
HOCHWASSER UND DÜRRE – DIE ROLLE VON LANDSCHAFTSWASSERHAUSHALT UND BODEN IM KLIMAWANDEL

Karl Auerswald

1. EINFÜHRUNG

Die Meldungen über Unwetter und zum Teil katastrophale Hochwasser¹ wie das Simbach- oder das Ahr-tal-Ereignis wechseln sich ab oder überlagern sich gar mit Berichten über Wassermangel, Dürren und Hitzewellen. Etwas ist offensichtlich aus dem Lot geraten und dafür wird gemeinhin der CO₂-getriebene Klimawandel verantwortlich gemacht.

Der Boden trocknet aus, weil es so heiß ist – eine Scheinkorrelation

Bei den Deutungsversuchen der Zusammenhänge ist jedoch Vorsicht geboten. Aussagen, wie „Der Boden trocknet so stark aus, weil es so heiß ist“ oder „weil die Luftfeuchtigkeit so gering ist“ (siehe z. B. der Dürremonitor, <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>), stellen lediglich Zirkelschlüsse dar: die Korrelationen sind Gemeinsamkeitskorrelationen. Sie beschreiben nicht Ursache und Wirkung, sondern dass zwei Dinge sich gleichzeitig ändern. (das wohl bekannteste Beispiel für einen solchen Scheinzusammenhang ist der gleichzeitige Rückgang der Storchpopulation und der Kindergeburten). Dies ist einfach daran erkennbar, dass sich die Argumentation umdrehen lässt und

immer noch zutrifft: „Es ist so heiß, weil der Boden so trocken ist“. Selbst der einleuchtende Satz „es ist so trocken, weil es lange nicht geregnet hat“ ist nur ein Zirkelschluss. Es gilt nämlich genauso, dass es nicht regnet, wenn der Boden ausgetrocknet ist, weil ein Großteil des Niederschlags aus der Landverdunstung stammt und daher der Niederschlag wesentlich vom Boden gespeist wird.

Um die wahren Ursachen zu erkennen, ist es nützlich sich vor Augen zu halten, dass Energiebilanz und Wasserbilanz gekoppelt sind, da sie ein gemeinsames Glied aufweisen, nämlich die Verdunstung (Allen et al, 1998). Daher müssen beide Bilanzen gleichzeitig geschlossen sein.

Die Wasserbilanz ist geschlossen, wenn gilt:

$$N - ET - A \pm \Delta S = 0$$

Dabei sind N der Niederschlag, ET die tatsächliche Evapotranspiration (Verdunstung), A der Abfluss ins Grundwasser oder zur Seite (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss) und ΔS ist die Änderung der Füllung des Bodenwasserspeichers.

¹ Hochwasser wird hier als Überbegriff für Flusshochwasser und Sturzfluten verwendet

Die Energiebilanz ist geschlossen, wenn gilt:

$$S_k \times (1 - \alpha) - S_{nl} - H - B - ET \times \lambda = 0$$

Dabei ist S_k die einfallende kurzwellige Sonneneinstrahlung, α ist die Albedo (Rückstrahlvermögen: Anteil der kurzwelligen Strahlung, die reflektiert wird), S_{nl} ist der Saldo aus einfallender und abgegebener langwelliger Strahlung, H ist die fühlbare Wärme (Erwärmung der Luft), B ist der Bodenwärmestrom und λ ist die Verdunstungsenthalpie (Wärme, die für Verdunstung benötigt wird). Nur S_{nl} wird vom CO_2 -getriebenen Klimawandel direkt beeinflusst. Die meisten anderen Größen ändern sich dadurch indirekt ebenfalls, da ja beide Bilanzen geschlossen sein müssen. Viele der anderen Größen werden aber auch durch die Landnutzung stark beeinflusst, wodurch sich Wasser- und Energiebilanzen ebenfalls ändern.

Die Albedo einer strohbedeckten Bodenoberfläche ist beispielsweise um ca. 30 % größer als die einer unbedeckten. Das bedeutet: Würde der Landwirt das Stroh auf der Bodenoberfläche belassen, hätte er mehr Wasser für seine Kulturpflanzen zur Verfügung, da netto weniger Strahlung die Verdunstung antreiben würde.

Auch die Landnutzung hat Einfluss

Hätten die Landwirte in Europa das Stroh nicht eingearbeitet, sondern auf der Bodenoberfläche belassen und so die Albedo verändert, wäre bei der europaweiten Hitzewelle 2003 die Temperatur im August im Mittel der Gesamtfläche um 2°C niedriger gewesen (Davin et al., 2014). Dazu kommen weitere direkte Effekte einer Strohbedeckung: verringerte Kapillarwasserverluste durch die physikalische Barriere der Strohdecke und verringertes Bodendampfstrom, verbesserte Infiltration bei Starkregen durch verminderte Verschlammung, weniger Erosion, mehr Taubildung durch die thermische Dämmung.

Während der CO_2 -getriebene Klimawandel direkt also nur S_{nl} beeinflusst, verändert die Landnutzung direkt

fünf Größen, nämlich ET , A , ΔS , λ und B , und hat damit einen viel größeren direkten Einfluss auf die Wasser- und Energiebilanzen, selbst wenn man bedenkt, dass die Landnutzung divers ist. Die Landnutzung könnte daher den CO_2 -bedingten Einfluss kompensieren. Gegenwärtig wird dies noch nicht genutzt. Vielmehr ist gegenwärtig die Landnutzung der wesentliche Treiber von Überflutungen, Trockenheit und Hitzewellen.

Die wichtigsten Einflüsse des CO_2 -getriebenen und des landnutzungsgetriebenen Klimawandels werden daher im Folgenden dargestellt.

2. DER CO_2 -GETRIEBENE KLIMAWANDEL

Wie verändert der Klimawandel den Niederschlag? Betrachtet man summarische Parameter wie den Sommerniederschlag, so zeigt sich allenfalls eine leichte Abnahme (Abb. 1). Im Winter ist eine leichte Zunahme des Niederschlags festzustellen (BayStMUV, 2021). Auch für die Zukunft bis 2050 sagen Klimaprojektionen bei Business as usual, keine wesentliche Änderung voraus.

