauer Bläuling	6.5	12	4	+
Esparssetten-Bläuling	5	12	5	+
Kleiner Schlehen-Zipfelfalter (Aka-zienszipfelfalter)	6	12	5	+
Brauner Eichenzipfelfalter, Eichenzipfelfalter	6	15	5	+
Pflaumenzipfelfalter	6	12	7	+
Kreuzdorn-Zipfelfalter, Schlehenzipfelfalter	7	16	5	+

Artnamen deutsch	Verantwortung V	Dringlichkeit D	Machbarkeit M	Möglicher Einfluss des Klimawandels
Mattscheckiger Braun-Dickkopffalter	10	17	6	+
<b>Vögel</b>				
Drosselrohrsänger	8	7	4	+
Flussuferläufer	9	17	5	-
Eisvogel	7	11	7	+
Krickente	5	3	4	+
Knäkente	6	3	4	+
Schnatterente	9	3	5	+
Graugans	5	0	7	+
Alpensegler	5.5	8	7	+
Steinkauz	11	18	6	+
Tafelente	7	3	5	+
Haselhuhn	5	17	4	-
Uhu	8	12	4	+
Ziegenmelker	9	17	3	+
Flussregenpfeifer	7	10	5	+
Weissstorch	9	12	4	+
Wachtel	6	7	4	+
Mittelspecht	9	10	6	+
Zaunammer	7	14	5	+
Wanderfalke	5	11	7	+
Bekassine	10	17	4	-
Gelbspötter	8	16	2	-
Orpheusspötter	6.5	0	3	+
Zwergdommel	10	7	5	-
Wendehals	5	17	5	+
Raubwürger	10	14	3	+
Rotkopfwürger	12	17	4	+
Weisskopfmöwe	6.5	0	5	+
Lachmöwe	6	15	7	-
Rohrschwirl	7.5	5	5	-
Feldschwirl	7	8	6	-
Heidelerche	10	17	3	+
Bienenfresser	6	4	4	+
Grauammer	8	16	6	+
Kolbenente	11	3	4	0
Grosser Brachvogel	10	17	4	-
Rebhuhn	11	18	4	+
Gartenrotschwanz	6.5	16	6	+
Grauspecht	6	10	5	+
Tüpfelsumpfhuhn	8	5	4	-
Uferschwalbe	7.5	14	6	+
Braunkehlchen	7.5	17	4	-
Waldschnepfe	7	13	4	-
Dorngrasmücke	8	15	6	+
Auerhuhn	9	16	5	-
Wiedehopf	6	18	5	+
Kiebitz	10	15	4	-

## 16.6 Glossar

Absorption	Aufnahme von Strahlung und Umwandlung in Wärme, Energieeintrag
Aerosol	Feste, flüssige und gasförmige Luftbeimengungen (Partikel) aus der Industrie, Kraftwerken, usw.
Albedo	Anteil der Sonnenstrahlung, der von der Erdoberfläche in den Weltraum reflektiert wird
Antiklinal, Antiklinalkerne	Ein Antiklinal ist eine geologische Falte, bei der die älteren Schichten im Kern liegen.
Atmosphäre	Lufthülle der Erde
Bäche	Durch den Aargau fliesst eine Reihe von grossen Bächen: Bünz, Wyna, Suhre, Sisslen, Uerke, Möhlinbach, Aabach, Surb, Wigger, Pfaffneren, Jonen.
Einzugsgebiet	Gebiet bei dem alle Abflüsse aus Niederschlägen in ein Gewässer eingeleitet werden und es damit speisen
Emission	Aussendung, Energieaustrag
Evapotranspiration	Verdunstung des Bodenwassers (Evaporation) und der Pflanzen (Transpiration)
Faktormärkte	Märkte, auf denen Produktionsfaktoren (natürliche Ressourcen, Arbeit, Maschine, Finanzmittel, usw.) gekauft und verkauft werden können.
Flurabstand	Der Flurabstand ist der Abstand zwischen der Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche.
Flüsse	Alle grossen Flüsse der Alpennordseite fliessen im Aargau zusammen: Aare, Reuss, Limmat, Rhein.
Fossile Brennstoffe	Kohlenstoffbasierte Brennstoffe aus fossilen Kohlenwasserstoffablagerungen, einschliesslich Kohle, Torf, Öl und Erdgas (IPCC, 2007)
Grundwasserneubildung	Speisung des Grundwassers
Heizgradtage	Differenz zwischen der erwünschten mittleren Raumtemperatur (20 °C) und der mittleren Aussentemperatur, summiert über alle Kalendertage mit $T < 12$ °C.
kolline Stufe	Vegetationsgürtel auf ca. 200 – 600 m.ü.M. mit Eichenwald, Eichen-Hagenbuchenwald, Rebbau, Edelobstanbau, etc.
Kühlgradtage	Differenz zwischen der mittleren Tagesaussentemperatur und der Referenztemperatur (18.3 °C), summiert über alle Kalendertage mit $T > 18.3$ °C.

