

«SCHWAMMLAND» – OHNE PUFFER KEINE ZUKUNFT

WIE DIE LANDSCHAFT ZUR SICHERUNG UNSERER LEBENSGRUNDLAGEN UMZUGESTALTEN IST

Schwammland-Projekte sind auf dem Vormarsch. Als notwendiges Gegenstück zur Schwammstadt zeigen sie auf, wie die Landschaft auf klimatische Extreme vorbereitet, der Wasserhaushalt mit naturbasierten Massnahmen gepuffert und zeitgleich die Biodiversität gestärkt werden kann. Dies kommt schlussendlich auch dem Menschen zugute: z. B. in Form erhöhter Trinkwasser- und Ernährungssicherheit, gesteigerter Landschaftsqualität und Wohlbefinden.

*Niels Werdenberg; Andreas Widmer, Emch+Berger AG Bern
Sabina Käppeli-Wyss, GIS-Kompetenzzentrum Stadt Bern
Christian Meier, Impuls AG Wald Landschaft Naturgefahren*

RÉSUMÉ

«TERRITOIRE ÉPONGE»: SANS TAMPON, PAS D'AVENIR

En Suisse, le changement climatique pose de plus en plus de problèmes, en particulier quant à la gestion des ressources d'eau. La nature, qui manque déjà fortement d'eau en raison de l'activité humaine, est en train de perdre d'importants réservoirs d'eau sous forme de neige et de glace, alors que l'alternance de périodes de sécheresse et de fortes précipitations remplace de plus en plus les pluies régulières qui arrosent la nature. Aussi bien cette dernière que la société sont ainsi menacées par des sécheresses, l'érosion des sols, des pertes de récoltes et des inondations catastrophiques. Sur le principe de la ville-éponge, nous devons à l'avenir, autant que faire se peut, retenir les précipitations dans la nature, retarder fortement les écoulements et stocker l'eau sur place, notamment dans le sol et dans les plantes (cycle de l'eau verte). Ainsi, il devient possible de mieux surmonter les périodes de sécheresse, de retenir les fortes précipitations, de ménager et de préserver la précieuse ressource qu'est le sol, et d'influencer positivement le climat local et régional par le biais de réactions de la végétation (transpiration et formation locale de nuages, soit le petit cycle de l'eau). Les surfaces nécessaires pour ce faire se trouvent dans la nature ou dans les écosystèmes agricoles, forestiers et aquatiques, dont la fonction naturelle d'éponge peut être rétablie assez facilement.

AUSGANGSLAGE

Die intensive Landnutzung, wie sie in der Schweiz praktiziert wird, hat Auswirkung auf den Wasserhaushalt, das Klima und die Artenvielfalt. So hat intensive Landnutzung die Entwässerung forciert, die natürliche Schwammwirkung der Landschaft (Resilienz) stark reduziert und zu einem massiven Verlust natürlicher Lebensräume und Arten geführt. Auch Klimaextreme werden durch intensive Landnutzung massgeblich mitverursacht und verstärkt. Die Folgen für bereits geschwächte Agrar-, Wald- und Gewässerökosysteme sind verheerend. Hinzu kommt das sich schliessende Zeitfenster für eine naturbasierte Klimaanpassung. Denn für die Umsetzung fehlen immer mehr die Schlüsselressourcen Boden, Wasser und Artenvielfalt.

FORCIERTE ENTWÄSSERUNG

Aufgrund intensiver Landnutzung und historischer Gewässerkorrekturen sind die Fliessgewässer heute stark verkürzt und eingetieft: Grössere Flüsse bürsteten nachweislich mehr als 10% ihrer Fliesslänge ein und wurden um durchschnittlich vier Meter abgetieft [1]. Ähnlich sieht es bei der Mehrheit der vielen Bäche und Kleingewässer aus [2]. Ein flächendeckend eingetieftes Gewässernetz führt einerseits zur permanenten

Kontakt: Andreas Widmer, andreas.widmer@emchberger.ch

TITELFOTO

Hof Süri Neuenegg, Kanton Bern, mit Schwammlandelementen.

(© L. Feigenwinter)

Grundwasserabsenkung, während die ausbleibenden Überflutungen zusätzlich die Grundwasserneubildung verringern. Dies stellt angesichts der Zunahme von Hitze- und Trockenextremen eine massive Gefährdung des Grundwassers dar. Andererseits konzentrieren eingetiefte Gerinne den Wasserabfluss, wodurch bei Hochwasser gegenüber flächigen Überflutungen das Zerstörungspotenzial für Unterlieger drastisch erhöht wird. Die Abflusskonzentration wiederum führt zu weiterer Sohlenerosionstendenz (selbstverstärkende Eintiefung). Zudem werden in eingetieften Gerinnen deutlich grössere Mengen des im Kulturland erodierten Bodens unwiederbringlich weggespült (Verlust der regionale Bodenfruchtbarkeit und Eutrophierung der nachfolgenden Gewässer bzw. des Meeres), was das Wasserrückhaltevermögen der Böden verringert und die Anfälligkeit für Dürren zusätzlich verschärft [3, 4]. Mit der historischen Trockenlegung natürlicher Gewässerlandschaften (Verlust der Feuchtgebiete um 90% seit 1900 [5]) gingen wertvolle Ökosystemleistungen wie Wasserspeicherung/-filterung und Klimaregulation verloren. Hinzu kommen künstliche Entwässerungssysteme in den Agrar- und Waldflächen, die wesentlich zu einer erhöhten Abfluss- und verringerten Grundwasserneubildung beitragen: Knapp 20% des Kulturlands bzw. 5% der Landesfläche werden künstlich entwässert [6]. Der Umfang forstlicher Entwässerungen ist nicht genau bekannt. Untersuchungen zeigen, dass im Zuge der Industrialisierung jeweils engmaschige Netze aus Entwässerungsgräben errichtet wurden, welche die Anlage standortfremder Fichtenforste begleiteten [7]. Der Umfang so drainierter Wälder dürfte jedoch geringer sein als derjenige des entwässerten Kulturlandes. Die meisten feuchten Waldflächen gingen mit den Gewässerkorrekturen verloren.

VERSCHÄRFUNG DER KLIMAEXTREME

Intensiv genutzte Landflächen verlieren ihre Kapazität für Klimaregulation und verschärfen damit die Klimaextreme: Gegenüber einem gesunden Boden und einer natürlich transpirierenden Dauer-

vegetation (grünes Wasser) erzeugen spärlich bedeckte oder kahle Böden bei Sonneneinstrahlung rund zehnmal mehr sensible Wärmestrahlung, zehnmal weniger Verdunstungskühlung und verhindern sogar die für Niederschläge und Reflexion nötige Wolkenbildung [8, 9]. Versiegelte Flächen, aber auch umgebrochene, abgeerntete Äcker, dürre Felder

und grössere Schlagflächen im Wald heizen die Umgebung aktiv auf – zusätzlich zur Wirkung von Treibhausgasen – und können einen regionalen Wärmestau erzeugen, wodurch das Vordringen feuchter Luft ineffektiv und die regelmässige Wolken- und Niederschlagsbildung über dem Land verhindert wird [9, 10] (Fig. 2). Und wenn es regnet, nehmen intensiv genutz-



Fig. 1 Kahle, ausgeräumte Landschaften heizen sich stark auf, wirken als Hitzeinseln und sind biodiversitätsfeindlich. Erhitzte und verdichtete Böden verschärfen Dürren und können kaum mehr versickern, wodurch die Bodenerosion bei Starkregen zu- und die Wasserverfügbarkeit stetig abnimmt.