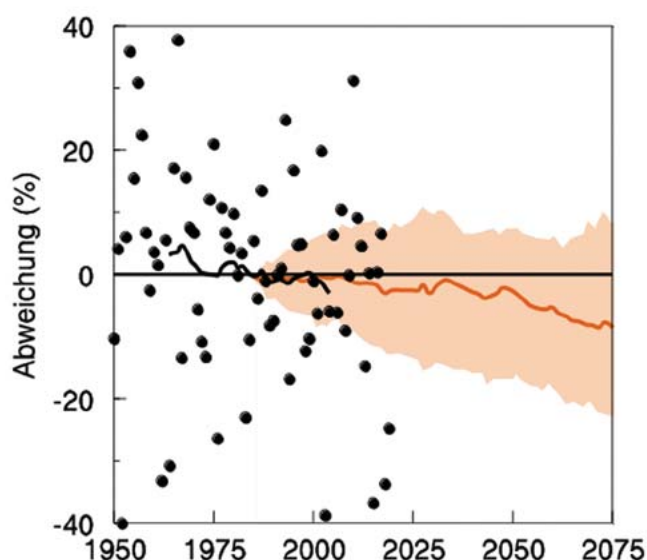


Abb. 1: Abweichung des Sommerniederschlags (Juni, Juli, August) in Bayern vom Mittel des Zeitraums 1971-2000; Punkte und schwarze Kurve zeigen die Messwerte, der orange schattierte Bereich und die orange Kurve zeigen die Bandbreite und den Median der Erwartungen bei Business as usual (Projektionspfad RCP 8.5; Daten aus BayStMUV 2021).

Anders sieht es aus, wenn man nicht summarische Parameter, sondern einzelne Niederschlagsereignisse betrachtet: Die einzelnen Ereignisse weisen mehr Regen und eine größere Intensität auf. Dies liegt daran, dass der Sättigungsdampfdruck und damit der potentielle Niederschlag generell um ca. 7% je Grad Temperaturzunahme ansteigt, die sogenannte Clausius-Clapeyron-Rate (Roderick et al., 2014). Bei Starkregen kommt es durch die größere Energiefreisetzung bei der Kondensation zudem zu einer Intensivierung der Wolkendynamik (Loriaux et al., 2013).

Die zunehmende Regenmenge und Regenintensität wirkt sich auf die Regenerosivität aus, also der Fähigkeit eines Regens, Bodenerosion zu verursachen (Abb. 2).

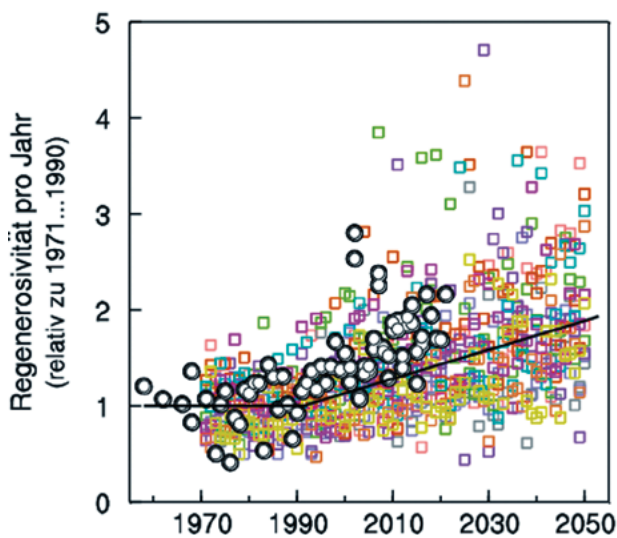


Abb. 2: Veränderung der Regenerosivität relativ zum Mittelwert der Jahre 1971 bis 1990 auf Grund von Messwerten (Deutschland, weiße Kreise) und berechnet aus einem Ensemble von 10 Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienstes für Bayern und dem Projektionspfad RCP 8.5 (aus Auerswald et al., 2019 b).

Projektionen (für RCP 8.5 „Business as Usual“) zeigen, dass sich die Regenerosivität bis 2050 gegenüber dem Zeitraum 1971 bis 1990 verdoppeln wird (Auerswald et al., 2019 b). Die Messwerte zeigen sogar einen etwas stärkeren Anstieg. Eine Verdopplung ist jetzt schon gegenüber den 1960er-Jahren eingetreten (Auerswald et al. 2019 a; Abb. 2).

„Intensivere Regenereignisse – mehr Oberflächenabfluss“

Der CO₂-getriebene Klimawandel führt also unter unseren Klimaverhältnissen nur zu einer Intensivierung einzelner Regen. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Regen nicht mehr vollständig infiltrieren, sondern als Oberflächenabfluss abfließen und Bodenerosion verursachen. Erst der Oberflächenabfluss erzeugt sowohl Überflutungen als auch die nachfolgende Dürre, da das abgeflossene Wasser dann nicht mehr zur Verfügung steht (Abb. 3, linke Tafel, zeigt den schematischen Zusammenhang). Dabei kann sich dann die Dürre selbst verstärken, weil es durch den Rückgang der Verdunstung immer heißer wird („event self-intensification“; Miralles et al., 2019), und schließlich auf andere, vom Oberflächenabfluss gar nicht betroffene Gebiete übergreifen („event self-propagation“; Miralles et al., 2019).