Hochwasser, z.B. HQ 100	Unter Jahrhundert-Hochwasser oder Jahrhundert-Flut (auch 100-jährlicher Abfluss) versteht man die Pegelhöhe oder Abflussmenge eines Gewässers, die im statistischen Mittel einmal alle 100 Jahre erreicht oder überschritten wird. Da es sich um einen Mittelwert handelt, kann ein Jahrhundert-Hochwasser jedoch auch mehrmals in hundert Jahren auftreten oder jahrhundertlang ausbleiben.
Kolk	Vertiefung in einem Fluss
Kolmatierung	Ablagerung von Schwebestoffen und damit eine allmähliche Erhöhung des Bodens. Damit gehen auch Strukturen am Gewässerboden verloren.
Konfidenzintervall (95%)	Wahrscheinlichkeit von 95%, dass Betreffendes in einem bestimmten Rahmen eintritt
Lee	bedeutet die vom Wind abgewandte Seite. Luv ist die dem Wind zugewandte Seite.
Median	mittlere Schätzung
Mischsystem	Im Mischsystem werden häusliches, gewerbliches und industrielles Schmutzwasser und das Niederschlagswasser im Gegensatz zur Trennkanalisation gemeinsam in einer Kanalisation abgeleitet. Aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Kläranlage und um aus technischen und wirtschaftlichen Erfordernissen den Kanalquerschnitt zu begrenzen, werden im Mischsystem an geeigneten Stellen Regenentlastungsbauwerke oder Regenrückhalteräume angeordnet.
Nitrat-Projektgebiete	Gemäss Gewässerschutzgesetz (GSchG) können belastete Gewässer mittels gezielter finanzieller Anreize an die Landwirtschaftsbetriebe saniert werden. Ziel der Sanierungsprojekte nach Artikel 62a GSchG ist, dass die Bäuerinnen und Bauern, die im Rahmen eines Sanierungsprojekts vertraglich vereinbarte Massnahmen zur Senkung von übermässigen Gewässerbelastungen durch Nitrat, Phosphor und Pflanzenschutzmittel umsetzen, kostendeckende Beiträge erhalten. Der Hauptanteil der Kosten wird dabei vom Bund getragen, den restlichen Betrag können sich verschiedene Parteien teilen (Kantone, Gemeinden, Wasserversorger, Sponsoren).
Nival	Schnee beeinflusst
ökologische Amplitude	Maximale Spanne eines Umweltfaktors
Phänologie	Typischer Zyklus von Tieren oder Pflanzen innerhalb eines Jahres in Abhängigkeit des Klimas und der Witterung
Pluvial	Regen beeinflusst
Primärenergieträger	Energieträger, die (noch) keiner Umwandlung oder technischen Aufbereitung unterzogen wurden; sie befinden sich in naturbelassenem Zustand.
Reflexion	Zurückwerfen, kein Energieeintrag resp. -austrag

Rückkopplung	Die Wirkung eines Prozesses verändert einen zweiten Prozess, welcher selber ersteren Prozess beeinflusst. Die Beeinflussung findet entweder in einer Verstärkung oder in einer Abschwächung statt (IPCC, 2007).
Schwarzwild	Wildsau
Stratosphäre	Schicht der Atmosphäre oberhalb der Troposphäre in 11 bis 28 km Höhe
Trennkanalisationssystem	Entwässerungssystem, üblicherweise bestehend aus zwei Leitungssystemen für die getrennte Ableitung von Schmutz- und Regenabwasser. Das niederschlagsabhängige Abwasser wird vollständig unabhängig vom Schmutzabwasser behandelt bzw. abgeleitet.
Trockenwetteranfall	Der Trockenwetteranfall setzt sich zusammen aus den beiden Komponenten Schmutzwasseranfall und dem Fremdwasseranfall ohne Regenwasser (siehe auch Mischsystem und Trennkanalisationssystem).
Troposphäre	Unterste 11km der Atmosphäre. In ihr spielt sich das Wetter ab.