(© Soilify.org)

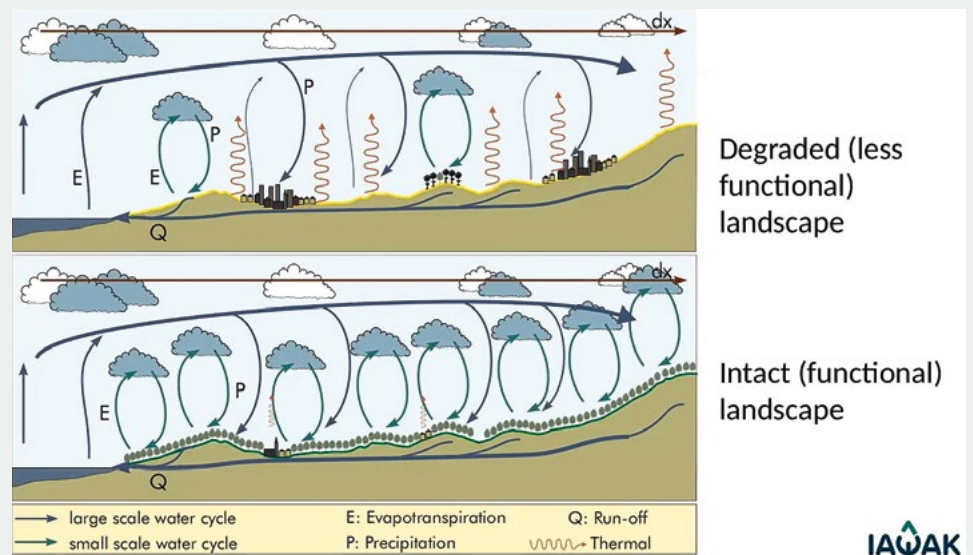
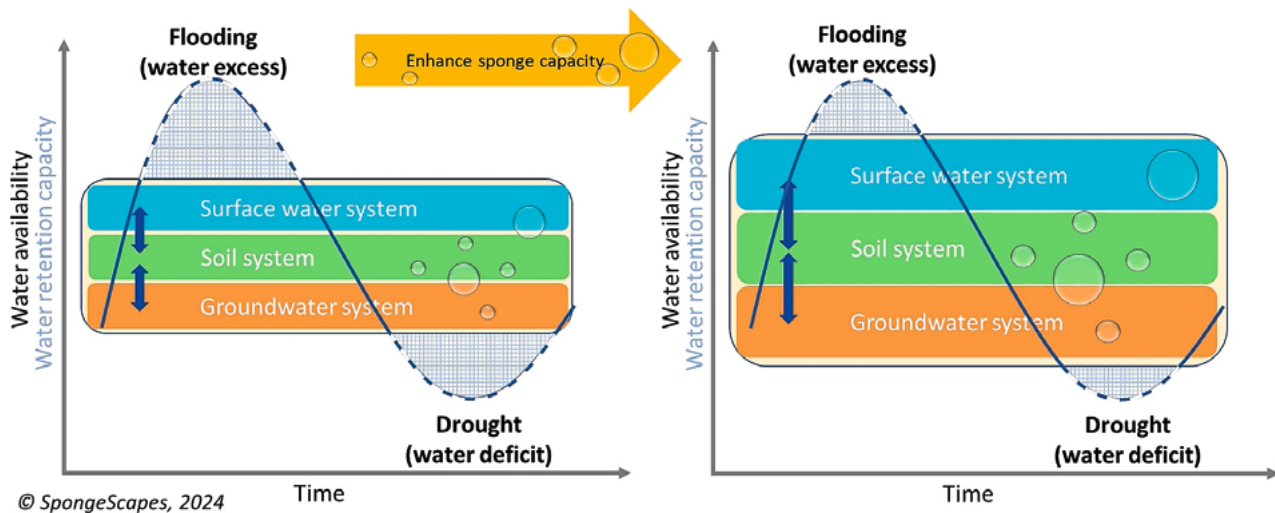


Fig. 2 Schema Klimarückkopplung von Landschaften [10]. Oben: Die intensiv genutzte, aufgeheizte Landschaft hat die kleinen Wasserkreisläufe (wichtig für regionales Niederschlagsrecycling) dezimiert, erhält dadurch seltener Niederschläge und verschärft den Flut-Dürre-Zyklus. Unten: Die naturnahe, evapotranspirierende Landschaft mit intakten kleinen Wasserkreisläufen erhält regelmässige Niederschläge, speichert diese und ist gegen Flut und Dürre gut gepuffert. Damit Klima und Landschaft feucht und gepuffert bleiben braucht es eine ausreichende vegetationsbasierte Verdunstung (Verdunstungsparadoxon).



© Spongescapes, 2024

Fig. 3 Schematische Schwammfunktion einer Landschaft. Die Segmente Oberflächenwasser, Boden und Grundwasser speichern Wasser. Sind die Speicher gering (links), pendelt die Landschaft zwischen Flut- und Dürrezyklus. Eine erhöhte Schwammkapazität (rechts) verringert diese Probleme.

(Grafik: Spongescapes.eu)

te Böden die Niederschläge zunehmend schlechter auf (reduzierte Versickerung durch Verdichtung, Erosion sowie austrocknungs- und hitzebedingte Hydrophobieeffekte [4, 8, 11]), wodurch das Wasserdefizit mit der Zeit immer grösser und Hitzewellen und Trockenextreme wesentlich verschärft werden. Aber auch extreme Starkniederschläge [12, 13] und deren Folgeschäden belasten die Landschaft (prognostizierte Zunahme der Bodenerosion um bis zu 60% durch klimawandelbedingten Oberflächenabfluss [14]). Europa ist einer der am intensivsten genutzten Kontinente der Erde, auf dem der grösste Flächenanteil (bis zu 80%) für Siedlungszwecke, Produktionssysteme (einschliesslich Agrar- und Forstwirtschaft) und Infrastruktur genutzt wird [15]. Die fehlende natürliche Evapotranspiration intensiv genutzter Flächen, wie auch deren künstliche Entwässerung verstärken die Aufheizung und Austrocknung der Landmassen und führen zum Rückgang des kontinentalen atmosphärischen Feuchtigkeitstransports [9]. Es überrascht daher nicht, dass Mitteleuropa den global stärksten Temperaturanstieg verzeichnet [16] und heute trockener ist als je in den letzten 400 Jahren [17]. Zudem mehren sich die Hinweise, dass es aufgrund des Rückgangs des natürlichen Feuchtigkeitstransports zu katastrophalen Entladungen von über dem Mittelmeer aufgestauter Feuchtigkeit kommt (je nach Wetterlage können Küstenzonen oder Ge-

biete in Mitteleuropa betroffen sein) [18]. Diese sich selbstverstärkenden Trends fördern Dürren, Waldbrände, Fluten und Bodenerosion und betreffen zunehmend auch das Wasserschloss Europas.

WENIG ZEIT FÜR NATURBASIERTE KLIMANPASSUNG

Biodiversität ist die Grundlage der Funktionstüchtigkeit von Ökosystemen: Die natürliche Schwammfunktion und die Fähigkeit zur Klimaregulation der Landschaft beruht auf komplexen, artenreichen Ökosystemen, wie z. B. alten Wäldern, Mooren und Sümpfen. Die Fruchtbarkeit der Böden oder auch deren Fähigkeit, Wasser zu versickern und zu filtern steht und fällt mit den sensiblen Bodenökosystemen. Bereits Verluste einzelner Arten oder Artgruppen können die Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen gegen Störungen stark herabsetzen oder diese gar kollabieren lassen. Aus ökosystemarer Sicht schafft Biodiversität eine funktionelle Redundanz, ein Sicherheitsnetz für Selbstregulation nach Extremereignissen, was die Verwundbarkeit des Systems reduziert [19-21]. Solange die für die essenziellen Ökosystemleistungen notwendigen Lebensräume und Schlüsselressourcen wie Böden, Wasser und Artenvielfalt noch vorhanden sind, können natürliche oder naturnahe Systeme zur Pufferung des Wasserhaushalts und zur Kohlenstoffspeicherung relativ einfach und kostengünstig wiederherge-

stellt oder gestärkt werden. Da intensive Landnutzung und Klimawandel aber die Schlüsselressourcen laufend verringern, kostet Tatenlosigkeit immer mehr Substanz bei natürlichen Lebensräumen, Arten, Boden und Grundwasser [22-24]. Damit nicht genug: Auch die Bedrohung durch nichtlineare Ereignisse (ökologische Kipp-Punkte oder katastrophale Extremereignis-Kombinationen (*compound extremes*)) steigt, welche die Schlüsselressourcen «über Nacht» drastisch verringern können [25-27].