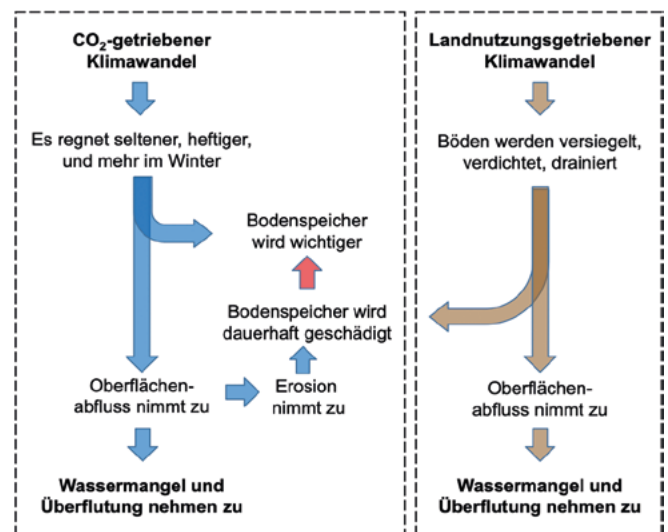


Abb. 3: Schematischer Einfluss von CO₂-getriebenem Klimawandel (linke Tafel) und landnutzungsgetriebenem Klimawandel (rechte Tafel) auf Überflutung und Wassermangel (eigene Abbildung)

Die CO₂-getriebene Temperaturzunahme selbst ist dagegen für die Dürre nicht verantwortlich, da die Evapotranspiration nur um 2–3% je Grad Celsius zunimmt (Roderick et al., 2014). Eine Temperaturzunahme von 2°C führt daher gerademal zu 5% mehr

Verdunstung – weit mehr als der Niederschlagsüberschuss selbst in den trockensten Gebieten Bayerns ist.

Funktionsfähige Böden sind notwendig

Der CO₂-getriebene Klimawandel macht daher gut funktionsfähige Böden notwendig, die Winterfeuchte bis in den Sommer speichern und die eine hohe Infiltrationskapazität haben, um die stärkeren Regen aufzunehmen, ohne Oberflächenabfluss zu erzeugen. Der Oberflächenabfluss würde nicht nur zu Hochwasser und Dürre führen, sondern auch Bodenerosion auslösen und damit die Speicherkapazität der Böden dauerhaft schädigen, die gerade in Zeiten des Klimawandels als Puffer benötigt werden.

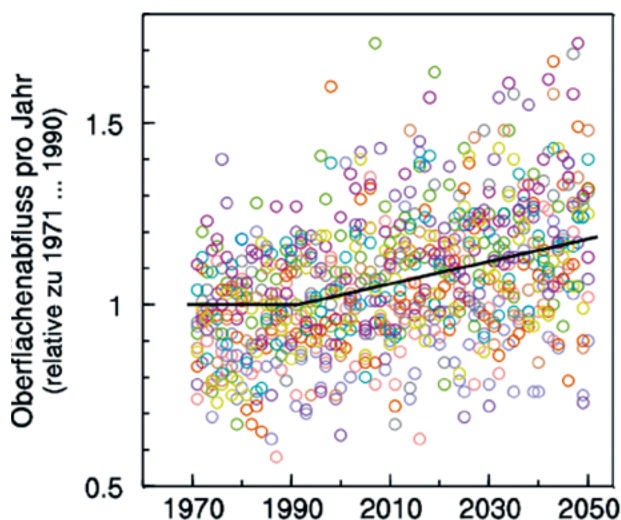


Abb. 4: Erwarteter Oberflächenabfluss in Bayern relativ zum Mittelwert der Jahre 1971 bis 1990 für 10 Klimaprojektionen und den Pfad RCP 8.5 (identische Klimaprojektionen wie Abb. 2; Berechnung mit dem SCS-Curve-Number-Modell, parametrisiert nach Seibert und Auerswald, 2020)

Modelliert man den Oberflächenabfluss für die gleichen Klimaprojektionen, die eine Verdopplung der Jahres-Regenerosivität erwarten lassen, so zeigt sich ein zu erwartender Anstieg des jährlichen Oberflächenabflusses bis 2050 von unter 20 % (Abb. 4). Gegenwärtig sind die Effekte nur etwa halb so groß. Der CO₂-getriebene Klimawandel liefert daher keine

ausreichende Erklärung, warum es heute verbreitet zu Hochwasser und Trockenheit kommt. Offensichtlich ist die Erklärung durch den CO₂-getriebenen Klimawandel unzureichend.

3. LANDNUTZUNGSWANDEL-GETRIEBENER KLIMAWANDEL

Seit den letzten 200 Jahren und besonders seit dem 2. Weltkrieg kam es zu einem sehr starken Landnutzungswandel. Viele Böden wurden versiegelt, verdichtet und drainiert. Versiegelung, Verdichtung und Drainage führen ebenfalls zu einem raschen Wasserabfluss aus der Landschaft und damit zu Hochwasser, Trockenheit und Hitzewellen (Abb. 3, rechte Tafel). Sie haben gegenwärtig, wie im Folgenden gezeigt werden wird, einen viel größeren Anteil an diesen Phänomenen als der CO₂-getriebene Klimawandel. Sie beeinträchtigen gleichzeitig die Aufnahme- und Speicherkapazität der Böden massiv, die gerade in Zeiten des Klimawandels besonders benötigt würden.

Generell führt der CO₂-getriebene Klimawandel, bei dem die Temperaturerhöhung durch eine verminderte Wärmestrahlung bedingt ist, zu einer leicht erhöhten Verdunstung. Damit nimmt auch der Niederschlag leicht zu, da die Wasserbilanz der Atmosphäre global betrachtet ausgeglichen sein muss.

Der landnutzungsgetriebene Klimawandel wirkt dagegen anders. Hier ist die Ursache nicht eine Veränderung der Wärmestrahlung, sondern eine eingeschränkte Verdunstung durch undurchlässige Oberflächen und durch rasche Wasserableitung. Durch die verminderte Verdunstung, d. h. die verminderte Umwandlung der Strahlungsenergie in latente Wärme, wird die Strahlungsenergie in fühlbare Wärme umgesetzt. Es wird trocken und heiß. Die Kombination von Hitzewelle und Trockenheit entsteht immer durch eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit, häufig ausgelöst durch anthropogene Einflüsse, während die Kombination von hoher Temperatur und hohem Niederschlag, wie sie z. B. in dem Vergleich der kalten und niederschlagsarmen Monate Januar und Februar

mit den warmen und niederschlagsreichen Monaten Juli und August deutlich wird, meteorologischen Ursprungs ist.