WIEDERHERSTELLEN DER SCHWAMMFUNKTION

Schwammlandschaften bieten eine naturbasierte, synergetische Lösung, die Landschaft möglichst rasch auf die veränderten Bedingungen «vorzubereiten», indem die ausgleichende, schwammähnliche Wirkung (Fig. 3) von Wald-, Agrar- und Gewässerökosystemen gefördert bzw. wiederhergestellt und damit nachhaltige klimaresiliente Landschaften mit hohem Nutzen für Mensch und Natur geschaffen werden. Durch die Pufferung des Klimas (Stärkung der kleinen Wasserkreisläufe, effiziente Kohlenstoffspeicherung) und die naturnahe Verzögerung und Speicherung von Abflüssen können Schäden von Temperatur- und Wetterextremen für Natur, Landschaft und Siedlungen verringert (Klimaanpassung), die Widerstandsfähigkeit von Umwelt, Wirtschaft

und Gesellschaft gegenüber Extremereignissen verbessert (Resilienz), und die Artenvielfalt massgeblich gefördert werden (Redundanz) [8, 28].

Schwammland resp. Schwammland-schaft ist das landschaftliche Pendant zur bereits bekannten Schwammstadt. Ähnliche Konzepte oder Teilaspekte sind u. a. als Klimalandchaft, *Slow Water*, *Sponge-scape*, *Natural Water Retention Measures*, *Natural Flood Management*, *Hydrologie Régénérative* oder *New Water Paradigm* etabliert. Auch die Massnahmen zur Förderung und Wiederherstellung der natürlichen Schwammfunktion der Landschaft sind i.d.R. nicht neu – neu ist jedoch die hohe Dringlichkeit, sie umzusetzen.

Das 2023 von *Emch+Berger* veröffentlichte Konzept «Schwammland» [4], kurz SWL, befasst sich schwerpunktmässig mit der Schweiz. Dort wird aufgrund der Verringerung gefrorener Zwischen-

speicher (Schnee, Gletscher) ein relativ abrupter Übergang in die Abhängigkeit von künftig unregelmässig anfallenden Niederschlägen erwartet [23], während zeitgleich der Bewässerungsbedarf, insbesondere im Agrarsektor, stark steigen wird (Prognose: +40% ohne Klimamassnahmen [29]).

Um Niederschläge zurückzuhalten und zu nutzen, schlägt das SWL die (Re-)Etablierung effizienter naturbasierter Puffersysteme in der Landschaft vor. Diese speichern das Wasser dezentral, drosseln Hochwasser und Oberflächenabflüsse, dämpfen Hitzeextreme, fördern die regelmässige Beregnung und die Biodiversität, binden Kohlenstoff und stellen letztlich so unsere Ernährung sicher.

Im SWL-Massnahmenfächer [4] werden sieben Stossrichtungen identifiziert (Tab. 1). Der Fächer umfasst derzeit rund 80 mögliche Einzelmassnahmen für die

Sektoren Wald, Kulturland und Gewässernetz, die jeweils Nutzungsanpassungen, jedoch keine oder kaum Nutzungsverzichte erfordern. Je nach Art der Massnahme können einzelne oder mehrere Stossrichtungen gleichzeitig verfolgt werden (multifunktional). Geeignete Einzelmassnahmen und -kombinationen sind jeweils projektspezifisch zu evaluieren. Der Massnahmenfächer [4] wird zurzeit eingegliedert in die *Sustainable Land Management*-Dokumentation des WOCAT-Netzwerks (*World Overview of Conservation Approaches and Technologies*).

SCHWAMMLANDPOTENZIAL

Bereits einzelne SWL-Massnahmen können helfen, besser gegen Klimawandel gerüstet zu sein und den Rückgang der Artenvielfalt zu bremsen. Die beste Wirkung wird aber durch eine Integ-

Stossrichtungen	Sektoren	Beispiele Einzelmassnahmen
SR1 Verzögerung Abflüsse, dezentrale Speicherung Niederschläge, Erhöhung Bodenfeuchte, Versickerung, Infiltration und Grundwasserbildung	Wald Kulturland Gewässernetz	Rückbau Drainagen/-gräben, Belassen Totholz, Bodenschonende Bewirtschaftung/Erschliessung, angepasste Wegführung und Wegkoffer, Paradigmenwechsel bei Drainagen, Einsatz intelligenter Drainagen (steuerbare Abflüsse), konservierende/regenerative Bodenbearbeitung, Direktsaat statt Pflügen, Abflussverteilung in Hanglagen mit Keylines/Swales Hecken/Baumreihen, Anlage Mulden/Rigolen, Nutzung Senken als multi-funktionale Sickerbereiche/Retentions-teiche/Überflutungszonen (Kombi z.B. als extensive Weide, NFF), angepasste Wegführung und Wegkoffer, Zulassen/Flankieren Biberaktivität, Revitalisierung, Fliesswegverlängerung/Reaktivierung Mäander/verzweigtes Gerinne, Verzicht auf Hartverbau Ufer/Sohle und Einsatz IRT/Ingenieurbilogie, Bachoffenlegung, Anheben Gewässersohle, leaky dams (z.B. Totholz/Biberdämme/ BDA/rock weirs etc.), naturnahe Retentions-/Versickerungsanlagen, Förderung Pflanzenkläranlagen
SR2 Wiedervernässung ehem. Feuchtgebiete und Potenzialflächen	Wald Kulturland Gewässernetz	Reaktivierung Moor-/Feuchtwälder durch Rückbau/Einstau Drainagen/-gräben, Schaffung Vernässungs-/ Überflutungszonen, Anpassung Bewirtschaftung/Entschädigung für Nutzungsverzicht, Paradigmenwechsel bei Drainagen, Reaktivierung Feuchtwiesen/Moore, Anpassung Bewirtschaftung/Entschädigung für Nutzungsverzicht, Zulassen/Flankieren Biberaktivität, Gewässerrevitalisierung, Reaktivierung Auen, Anheben Gewässersohle, Fliesswegverlängerung/Reaktivierung Mäander/verzweigtes Gerinne, leaky dams
SR3 Verhinderung von Bodenerosion und Retention Erosionsmaterial	Wald Kulturland Gewässernetz	Vermeidung Kahlflächen, Belassen Totholz auch bei Problemflächen / Schädlingsbefall, hangparallele Wegführung, Wegführung auf Rücken, Einsatz Zwischenfrüchte und Untersaaten, Umstellung auf Dauergrünland, Anlage Hecken/Baumreihen/Agroforst für Windbrecher, Interzeption und Abflussverteilung, konservierende/regenerative Bodenbearbeitung, Direktsaat statt Pflügen, Mulchen, hangparallele Bearbeitung, Keylines, Wahl leichter Bewirtschaftungsgeräte, zusätzliche Bereifung bei schweren Geräten, Paradigmenwechsel bei Drainagen, hangparallele Wegführung, Wegführung auf Rücken, Schaffung Absetzzonen für abgeschwemmtes Bodenmaterial, leaky dams
SR4 Reduktion «unproduktive» Verdunstung (z.B. aus vegetationslosen Böden/ überhitzten Gewässern)	Wald Kulturland Gewässernetz	Bodenschonende Bewirtschaftung/Erschliessung, Vermeidung von Kahlflächen, Belassen Totholz auch bei Problemflächen / Schädlingsbefall, Naturverjüngung standorttyp. Arten, Untersaaten, Zwischensaaten, Kühlung/Beschattung Böden mit Gehölzen/Agroforst, Hecken und Baumreihen als Windbrecher, angepasste Bewässerungstechniken/-zeiten, Kühlung/Beschattung Gewässerkörper mit Gehölzgürtel, Lenkung Niederwasserrinne an beschattete Uferseite, leaky dams
SR5 Erhöhung Speicherfähigkeit für Wasser und CO2 in Böden	Wald Kulturland Gewässernetz	Bodenschonende Bewirtschaftung/Erschliessung, Vermeidung von Kahlflächen, Belassen Totholz und Ernterückstände, Kalken übersäuerter Waldböden, Moratorien für Holznutzung, Entschädigung für Nutzungsverzicht, Regenerative Bewirtschaftung, Rotationsbeweidung/mob grazing, Förderung Bodenleben/-struktur, Einsatz Terra Preta Kohle, Optimierung/Anreicherung Mikroorganismen, Mulchen, bodenaufbauende Zwischenfrüchte, Laubbäume/Agroforst, leaky dams
SR6 Stärkung pflanzenbasierter Effekte: u.a. Kühlung, Pufferung Lokalklima, Erhöhen Bodenfeuchte über Wurzeln	Wald Kulturland Gewässernetz	Erhalt naturnaher Wälder, Förderung naturnahe Waldentwicklung/-umbau/Reduktion Nadelholzanteil durch Naturverjüngung, Einrichtung Schutzgebiete/Reservate, Moratorien für Holznutzung, Entschädigung für Nutzungsverzicht, Gestufte Waldränder/Schutz Waldinnenklima, Umstellung auf Agroforst, Pflanzung tiefwurzelnde Baumreihen/Hecken, Umstellung auf Dauergrünland, Kühlung/Beschattung Böden mit Untersaat/Zwischenfrüchten, leaky dams
SR7 Förderung wertvoller Lebensräume / seltener Arten	Wald Kulturland Gewässernetz	Reaktivierung/Revitalisierung Moor-/Feuchtwälder, Beiträge für Waldbiodiversität, Entschädigung für Nutzungsverzicht, Reaktivierung/Revitalisierung Moore/Feuchtwiesen, Beiträge für BFF, Entschädigung für Nutzungsverzicht, Reaktivierung/Revitalisierung Auen, Schaffung Vernässungs-/ Überflutungszonen, Stillgewässer/Senken/Sickerbereiche, naturnahe Gestaltung von Retentions-/Versickerungsanlagen, Förderung Pflanzenkläranlagen, leaky dams

Tab. 1 Auszug aus dem SWL-Massnahmenfächer [4]. Die Einzelmassnahmen sind nach Sektoren und Stossrichtungen SR1 bis SR7 gegliedert. Die Stossrichtungen wirken jeweils komplementär und begünstigen insgesamt das Erreichen eines optimal gepufferten Zielzustands.

ration von mehreren komplementären Massnahmen erreicht – am besten auf der Ebene von Einzugsgebieten (Fig. 4).

Das Potenzial für SWL-Massnahmen in der Schweiz wird als sehr gross eingeschätzt, Flächen zur Umsetzung sind

auch in unserer intensiv genutzten Landschaft genügend vorhanden (Fig. 5). SWL-Massnahmen können grosse Schäden verhindern (Fig. 4) und sind dennoch kostengünstig. Vielfach können sie durch bereits bestehende Programme von Bund und Kantonen finanziert werden (Agroforst, Waldverjüngung, Revitalisierung, Strukturverbesserung usw.), weitere Fördermöglichkeiten u.a. mit Bezug zur Klimaanpassung dürften mittelfristig noch hinzukommen. Wo die Umsetzung zu Extensivierungen und zu Mindererträgen führt, empfiehlt sich zudem ein finanzieller Ausgleich oder Realersatz.

Neben der Förderung einzelner Massnahmen und Pilotflächen braucht es auch übergeordnete strategische Planungen. So müssen Reliktflächen mit noch intakter, hoher Schwammfunktion dringend erhalten und gefördert werden. Strategische SWL-Planungen braucht es v.a. in Regionen mit Wasserstress und Dürreanfälligkeit, in Gebieten, wo die landwirtschaftliche Produktion stark von Bewässerung abhängig ist, sowie in Zonen, wo Oberflächenabflüsse oder Hochwasser zu grossen Schäden an Böden, Kulturen oder Infrastrukturen führen und technische Schutzmassnahmen unverhältnismässig

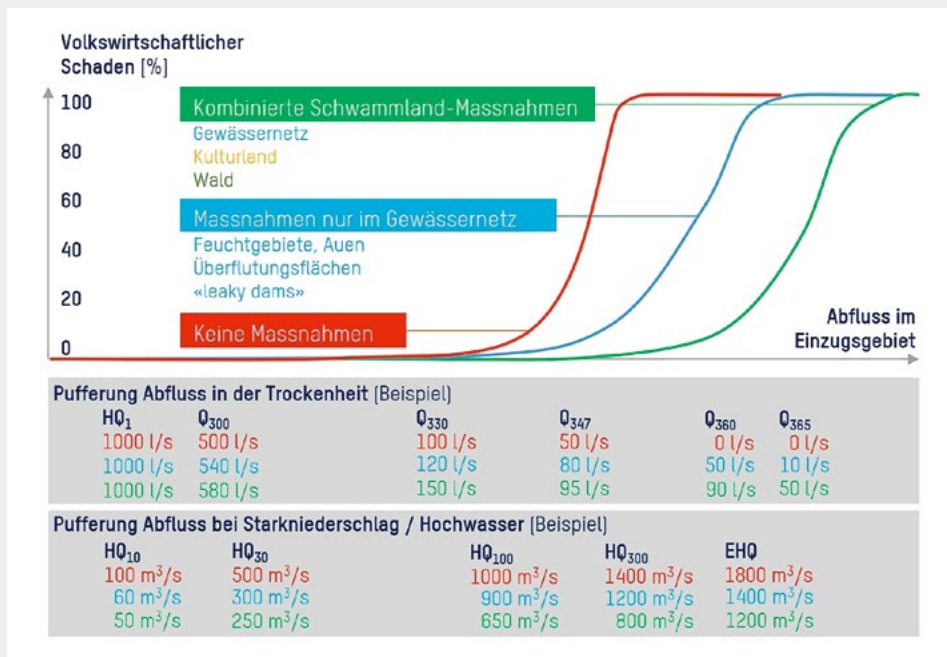


Fig. 4 Schadenkurven für Abflüsse in einem fiktiven Einzugsgebiet. Ohne Massnahmen führen sowohl extreme Trockenheit wie auch extreme Starkniederschläge/Hochwasser zu massiven Schäden. Mit zunehmender Pufferung der Landschaft treten diese wesentlich seltener ein. Am besten schneiden kombinierte SWL-Massnahmen ab. Die Schadenkurven wurden im Auftrag der Kommission für Hochwasserschutz Schweiz KOHS aus diversen Beispielen hergeleitet. (© Emch+Berger)