Ein landnutzungsbedingter Niederschlagsverlust ist größer als ein klimabedingter

3.1 BODENVERSIEGELUNG

In Bayern ist im Schnitt jeder Einwohner für 270 m² versiegelten Bodens verantwortlich (Esch et al., 2007). Dies entspricht 5 % der Landesfläche, was zunächst nicht viel erscheint. Geht man vom mittleren jährlichen Niederschlag aus (Tab. 1), so bedeutet das aber, dass im Mittel von ganz Bayern 40 mm/a Niederschlag fehlen, da das Wasser versiegelter Flächen rasch abgeleitet wird. Allein dieser landnutzungsbedingte Niederschlagsverlust (ca. 5 % des Jahresniederschlags) ist bereits wesentlich größer als die durch den CO₂ getriebenen Klimawandel zu erwartende Änderung des Niederschlags (Abb. 1).

Versiegelte Flächen verringern die Verdunstung und führen zum Temperaturanstieg in der Umgebung

Da versiegelte Flächen praktisch nichts verdunsten, fehlen auch 5 % der Verdunstung oder 25 mm/a (Tab. 1). Die Energie, die benötigt wird, um 1 mm zu verdunsten, reicht um 200 m Luftsäule über dem Boden um ca. 10°C zu erwärmen. Wenn 25 mm/a fehlen, müsste rechnerisch eine 200 m hohe Luftsäule über ganz Bayern um 250°C erwärmt werden. Dass dies nicht passiert, liegt daran, dass die umgebenden Flächen durch den Temperaturanstieg mehr verdunsten. Dieser Effekt wird in der Bewässerungswirtschaft als Oaseneffekt bezeichnet (Allen et al., 2000). Die land- und forstwirtschaftlichen Flächen müssen also 25 mm/a mehr verdunsten als ohne versiegelte Flächen und ohne dass dies ausgeglichen würde.

Wasserhaushaltskomponente	Niederschlag (N)	Landverdunstung (ET)	Abfluss (A)
Menge (mm/a)	825	485	340
Anteil am Niederschlag (%)	100	59	-25
Veränderung durch 5 % Versiegelung (mm/a)	-40	-25	-15

Tab. 1: Mittlerer Niederschlag in Deutschland und Anteil der Landverdunstung und des Gesamtabflusses; in Klammern stehen die entsprechenden Variablen der Wasserbilanz; der Abfluss entspricht im Idealfall der Grundwasserneubildung. Die rechte Spalte zeigt die Verminderung des verfügbaren Niederschlags, der Verdunstung und der Grundwasserneubildung, wenn 5 % der Fläche versiegelt sind und dort das Wasser rasch abgeleitet wird, ohne für den Wasserhaushalt wirksam zu werden.

Die Böden mit dem schlechtesten Wasserspeichervermögen werden diese zusätzliche Verdunstung besonders in relativ niederschlagsarmen Jahren nicht leisten können. Dort werden die Pflanzen dann auch ihre Verdunstung einschränken, wodurch es auch dort zu einem Temperaturanstieg kommt und die verbleibende Fläche noch mehr kompensieren muss. Dadurch wächst die Fläche, die Wassermangel zeigt, rasch an und kann sich im Grunde über den ganzen Kontinent ausbreiten (*effect self-propagation*). Zusätzlich wird es immer wärmer und der Effekt immer stärker (*effect self-intensification*). Eine Hitze- und Dürre kann sich aufbauen, nur weil keine Maßnahmen ergriffen worden sind, um die negativen Effekte der Versiegelung zu kompensieren.

Auch in naturnahen Systemen gibt es Flächen, die Abfluss produzieren. Normalerweise gibt es aber auch in jeder Landschaft Feuchtflächen in Senken, die den Abfluss sammeln und dadurch über lange Zeit kompensieren können, dass einzelne Flächen nicht oder wenig zur

Verdunstung beitragen. Diese Feuchtflächen wurden aber systematisch beseitigt (siehe Drainage) und für

die versiegelten Flächen keine neuen Feuchtfächen geschaffen.

„Versiegelte Flächen – sinkende Wasserstände“

Die versiegelten Flächen können auch praktisch kein Sickerwasser bilden, das das Grundwasser speist. Damit fehlen 15 mm/a Grundwasserneubildung (Tab. 1). Da die Nachbarflächen aber 25 mm/a mehr verdunsten müssen, fehlen am Ende bis zu 40 mm/a Grundwasserneubildung. Obwohl nur 5 % Bayerns versiegelt sind, vermindert sich dadurch die Grundwasserneubildung um bis zu 13 %. Dies erklärt, warum immer mehr Aquifere sinkende Wasserstände aufweisen. Im Zeitraum 2000 bis 2021 sanken bei 20 % aller beobachteten 1600 Grundwasserpegel in Bayern die Wasserstände stark und bei weiteren 20 % leicht (Bayer et al., 2022).

3.2 DRAINAGE

Der Landschaftswasserhaushalt (Abb. 5) wird häufig als eine Kopplung von vertikalen Flüssen angesehen (Niederschlag, Versickerung, Grundwasserneubildung, Verdunstung). Die vielen horizontalen Flüsse sind dagegen nicht bekannt oder werden für

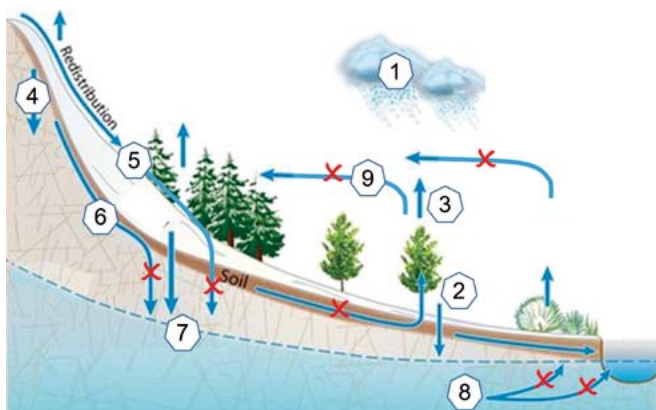


Abb. 5: Schematische Darstellung des Landschaftswasserhaushalts (nach Carroll et al., 2019, verändert); mit rotem Kreuz sind die Wasserflüsse gekennzeichnet, die durch die moderne Landnutzung stark eingeschränkt wurden (1 Niederschlag, 2 Infiltration, 3 Evapotranspiration, 4 Versickerung, 5 Oberflächenabfluss, 6 Zwischenabfluss, 7 Grundwasserneubildung, 8 Grundwasserabfluss, 9 Luftfeuchtetransport).