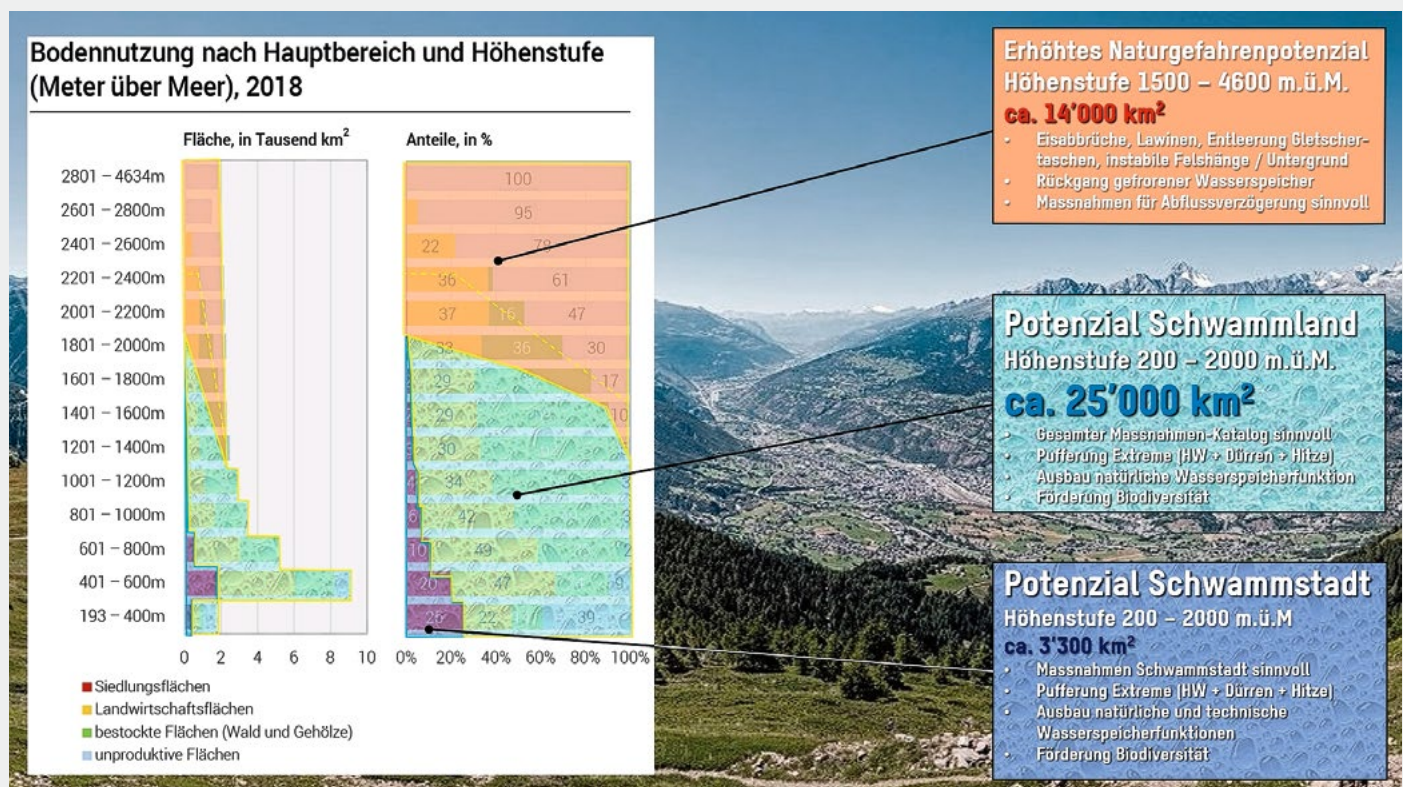


Fig. 5 Wo liegt das SWL-Potenzial der Schweiz? Eine auf Basis der Arealstatistik vorgenommene Abschätzung für Einsatzgebiete möglicher SWL-Massnahmen [4] zeigt unterhalb von etwa 2000 m ü.M. ein sehr grosses Potenzial im unbebauten Gebiet (rund 25 000 km² bzw. 60% der Landfläche). Die Potenzialfläche für Schwammland ist somit etwa achtmal grösser als für Schwammstadt. Oberhalb von etwa 2000 m ü.M. ist das Potenzial geringer. Dort wird v.a. eine Zunahme von Naturgefahren erwartet. (© BFS [34] adaptiert, VBS).

sind. Auch die Grundwasseranreicherung muss mit strategisch lokalisierten SWL-Massnahmen gezielt erhöht werden, um z.B. Grundwassernutzungen resilienter gegen Trockenheit zu machen. Dies fordert auch der Masterplan Trockenheit des SVGW [30] und schlägt die Aufnahme von SWL in der Raumplanung vor. Weiter sind übergeordnete Planungen empfehlenswert, um die nötigen Flächenziele bei Wäldern und Agroforst zu erreichen, mit denen gemäss ETH-Studie die natürliche Wolken- und Regenbildung einer Region wiederhergestellt werden kann [31]. Auch die Biodiversität profitiert von strategisch angelegten SWL-Massnahmen, wenn diese seltene Lebensräume wiederherstellen und die biologische Vernetzung verbessern [8, 28, 32]. Schliesslich können gut gewählte SWL-Massnahmen auch das Landschaftsbild bereichern, die Erlebnisqualität und die regionale Identität steigern sowie zur Lebensqualität beitragen und sogar gesundheitsfördernde Aspekte zeigen [33].

BEISPIELE UND PILOTPROJEKTE

SWL-MASSNAHMEN IM GEWÄSSERNETZ

Im Gewässernetz werden SWL-Massnahmen zur Abflussverzögerung, Wasser- und Nährstoffspeicherung und Vernässung gerinnenaher Flächen, zur Steigerung der Grundwasserneubildung und zur Biodiversitätsförderung eingesetzt (Fig. 6): u.a. Gewässerrevitalisierung, Auenreaktivierung, Förderung von Feuchtwiesen oder Wiedervernässung von Mooren. Die Summe solcher Massnahmen kann in einem Einzugsgebiet ein grosses Puffervolumen schaffen (Summeneffekt) [8, 36]. Die Rehydratation der Landschaft kann sehr einfach gefördert werden durch naturnahe, semiporöse Querstrukturen in Bächen wie z.B. Biberdämme, *Beaver Dam Analogs* (BDA) und gerinnequerende Totholzkomplexe [2, 3, 36]. Diese «leaky dams» verzögern den Abfluss bei Nieder- und Hochwasser, sie speichern Wasser temporär und stellen natürlich wechselfeuchte bzw. überschwemmte Uferbereiche wieder her. Im Unterschied zu technischen Querbauwerken haben diese Strukturen keine Barrierewirkung für die biologische Vernetzung. Der gesteigerte Wasserrückhalt puffert Mikroklima und Grundwasser, von der Wiedervernäs-

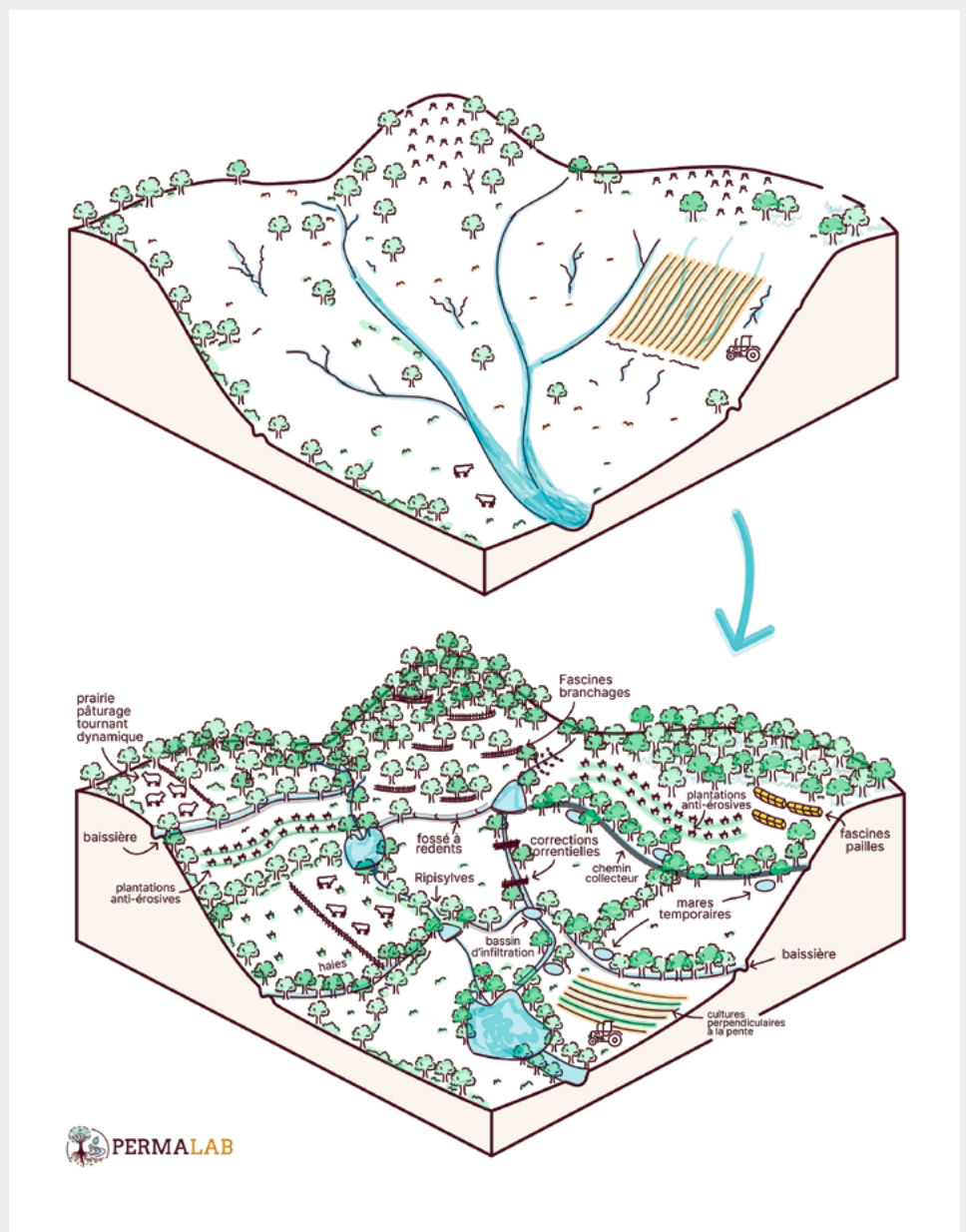


Fig. 6 Beispiel Landschaftskammer mit Hanglage vor und nach Umsetzung von SWL-Massnahmen [35]. Unten sind alle sieben komplementären SWL-Stossrichtungen wirksam: Abflussverzögerung, Wiedervernässung, Erosionsprophylaxe, Bodenbedeckung/Gewässerkühlung, Wasser- und Kohlenstoffspeicherung, pflanzenbasierte Klimapufferung und Förderung Biodiversität. (Grafik: Permalab)

sung profitieren autentische Lebensräume, Hotspots der Artenvielfalt (Fig. 7 und 8)^{1,2}. Erfolgskontrollen zeigen, dass die Lebensraumvielfalt stark gesteigert sowie aquatische und amphibische Arten gefördert werden: Beim Pilotprojekt am Schlossbach in Rümligen im Kanton Bern konnten bereits zwei Jahre nach Einbau von sechs BDA eine starke Zunahme der Wasserlebensräume (+600%) und des Fischbestands (+ Faktor 17) und positive Effekte in Bezug auf Amphibien nachgewiesen werden [37]. Die Strukturen

halten erodiertes Bodenmaterial zurück und können selbst in trockenfallenden Bächen die Wasserführung wieder steigern [36]. Da BDA konfliktfrei planbar und auch unabhängig von der Ausbreitung des Bibers einsetzbar sind, sind sie von grossem Nutzen für SWL-Planungen.

SWL-MASSNAHMEN IM KULTURLAND

Im Kulturland ist ein nachhaltiger Umgang mit Wasser, Boden und Bewuchs zu etablieren. Niederschläge müssen gedämpft (Interzeption durch Vegetation und Zwischensaaten, Vermeidung kahler Böden), Abflüsse verzögert, verteilt (z.B. *Keylines*, *Agroforst*, bewirtschaft-

² Link Projekt Uechtgraben/Horbermatt

Link Hof Horbermatt

¹ Link Projekt Schlossbach



Fig. 7 SWL-Projekt am Schlossbach, Rümligen BE, vor Massnahmen (eingetieftes Gerinne unten links) und nach dem Einbau von sechs künstlichen Biberdämmen (BDA). Neben der hydrologischen Verbesserung (Anreicherung Grundwasser, Resilienz für lokale Trinkwasserfassung) konnte auch eine deutliche ökologische Aufwertung erzielt werden [37].
(© C. Angst, Emch+Berger, Swisstopo)



Fig. 8 SWL-Projekt auf der Horbermatt in Oberbalm BE mit 30 künstlichen Biberdämmen (BDA) und Agroforst. Vor den Massnahmen hatte sich der steile Bachlauf stellenweise um 2 m abgetieft und entwässerte und erodierte das Kulturland permanent. Dank der angehobenen Bachsohle und der Abflussverzögerung konnten Wasserhaushalt und Bodenfeuchte regeneriert und auch neue Lebensräume geschaffen werden.
(© SRF, Emch+Berger, Horbermatt)

bare Flutmulden) und möglichst lange in der Fläche gehalten werden, damit der Niederschlag Zeit hat, in die Böden einzusickern und das Grundwasser anzureichern (Fig. 9-11)^{3,4,5}. Zentral sind Massnahmen zur Erosionsprävention und Bodenregeneration (Unter- und Zwischensaat, Förderung porenreicher Böden durch nachhaltige Bewirtschaftung bzw. durch Reduktion oder Verzicht auf

Bodenbearbeitung), wodurch die Bodenfruchtbarkeit und Wasserspeicherkapazität erhalten und gefördert werden [8, 28]. Drainagen werden entweder mit Steuerungen aufgerüstet, damit der letzte Niederschlag vor prognostizierten Trockenphasen zurückgehalten werden kann (*Smart Drainage*), in Retentionsbecken oder Versickerungsbereiche geleitet oder ganz aufgehoben. Mit Keylines und Agroforst kann die Wasserverfügbarkeit auf den Bewirtschaftungsflächen stark erhöht und der Bewässerungsbedarf gesenkt werden [8, 28]. Durch den Einbezug permanenter Vegetation im

Kulturland (Agroforst, Hecken, Dauergrünland) wird das Gebiet aktiv gekühlt. Agroökologische Anbaumethoden wie z.B. mehrjährige Mischkulturen schaffen enorme Resilienz: Wie am einfachen Beispiel von Wiesen gezeigt werden kann, weisen biodiverse Flächen gegenüber Rein- bzw. Monokulturen eine 50% höhere Dürresistenz, eine dreifach höhere Kohlenstoffspeicherung, eine knapp dreimal schnellere Bodenbildung aus und versorgen darüber hinaus 45% mehr Bestäuberinsekten und Nützlinge [38]. Wie eine ETH-Studie zeigt, sind Mischkulturen auch im Ackerbau ertragreicher als in Monokulturen [39]. Mischkulturen waren vom Gemüse- bis zum Weinbau die vorherrschende Praxis in der Landwirtschaft vor deren Industrialisierung [40]. Zukunftsfähige Züchtungsprogramme sind deshalb auf Mischkulturen ausgelegt [41]. Die Regenwasserretention in möglichst naturnahen, bewachsenen, multifunktionalen Bewässerungsteichen ist eine weitere sehr sinnvolle Strategie. Technische Speicherbecken müssen die Ausnahme bleiben, weil sie relevante Ökosystemleistungen unterbinden (Landschaftskühlung, Wasserfiltration, Grundwasseranreicherung, Kohlenstoffspeicherung, Biodiversität, Landschaftsqualität etc.).

SWL-MASSNAHMEN IM WALD

Der Wald hat einen unschätzbaren Wert für Klimaregulation und Klimaschutz. Da mit steigenden Temperaturen und häufigeren Trockenperioden das Risiko für Waldbrände erhöht wird [43], ist die Wiedervernässung von Waldflächen von strategischer Bedeutung. Hierzu werden Niederschläge gezielt in den Entwässerungsgräben rückgestaut oder noch vorhandene Gräben zugeschüttet (Fig. 12). Die Rückkehr zu naturnahen Wäldern auf diesen ehemals feuchten Standorten macht diese klimaresilienter und ermöglicht das Erbringen einer verbesserten regulierenden Wirkung [44]. Um das kühle Waldinnenklima zu schützen und Feuchtigkeit zu erhalten, ist eine kleinflächige Nutzung ohne grössere Räumungsschläge, eine stufige Struktur und forstlicher Bodenschutz wichtig [44]. Bezüglich Baumartenzusammensetzung sind (Laub-)Mischwälder mit dem künftigen Standort angepassten Arten zu fördern, und wo sie schon bestehen, zu erhalten. Die auf zukunftsfähige Baumarten ausgerichtete Walderneuerung,

³ Link Katzhof

Link Projekt Slow Water

⁴ Link Hof Aebleten

⁵ Link Projekt Hof Wyss

idealerweise durch Naturverjüngung, stellt dabei sicher, dass sich mittelfristig Wälder ausbilden, welche die bestmögliche Resilienz gegen Klimaextreme aufweisen. Je nach Standort können der Klimaregulation dienende, z.B. wiedervernässte Wälder eine Einschränkung der bisherigen forstlichen Nutzung bedeuten. Dort sind Nutzungsinteressen gegeneinander abzuwägen und allenfalls neue Entschädigungsmodelle einzuführen, die eine klimafreundliche Waldwirtschaft stärken und fördern [44].