unwichtig gehalten (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Grundwasserabfluss, Luftfeuchtetransport). Dabei sind die horizontalen Flüsse wichtig für den Ausgleich in der Landschaft (Arnault et al., 2021). Der Oberflächenabfluss versickert auf seinem Weg durch die Landschaft und speist wesentlich das Grundwasser. Der Zwischenabfluss („Hangzugswasser“) fließt langsam hangparallel und versorgt die Unterhänge lange mit Feuchtigkeit, auch in Zeiten, wenn es nicht regnet. Die Unterhänge verdunsten daher auch in Trockenzeiten viel, erhöhen die Luftfeuchtigkeit und mildern dadurch den Trockenstress der Oberhänge. Der Grundwasserabfluss speist Auen und Gewässer. Auch diese erhöhen die Luftfeuchtigkeit und wirken ausgleichend.

Diese puffernd wirkenden, für ein ausgeglichenes Klima unerlässlichen, horizontalen Flüsse wurden weitgehend eliminiert. Dies hat wohl mit der Unkenntnis ihrer Existenz zu tun, aber auch mit Besitzgrenzen, die scharfe Linien in der Landschaft darstellen, über die nach Möglichkeit keine Stoff- und Wassertransporte aufs Nachbargrundstück erfolgen sollen. So wurde beispielsweise mit den Weg- und Straßengräben ein dichtes Drainagenetz geschaffen, das den Oberflächenabfluss bereits nach wenigen hundert Metern, oft noch weniger, aufnimmt und ableitet (Beispiele siehe Seibert und Auerswald, 2020). Dadurch unterbleibt die „Run-on-Infiltration“, denn normalerweise würde der größte Anteil des Oberflächenabflusses irgendwann auf benachbarte Flächen mit besserer Infiltrationskapazität gelangen und dort versickern, denn schließlich wechseln die die Flächen, die gerade viel Abfluss liefern, meist im Jahresverlauf (z. B. ist die in dieser Hinsicht problematische Saatbettphase bei verschiedenen Kulturen zeitlich verschoben (Fiener et al., 2011)).

Durch die Ableitung in Wegseitengräben fehlt der Oberflächenabfluss für die Grundwasserneubildung. Dies kann 50 bis 100 mm/a ausmachen (Seibert und Auerswald, 2020). Gleichzeitig wird der Oberflächenabfluss mit etwa 20-fach erhöhter Geschwindigkeit

ge-genüber dem breitflächigen Fließen auf dem Feld sehr effizient in den Gräben zur nächsten Ortschaft, die immer am Ende der Straßen liegt, geleitet und kann dort Überschwemmungen auslösen (typische Fließgeschwindigkeit bei flächenhaftem Fließen 0,1 m/s, beim Fließen in Wegseitengräben 2 m/s; vgl. Seibert und Auerswald, 2020). Der Hochwasserscheitel steigt bei gegebener Abflussmenge linear mit der Fließgeschwindigkeit an. Nicht die Tatsache, dass Oberflächenabfluss entsteht, ist daher das größte Problem, da Oberflächenabfluss auch in natürlichen Systemen entsteht und sich nie ganz vermeiden lässt. Das Problem wurde erst groß durch das effiziente System von Gräben und Verrohrungen, die beschleunigen, und durch die Homogenisierung der Landschaften, die Run-on-Infiltration verhindert.

Zur Ableitung des Oberflächenabflusses kommt auch noch die Ableitung des Zwischenabflusses durch Drainagen. Selbst in den trockensten Gebieten Bayerns finden sich, staatlich gefördert und damit teilweise gut dokumentiert, umfassende Drainagen (Abb. 6). Es ist kaum vorstellbar, wie unter solchen großflächigen Drainagen eine Grundwasserneubildung überhaupt erfolgen kann.

Die Drainagen beschränken sich nicht auf landwirtschaftliche Böden. Auch Wälder wurden umfangreich drainiert. Diese Projekte liegen z.T. über 100 Jahre zurück und sind heute oft vergessen. Die Drainagen wirken aber bis heute (Tempel, 2006). In den vergangenen Jahrzehnten kam hinzu, dass umfangreich Lkw-befahrte Forstwege gebaut wurden. Diese durften eine nur geringe Steigung aufweisen. Sie wurden daher in reliefiertem Gelände nahezu höhenlinienparallel angelegt und schneiden sich tief in die Hänge ein. Dadurch wird der Zwischenabfluss, der bei Wäldern wegen des stark horizontalen Bodenaufbaus eine besonders wichtige Komponente darstellt (Hümann, 2012), effektiv aufgefangen und wiederum über die Wegseitengräben abgeleitet. Es sind Fälle bekannt, in denen Hänge alle hundert Meter von einer Forststraße angeschnitten sind. Die Dichte der

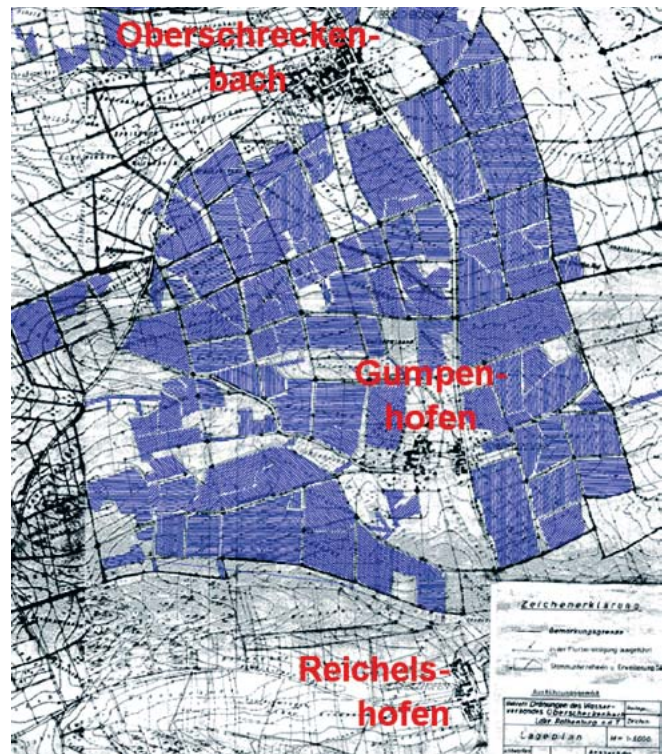


Abb. 6: Drainageplan des Wasserverbandes Oberschreckbach für die Ortschaft Gumpenhofen bei Rothenburg ob der Tauber, Landkreis Ansbach, Mittelfranken; mittlerer Jahresniederschlag ca. 640 mm/a; die Lage der Drainageleitungen wurde in blau nachgezeichnet (eigene Darstellung basierend auf einer historischen Planungskarte).

Fahrwege im Forst beträgt in Deutschland im Schnitt ca. 45 m/ha (BMEL, 2021). Im Mittel ist daher ein Zwischenabfluss nur noch über maximal 200 m möglich ist. Dann folgt die nächste Forststraße mit Wegseitengräben.

3.3 BODENVERDICHTUNG

Die Maschinengewichte haben in Land- und Forstwirtschaft seit dem Ende des 2. Weltkriegs enorm zugenommen. Beispielsweise hat die Radlast der zu dem jeweiligen Zeitpunkt aktuellen Mähdeschermobile zwischen 1960 und 2000 von unter 2 t auf über 7 t zugenommen (Keller et al., 2019) und steigt weiter an. Der Anstieg ist praktisch linear und bis heute ungebremst. An der Oberfläche wurden die höheren Lasten zwar kompensiert, indem die Reifen vergrößert wurden, so dass der Kontaktflächendruck kaum zugenommen hat. Für die Unterbodenverdichtung spielt der Kontaktflächendruck aber eine unterge-

ordnete Rolle. Die Unterbodenverdichtung hängt im Wesentlichen von der Radlast ab. Als Faustzahl gilt, dass sich eine Unterbodenverdichtung nicht vermeiden lässt, wenn die Last pro Rad 3 bis 5 t übersteigt (Håkansson & Reeder, 1994, Schjøning et al., 2012). Solche Radlasten sind bei den wichtigsten landwirtschaftlichen Maschinen wie dem Mähdrescher seit den 1990er-Jahren gegeben. Der rasante Anstieg der Erträge aller Kulturpflanzen, die sich zwischen 1880 und 1980 verfünffacht haben (Mahlerwein 2016), endete abrupt um 1990. Über inzwischen mehr als 30 Jahre stiegen die Erträge nicht mehr (de.statista.com, www.bmel.de/www-genesis.destatis.de), obwohl z. B. in der Pflanzenzüchtung enorme Fortschritte im Ertragspotential gemacht wurden (Guarin et al., 2022).

**Bodenverdichtung →
eingeschränktes Wurzelwachstum →
trockene Oberböden**

Dass das Ertragspotential nicht abgerufen werden kann, liegt wesentlich daran, dass das Wurzelwachstum bereits durch eine leichte Bodenverdichtung stark verzögert wird. Modellierungen an Hand von gemessenen Bodendichten zeigen, dass es Mitte des 20. Jahrhunderts nur zwei bis drei Wochen dauerte, bis die Wurzeln 50 cm Tiefe erreichten und dort die Wasservorräte nutzen konnten. Insbesondere seit den 1980er-Jahren kam es durch die Unterbodenverdichtung zu einer schnell zunehmenden Verzögerung des Wurzelwachstums. Heute dauert es zwei bis drei Monate, bis die Kulturpflanzen 50 cm Tiefe erreichen (Keller et al. 2019). Die Pflanzen sind daher gezwungen, ihren Wasserbedarf aus dem Oberboden zu decken. Die Oberböden trocknen dadurch stark aus und es entsteht der Eindruck einer Dürre. Der Dürre liegen aber physiologische und nicht klimatische Mechanismen zugrunde, auch wenn es durch den physiologisch induzierten Wassermangel zu einer starken Erwärmung kommt (self-intensification), aus der man einen Klimaeinfluss folgern könnte.

3.4 HECKEN

Es ist lange bekannt, dass Hecken den Ertrag steigern (z. B. Wendt, 1951). Dies wurde und wird auch immer wieder bestätigt. Wichtigster Mechanismus ist, dass die bodennahe Windgeschwindigkeit gebremst und damit die Verdunstung vermindert wird. Berechnungen für Brandenburg zeigen, dass über eine Distanz, die dem 25-fachen der Heckenhöhe entspricht, die Verdunstung pro Jahr um fast 100 mm/a vermindert wird (Funk et al., 2022). Ein Niederschlagsdefizit lässt sich daher durch eine Hecke ausgleichen. Weitere Effekte kommen hinzu, weil durch die verminderte Windgeschwindigkeit der Tagesgang der Temperatur ausgeprägter ist. Nachts wird es kälter, wodurch die Taubildung zunimmt und der Assimilatverbrauch durch Respiration bei den Pflanzen abnimmt. Tags wird es wärmer, wodurch die Assimilationsleistung steigt.

Trotz dieser ertragssteigernden Effekte wurden Hecken weitgehend beseitigt. Vermutlich wurde der durch die Hecke ausgelöste Ertragsanstieg, der etwa beim 5fachen der Heckenhöhe sein Maximum hat, als Ertragsdepression mit zunehmender Nähe zur Hecke interpretiert.

**Ein Niederschlagsdefizit ließe sich
durch Hecken ausgleichen**

4. ABHILFE

Die Landnutzung greift an so vielen Stellen massiv in den Wasser- und Energiehaushalt ein, dass es zumindest in unserem Klimaraum möglich sein müsste, die negativen Effekte des CO₂-getriebenen Klimawandels abzufedern. Mindestens sollten aber die negativen Effekte der Landnutzung kompensiert werden.