FORSCHUNGSBEDARF – QUANTIFIZIERUNG DER EFFEKTE

Damit SWL-Massnahmen optimal gewählt, implementiert, gefördert und finanziert werden können, bedarf es weiterer Forschung. In den nächsten Jahren dürften viele wichtige Erkenntnisse aus diversen laufenden Studien, Pilotprojekten und Modellierungen zur Verfügung stehen, insbesondere auch vom «Slow Water»-Projekt des BLW [42]. Bereits heute ist klar, dass SWL-Massnahmen kostengünstige Instrumente sind, die zur Dämpfung und Verzögerung von Hochwasserspitzen beitragen. Damit aber naturbasierte Massnahmen im Hochwassermanagement angerechnet und in Wert gesetzt werden können, braucht es eine entsprechende Quantifizierung von Effekten, Robustheit und Wirtschaftlichkeit. Vielversprechende Daten liegen hier bereits zu Massnahmen im Gewässernetz vor: Jüngst wurde am Fallbeispiel der Emmentaler Region Kämmeriboden im hydraulischen Modell die Wirkung von BDA-Kaskaden in Seitenbächen der Emme auf den Hochwasserabfluss im Hauptgerinne untersucht [45]. Wie die Hochwassersimulation (HQ₂ bis HQ₃₀) zeigte, ergibt sich durch die Einbauten in den Seitenbächen im Hauptgerinne eine markante Reduktion und Verzögerung des Spitzenabflusses. Die Ergebnisse der Modellierung stützen dabei die Resultate weiterer Untersuchungen: Die von Käppeli-Wyss [45] festgestellte Verzögerung des Spitzenabflusses beträgt durchschnittlich 27 Stunden, was die Forschungsergebnisse von Nyssen *et al.* (2011) [46] bestätigt, die in ihrer Untersuchung eine Verzögerung der Hochwasserspitze um bis zu 24 Stunden nachweisen konnten. Puttock *et al.* (2017) [47] berichteten, dass natürliche Biberdamm-Kaskaden eine Verringerung der Spitzenabflüsse um $30 \pm 19\%$ errei-



Fig. 9 Beim Katzhof in Reiden LU wurden für Wassermanagement und Erosionskontrolle Keylines entlang der Höhenlinien angelegt, ein Agroforst-System und diverse Retentionsteiche erstellt. Der Katzhof ist ein Pilotbetrieb im Ressourcenprojekt «Slow Water» [42] des BLW zur Verbesserung des Wasserrückhalts in Böden und Grundwasserleitern des Kulturlands. (© T. Alföldi und J. Hunziker)



Fig. 10 Ein weiteres Pionierprojekt ist der Hof Aebleten in Meilen ZH: 2018 und 2021 wurde für Wassermanagement und Erosionskontrolle ein paralleles modifiziertes Keylinesystem mit integriertem Agroforst und Wassergräben (oben rechts) etabliert. (© T. Alföldi und L. van Puijenbroek)



Fig. 11 Keyline-System mit Agroforst beim Hof Wyss in Aetigkofen SO. Die 2025 umgesetzten Keylines sorgen für Wasserrückhalt und -verteilung (unten mitte) und die zusätzliche Bepflanzung (unten rechts) mit Wertholzbäumen und Futterhecken erhöht Klimaresilienz und Bodenqualität weiter. (© E. Flury)



Fig. 12 Die Wiedervernässung einer Waldfläche, z. B. durch den Rückstau eines ehemaligen Entwässerungsgrabens (rechts unten), erhöht deren klima- bzw. feuchtigkeitsregulierende Wirkung, verbessert die Lebensraumfunktion und beugt Risiken wie Waldbrand vor. (© Impuls AG)

chen. In der Modellierung konnte sogar eine Reduktion der Spitzenabflüsse um durchschnittlich 34,7% beobachtet werden [45], ein Wert der den Ergebnissen von [47] nahekommt. Die Resultate der Modellierung unterstützen die Schlussfolgerung, dass natürliche Massnahmen für Hochwasserschutz an kleinen Bächen im Oberlauf anstelle oder als Ergänzung von grossen technischen Bauwerken im

Hauptfluss empfohlen sind [46]. Weitere Studien zeigen, dass sich Hochwasserspitzen durch Moorwiederherstellung um bis zu 27% [48], und durch Revitalisierungen (Mäander statt Kanalisierung, Ausufern in bachnahe Flächen) um rund 15% [49] drosseln lassen. Ein nächster Schritt wird sein, die Robustheit der Massnahmen zu untersuchen, sowie die Betrachtung auf seltenere Ereignisse auszuweiten. Eben-

so gilt es, die puffernde Wirkung dieser Massnahmen im Gewässernetz auf Niederwasserabflüsse zu untersuchen. Auch bei SWL-Massnahmen im Wald und im Kulturland gibt es Forschungsbedarf: Hier ist eine deutlich grössere Bandbreite der Effekte zu erwarten, da die Beschaffenheit des Untergrunds eine zentrale Rolle spielt, und diese lokal stark variieren kann. Nicht zuletzt müssen SWL-Massnahmen lokal auch immer in Bezug auf mögliche Risiken für Naturgefahren untersucht werden – z.B. erhöhte Versickerung bei rutschgefährdetem Untergrund – gerade in der topografisch anspruchsvollen Schweizer Landschaft.

FAZIT

Eine Investition in SWL-Lösungen bedeutet, die Zukunftsfähigkeit der Landschaft samt der in ihr liegenden Siedlungsgebiete zu stärken und die Lebensgrundlagen langfristig bestmöglich zu erhalten. SWL-Projekte sind bereits heute möglich und zahlen sich aus – je früher, umso besser, und je länger, desto mehr. Vielerorts lassen sich relevante SWL-Effekte bereits mit geringem Aufwand erzielen. Zur Lösung der dringlichsten Probleme sind die fünf folgenden Massnahmen zeitnah und in möglichst vielen Einzugsgebieten umzusetzen:

- *Leaky dams* / BDA in kleinen Bächen
- Drainagestopp im Wald
- Unter-/Zwischensaat im Ackerbau
- *Agroforst*
- *Keylines*

Da die SWL-Ziele und -Massnahmen zu diversen politischen Stossrichtungen der Schweiz passen (u.a. Anpassung an den Klimawandel, Aktionsplan 2020–2025; Klimastrategie Landwirtschaft und Ernährung 2050, Anpassung des Waldes an den Klimawandel, Landschaftskonzept Schweiz (SLK), Integrales Risikomanagement) – gilt es, die Kräfte über die sektoriellen Grenzen hinweg zu bündeln und die sich bietenden Chancen zu nutzen, damit Lösungen zeitnah umgesetzt werden.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Werdenberg, N. et al. (2024): Analyse historischer Gewässerkorrekturen und Meliorationen der Schweiz. Emch+Berger AG Bern
- [2] Minnig, S. et al. (2022): Der Natur abgeschaut: «Beaver Dam Analogs». Innovative und kostengünstige Revitalisierungsmethode für natürliche Fließgewässer. Aqua & Gas 4
- [3] Werdenberg, N.; Widmer, A. (2022): Beaver Dam

AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

- Ressourcenprojekt «Slow Water» des Bundesamts für Landwirtschaft BLW und der Kantone Basel-Landschaft und Luzern
Link Projekt Slow Water
- «Forum nachhaltiges Wassermanagement in der Landwirtschaft»
Link Forum
- WOCAT (internationale Datenbank) mit div. SWL-Massnahmen
Link Datenbank
- BAFU, div. Kantone und Planer: Bestrebungen, SWL-Massnahmen zum Hochwasserschutz zu untersuchen und zu quantifizieren (Ziel: Anrechenbarkeit z. B. im Rahmen des Integralen Risikomanagement)
- Wasser-Agenda 21: Aufbau eines Netzwerks, um die verschiedenen Akteure für naturbasierte SWL-Lösungen in der Landschaft zusammenzubringen.

EINZELFLÄCHEN-/PROJEKTE

- Klimaresilienz für landwirtschaftliche Betriebe (u.a. Katzhof LU, Hof Aebleten ZH, Biohof König BE, Huebhof ZH, Hof Süri BE, Hof Wyss Aetigkofen, Hof Bruhst ZG)
- Prüfung des SWL-Konzepts im Einzugsgebiet Stadtbach (Bern)
- Regeneration des Wasserhaushalts auf spezifischen Flächen, z. B. in Schutzgebieten (NSG Chiibacker Bagen, div. Moorflächen)
- Wiedervernässungen Bäche und Wald: Höllwald BE, Uechtgraben BE, Schlossbach BE, Lenzburg AG, Stadt Winterthur
- Prüfung von SWL-Massnahmen im Einzugsgebiet Dübach/Ergolz zur Reduktion der HWS-Massnahmen im Siedlungsgebiet (Kt. BL)

AUS- UND WEITERBILDUNG

- OST – Ostschweizer Fachhochschule: Landschaftsplanung mit SWL-Modul
www.ost.ch
- SWL-Referate/-Workshops
- KOHS-Weiterbildungskurs Wasserbau
www.swv/veranstaltungen

- Analogs – Klimaresilienz und Biodiversität für unsere Bäche. Facts & figures. Emch+Berger AG Bern
- [4] Werdenberg, N. et al. (2023): Konzept Schwamm-land. Naturbasierte Lösungen für Klimaschutz, Klima-anpassung, Wasserressourcenmanagement und Biodiversitätsförderung in der Landschaft. Emch+Berger AG Bern
- [5] Gimmi U. et al. (2011): Reconstructing the collapse of wetland networks in the Swiss lowlands 1850–2000. *Landscape Ecol* 26: 1071–1083
- [6] Béguin, J.; Smola, S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz. Bilanz der Umfrage 2008. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)
- [7] Tempel, M.; Schultheiss, J. (2017): Historische Entwässerungsgräben im Soonwald und deren Auswirkung auf die Hochwasserentstehung. Siedlungsforschung. *Archäologie – Geschichte – Geographie* 34, S. 375–388
- [8] Scheub, U.; Schwarzer, S. (2023) Aufbäumen gegen die Dürre. oekom verlag, München, ISBN: 9783987262449
- [9] Makarieva, A. M. et al. (2023): The role of ecosystem transpiration in creating alternate moisture regimes by influencing atmospheric moisture convergence. In: *Global Change Biology* 29:9, 2536–2556
- [10] Hildmann, C. (2008): Klimaschutz braucht einen intakten Landschaftshaushalt. In: *UVP-Report* 22:5, 229–233
- [11] Göbel, M.-O. et al. (2011): Bedeutung der Benetzbarkeit für den Aufbau von organischer Bodensubstanz vor dem Hintergrund klimatischer Extremereignisse. *DBG-Jahrestagung*
- [12] Swiss Re (2020): Floods and drought: Two sides of the same coin
- [13] Browder, G. et al. (2021): An EPIC Response: Innovative Governance for Flood and Drought Risk Management, World Bank
- [14] Borrelli, P. et al. (2020): Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 117. 1–8. 10.1073/pnas.2001403117
- [15] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Kovacs, B. (2015): Sustainable agriculture, forestry and fisheries in the bioeconomy – A challenge for Europe – 4th SCAR foresight exercise, Kovacs, B.(editor), Publications Office
- [16] Rianna, G. et al. (2024): European Climate Risk Assessment EUCRA Full report
- [17] Treydte, K. et al. (2023): Recent human-induced atmospheric drying across Europe unprecedented in the last 400 years. *Nature Geoscience*. 17. 1–8. 10.1038/s41561-023-01335-8
- [18] Millán, M. (2014): Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. *Journal of Hydrology* 518 (2014) 206–224. *Journal of Hydrology*. 518. 206–224. 10.1016/j.jhydrol.2013.12.041
- [19] Den Boer, P.J. (1968): Spreading of risk and stabilization of animal numbers, *ActaBiotheoretica*
- [20] Yachi, S.; Loreau, M. (1999): Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 96, 1999
- [21] Dietrich, P. et al. (2024): Plant diversity and community age stabilize ecosystem multifunctionality, *Glob. Change Biol.* 30 (3), e17225 10.1111/gcb.17225
- [22] Prashun, V. et al. (2023): Der Agrarumweltindikator Erosionsrisiko, kulturspezifische C-Faktoren sowie eine Karte des aktuellen Erosionsrisikos der Schweiz. *Agroscope Science*, 158
- [23] Bundesamt für Umwelt BAFU (2021): Effects of climate change on Swiss water bodies. *Hydrology, water ecology and water management*., *Environmental Studies* No. 2101
- [24] Bundesamt für Umwelt BAFU (2017): Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016., *Umwelt-Zustand* Nr. 1630
- [25] Afroz, M. et al. (2023): Drought- and heatwave-associated compound extremes: A review of hot-spots, variables, parameters, drivers, impacts and analysis frameworks, *Frontiers in Earth Science*
- [26] O. Rakovec, O. et al. (2022): The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe, *Earth's Future*
- [27] Chen, L. et al. (2025): Global increase in the occurrence and impact of multiyear droughts. *Science*. 2025 Jan 17;387(6731):278–284. doi: 10.1126/science.ado4245. Epub 2025 Jan 16. PMID: 39818908
- [28] Hildmann, C. et al. (2022): Measures for adaptation to climate change through water retention and cooling by transpiration. A catalogue of measures for a drought-prone area in eastern Germany
- [29] F. Cochand, P. et al. (2021): Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources, *Science of the Total Environment*
- [30] Meier, R. (2024): Masterplan Trockenheit: Notwendige Anpassungen und Aktionsfelder. *Aqua & Gas* 7+8: 24–28 S.
- [31] Meier, R. et al. (2021): Empirical estimate of forestation-induced precipitation changes in Europe. *Nature Geoscience* 14, no. 7(2021): 473–478
- [32] BAFU (Hrsg.) (2021): Ökologische Infrastruktur. Arbeitshilfe für die kantonale Planung im Rahmen der Programmvereinbarungsperiode 2020–2024
- [33] Kämpfen, G.-L.; Koeppel, L. (2025): Klimaangepasste Kulturlandschaften: Neue Landschaftsqualitäten? *Geomatik Schweiz* 3–4/25
- [34] Bundesamt für Statistik BFS (2021): Die Bodennutzung in der Schweiz Resultate der Arealstatistik 2018
- [35] Lopez Calleja, S.; Demigneux, F. (2025): L'Hydrologie Régénérative. La révolution d'une seule goutte d'eau. *Enquête. LeRouge&LeBlanc*, Nr. 156
- [36] Norman, M. L. et al. (2022): Natural infrastructure in dryland streams (NIDS) can establish regenerative wetland sinks that reverse desertification and strengthen climate resilience., *Science of The Total Environment*
- [37] Minnig, S. et al. (2025): Expert:innenbericht: Beaver Dam Analogs (BDAs) – Monitoring Schlossbach 2022–2028 (Phase 1, 2022–2024), Genossenschaft umweltbildner.ch, Bern
- [38] Weisser, W. et al. (2017): Biodiversity effects on ecosystem functioning in a 15-year grassland experiment: Patterns, mechanisms, and open questions. *Basic and Applied Ecology*. 23. 10.1016/j.baee.2017.06.002
- [39] Chen, J.G. et al. (2021): Diversity increases yield but reduces reproductive effort in crop mixtures, *Nature Plants*. 7. 1–6. 10.1038/s41477-021-00948-4
- [40] Wyss, D. (2024): Wassermanagement im biologischen Weinbau. Burgdorfer Wasserbautag. *Berner Fachhochschule, Burgdorf. Bau und Wissen, TFB AG, Wildegg*
- [41] Rubiales, D.; Enjalbert, J.; Hohmann, P.; Anten, N. (2023): Editorial: Breeding for intercropping. *Frontiers in Plant Science*. 14:1143653. doi: 10.3389/fpls.2023.1143653
- [42] Bundesamt für Landwirtschaft BLW: Projektdokumentation Ressourcenprojekt Slow Water
- [43] Schipper, O. (2023): Die Waldbrandgefahr nimmt zu – was können wir tun? *Die Umwelt* 4-23, pp. 22–26
- [44] Ibisch, P.L.; Blumroeder, J. (2020): Waldentwicklung und Ökosystemleistungen im Klimawandel: aktuelle waldökologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Brandenburg. Empfehlungen für einen strategischen und ökosystembasierten Umgang mit der Waldkrise. Beitrag zur Brandenburger Waldkonferenz 2020
- [45] Käppeli-Wyss, S. (2024): Auswirkungen naturähnlicher Verbauungen in den Zuflüssen auf den Spitzenabfluss im Hauptfluss. Masterarbeit im Fachbereich Geoimformatik der Paris Lodron Universität Salzburg. Salzburg: 67 S.
- [46] Nyssen, J.; Pontzele, J.; Billi, P. (2011): Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevril in the Ourthe Orientale basin, Ardennes Belgium, *Journal of Hydrology*, 402(1–2), pp. 92–102
- [47] Puttock, A. et al. (2017): Eurasian beaver activity increases water storage, attenuates flow and mitigates diffuse pollution from intensively-managed grasslands, *Science of The Total Environment*, 576, pp. 430–443
- [48] Shuttleworth, E. et al. (2018): Restoration of blanket peat moorland delays stormflow from hillslopes and reduces peak discharge. *Journal of Hydrology* X. 2. 100006. 10.1016/j.jhydro.2018.100006
- [49] Liu, Y. B. et al. (2004): Simulation of flood reduction by natural river rehabilitation using a distributed hydrological model, *Hydrology and Earth System Sciences*