Da Versiegelung den weitaus massivsten Eingriff darstellt, ist hier Handeln am wichtigsten. Möglichkeiten gibt es zuhauf. Sie reichen von Entsiegelung (z. B. von Parkplätzen), dem massiven Ausbau der Photovoltaik, um Energie als Strom abzuführen und nicht

in Verdunstung oder Erwärmung umzusetzen, bis zur Begrünung (Gründächer, Alleen). Da technische Maßnahmen die vielfältigen Funktionen von Böden nicht nachbilden können, werden meist Kombinationen von Maßnahmen notwendig sein (z. B. gleichzeitig Entsiegelung, Begrünung und Photovoltaik bei Parkplätzen; gleichzeitig Dachbegrünung und Photovoltaik).

Die Landschaft braucht wieder mehr Hecken oder Heckenähnliches. Solarzäune, Agroforestry und Alleen können zumindest die Funktion, den bodennahen Wind zu bremsen, ebenfalls erfüllen. Da die Forderung nach Entsiegelung insbesondere bei überörtlichen Straßen kaum umsetzbar ist, sollten Straßen grundsätzlich mit begleitenden Hecken oder Baumreihen ausgestattet sein, um ihre klimaschädlichen Effekte zu lindern. Diese Erkenntnis hatte schon Napoleon Bonaparte (Balmer, 2022).

In der Landwirtschaft stehen zwei Forderungen im Vordergrund, die Verringerung der Lasten und die Verbesserung der Bodenbedeckung durch lebende oder abgestorbene Pflanzen. Für beide Forderungen gibt es eine Vielzahl an ökonomisch vorteilhaften Lösungen (z. B. Auerswald et al., 2000). Das größte Hindernis ihrer Umsetzung ist das Fehlen einer industriunabhängigen Beratung (Schnyder et al., 2020).

Beregnung sollte dagegen keine Option sein, weil sie mehr Schaden anrichtet als sie nützt. Sie erhöht grundsätzlich den Wasserverbrauch und verschärft dadurch den Wassermangel, und sie hilft nicht gegen Überflutung. Einzige Ausnahme sollte daher sein, wenn Oberflächenabfluss, der sich nicht versickern lässt, z. B. von versiegelten Flächen, zwischengespeichert und in Trockenphasen zur Bewässerung genutzt wird.

Die klimafreundliche Gestaltung aller Landnutzungen ist möglich, erfordert aber Veränderung an so vielen Stellen, dass dies durch staatliche Maßnahmen (Gesetze, Förderungen) unmöglich erreicht werden kann. Notwendig ist vielmehr ein Paradigmenwech-

sel. Das alte Paradigma der Ernährungssicherheit ist hinfällig, da es sich ohne Klimaresilienz nicht erreichen lässt. Es ist zweitrangig. Das alte Paradigma der ökonomischen Effizienz ist hinfällig, da Resilienz und Effizienz sich ausschließen.

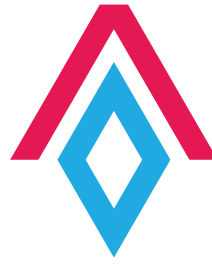
Prof. Dr. Karl Auerswald,

School of Life Sciences, Technische Universität München

Quellen

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109
- Arnault, J.; Fersch, B.; Rummler, T.; Zhang, Z.; Quenum, G.M.; Wei, J.; Graf, M.; Laux, P.; Kunstmann, H. (2021): Lateral terrestrial water flow contribution to summer precipitation at continental scale – A comparison between Europe and West Africa with WRF-Hydro-tag ensembles. *Hydrological Processes* 35, e14183. <https://doi.org/10.1002/hyp.14183>
- Auerswald, K.; Albrecht, H.; Kainz, M.; Pfadenhauer, J. (2000): Principles of sustainable landuse systems developed and evaluated by the Munich Research Alliance on Agroecosystems (FAM). *Petermanns Geographische Mitteilungen* 144, p. 16-25
- Auerswald, K.; Fischer, F.; Winterrath, T.; Elhaus, D.; Maier, H.; Brandhuber, R. (2019 a): Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In: Bachmann G.; König W.; Utermann J. (Hrsg.): *Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser* (Loseblattsammlung), Berlin
- Auerswald K.; Fischer F.; Winterrath T. (2019 b): R-Faktor – Regenerosivität. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): *Pilotstudie „Klimawirkungskarten Bayern“*. *UmweltSpezial*, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, S. 61-69.
- Balmer, G. (2022): Baumreihen mit vielen Funktionen. <https://blog.nationalmuseum.ch/2022/07/alleen/>
- Bayer, C.; Harlan, E.; Gennutt, H. (2022): Sinkendes Grundwasser vielerorts in Bayern. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/sinkendes-grundwasser-vielerorts-in-bayern,TLTE2Xr> (Aufruf: 30.07.2023)
- BayStMUV (2021): *Klima-Report Bayern 2021*. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, <https://www.stmuv.bayern.de/themen/klimaschutz/klimareport/> (Aufruf: 27.07.2023)
- BMEL (2021): *Waldbericht der Bundesregierung 2021*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldbericht2021.pdf> (Aufruf: 30.07.2023)
- Carroll, R.W.H.; Deems, J.S.; Niswonger, R.; Schumer, R.; Williams, K.H. (2019): The importance of interflow to groundwater recharge in a snowmelt-dominated headwater basin. In: *Geophysical Research Letters* 46, p. 5899– 5908. <https://doi.org/10.1029/2019GL082447>
- Davin, E.L.; Seneviratne, S.I.; Ciais, P.; Wang, T. (2014): Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, p. 9757–9761, <https://doi.org/10.1073/pnas.1317323111>
- Fiener, P.; Auerswald, K.; Van Oost, K. (2011): Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments - a review. In: *Earth Science Reviews* 106, p. 92-104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004>
- Funk, R.; Völker, L.; Kestel, F.; Veste, M.; Hahn, T. (2022): Der Einfluss von Hecken auf Wind und Mikroklima. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25302.93769>, (Aufruf: 30.07.2023)
- Guarin, J.R. et al. (2022): Evidence for increasing global wheat yield potential. In: *Environmental Research Letters* 17, 124045
- Håkansson, I. & Reeder, R.C. (1994): Subsoil compaction by vehicles with high axle load—Extent, persistence and crop response. In: *Soil & Tillage Research* 29, p. 277–304.
- Hümman, M. (2012): *Abflussgeschehen unter Wald – Validierung und Weiterentwicklung eines GIS-basierten Tools zur Erstellung von Abflussprozesskarten auf forstlich genutzten Standorten*. Diss. Universität Trier
- Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R.; Or, D. (2019): Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. In: *Soil & Tillage Research* 194, 10429
- Loriaux, J.M.; Lenderink, G.; De Roode, S.R.; Siebesma, A.P. (2013): Understanding convective extreme precipitation scaling using observations and an entraining plume model. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 70, p. 3641–3655, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0317.1>
- Mahlerwein, G. (2016): *Die Moderne 1880-2010. Grundzüge der Agrargeschichte, Band 3*, Köln
- Miralles, D.G.; Gentile, P.; Seneviratne, S.I.; Teuling, A.J. (2019): Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. In: *Annals of the New York Academy of Science* 1436, p. 19–35, <https://doi.org/10.1111/nyas.13912>

- Roderick, M.L.; Sun, F.; Lim, W.H.; Farquhar, G.D. (2014): A general framework for understanding the response of the water cycle to global warming over land and ocean. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 18, p. 1575–1589
- Schjøning, P.; Lamandé, M.; Keller, T.; Pedersen, J.; Stettler, M. (2012): Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. In: *Soil Use & Management* 28, p. 378–393
- Schnyder, H.; Auerswald, K.; Geist, J.; Heissenhuber, A. (2019): Farmers need independent and holistic advice. In: *Nature* 571, p. 326, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-019-02165-8>
- Seibert, S. & Auerswald, K. (2020): Hochwasserminderung im ländlichen Raum – Ein Handbuch zur quantitativen Planung. Springer Verlag, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>
- Tempel, M. (2006): Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete am Beispiel des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches im Soonwald/Hunsrück. Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
- Wendt, H. (1951): Der Einfluß der Hecken auf den landwirtschaftlichen Ertrag. In: *Erdkunde* 5, S. 115-125



BAYERISCHE AKADEMIE
LÄNDLICHER RAUM

WASSERGERECHTIGKEIT FÜR **STADT** UND **LAND!**

Silke Franke / Holger Magel (Hrsg.)

ISBN 978-3-931863-72-7

Herausgeber:

Bayerische Akademie Ländlicher Raum e.V.

(Präsident: Prof. Dr. Manfred Miosga)

c/o Bayerische Akademie Ländlicher Raum

Infanteriestraße 1

80797 München

www.akademie-bayern.de

Schriftleitung und Redaktion:

Silke Franke

Geschäftsführerin der Bayerischen Akademie Ländlicher Raum

Gestaltung und Satz:

Maya Franke Grafik & Illustration

Druck:

Xx

Genderhinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich, divers verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Namentlich gekennzeichnete Beiträge fallen unter die Verantwortlichkeit des Autors.

München, April 2024

GELEITWORT

- ↘ **WASSERGERECHTIGKEIT IST EIN GEBOT DER RÄUMLICHEN GERECHTIGKEIT UND GLEICHWERTIGER LEBENSBEDINGUNGEN!** 7
 Holger Magel

EINFÜHRUNG

- ↘ **VON WASSERETHIK ÜBER DIE FLUREN UND SIEDLUNGEN ZUM GRUNDWASSERSCHUTZ** 11
 Silke Franke

FACHBEITRÄGE

- ↘ **WASSERETHIK. NORMATIVE KRITERIEN UND PERSPEKTIVEN FÜR DIE ZUKUNFT** 17
 Martin Schneider

- ↘ **WASSERWIRTSCHAFT IM ANTHROPOZÄN** 29
 Martin Grambow, Bernhard Simon

- ↘ **HOCHWASSER UND DÜRRE – DIE ROLLE VON LANDSCHAFTSWASSERHAUSHALT UND BODEN IM KLIMAWANDEL** 37
 Karl Auerswald

- ↘ **„FLURBERAUHUNG“ – DIE AGRARSTRUKTURELLE AUFGABE IM 21. JAHRHUNDERT** 49
 Norbert Bäuml

- ↘ **SCHWAMMSIEDLUNGEN – NÖTIG WEGEN KLIMAWANDEL, GUT FÜR DIE GERECHTIGKEIT?** 53
 Andreas Rimböck

- ↘ **GRÜNE STADT DER ZUKUNFT: ANPASSUNGSSTRATEGIEN AN DEN KLIMAWANDEL – URBANE RESILIENZ** 59
 Stephan Pauleit, Simone Linke und Sandra Feder

- ↘ **WASSEREFFIZIENZ – NUTZWASSER ALS ALTERNATIVE WASSERRESSOURCE** 71
 Jörg E. Drewes

- ↘ **WASSER HABEN ODER WASSER BEKOMMEN? EIN FAIRER UMGANG MIT WASSER BEGINNT IN DER LANDSCHAFT** 75
 Gunnar Braun

- ↘ **DAS WASSERMANAGEMENT AUS SICHT DER BAYERISCHEN LANDWIRTSCHAFT – Ein Statement** 83
 Günther Felßner

- ↘ **GRUNDWASSERSCHUTZ – AUS SICHT EINER JURISTIN** 87
 Juliane Thimet

- ↘ **WASSER IST UNSER LEBEN – Ein Kommentar** 97
 Anja Weisgerber

RESÜMEE

- ↘ **WELCHE PUNKTE GEBEN UNS DIE AUTOREN MIT?** 101

IN EIGENER SACHE

Die Bayerische Akademie Ländlicher Raum 103

Das Sommerkolloquium 104