

Bedeutung des Wasserrückhaltes im Wald für die Risikovorsorge gegen die Entstehung von Sturzfluten und für eine nachhaltigere Grundwasserneubildung

Von Prof. Dr. Gebhard Schüler & Eva Verena Müller (Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz in Trippstadt)

Ausgangssituation

Der Südwesten Deutschlands ist durch ein westeuropäisch-atlantisches Klima geprägt, das bisher durch milde Winter, gemäßigte Sommer und ausgeglichene hohe jährliche Niederschlagsmengen gekennzeichnet war. Der Klimawandel hat und wird sich hier jedoch stark auswirken. So wurde in Rheinland-Pfalz von 1881 bis 2020 bereits ein signifikanter durchschnittlicher Temperaturanstieg um $1,6^{\circ}\text{C}$ festgestellt (www.kwis-rlp.de). Mit der klimawandelbedingten Temperaturerhöhung der vergangenen Jahre kam es zu längeren Trockenzeiten innerhalb der Vegetationsperioden, mit negativen Folgen für die klimatische Wasserbilanz in den Waldgebieten. Die Kombination aus höheren Lufttemperaturen und Trockenperioden erhöht die potentielle Evapotranspiration in den Waldbeständen bei gleichzeitig abnehmendem Bodenwas-

servorvat. Dadurch entwickelte sich regional eine starke Bodentrockenheit. Auch die Winterniederschläge haben nicht ausgereicht, um das jeweilige Wasserdefizit der Vorjahre auszugleichen und die pflanzenverfügbare Feldkapazität der Böden aufzufüllen (Abb. 1). In der Periode von 2000 bis 2020 sind die Infiltrationsraten für Sickerwasser und infolge dessen der Bodenwassergehalt im Pfälzerwald permanent zurückgegangen, wie unsere Messungen und Modelliererergebnisse eindrucksvoll zeigen. Unter Berücksichtigung der regionalisierenden Klimaprojektionen RCP2.6 und RCP8.5 wird sich dieser Trend in der Zukunft noch verschärfen. Die Bodenfeuchte wird bis zum Jahre 2099 noch stärker abnehmen und die Länge der Phase geringerer Bodenfeuchte in der Vegetationszeit wird zunehmen (Müller 2022), was den Trockenstress für die Wälder weiter steigert.

Entwicklung der nutzbaren Feldkapazität an der Station 'ForeStClim' (Tiefe: 30 cm)

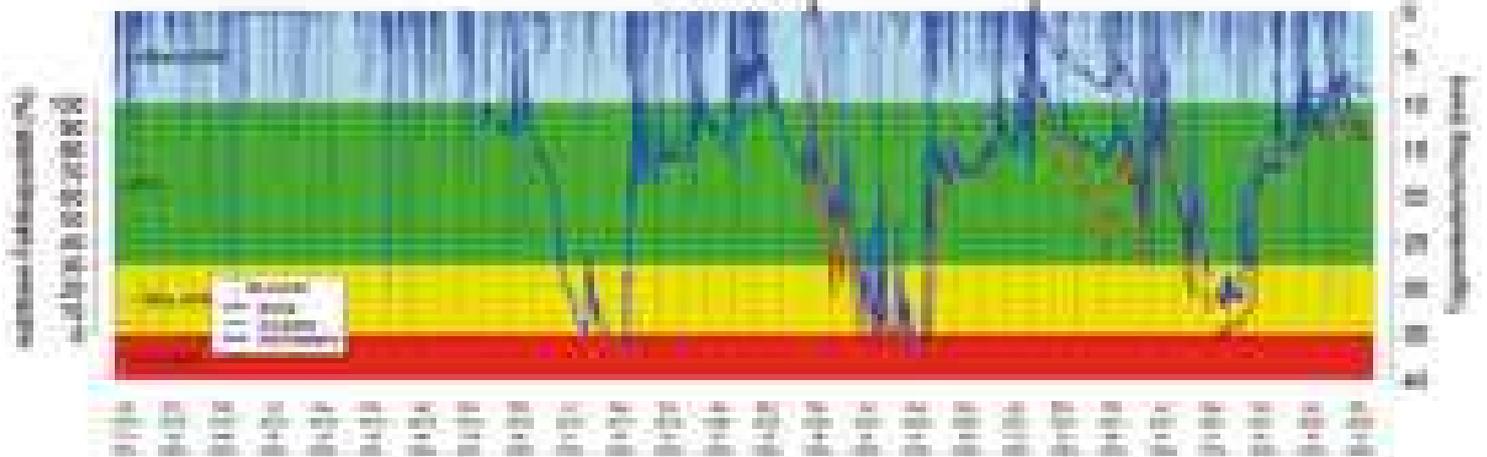


Abb. 1: Entwicklung der nutzbaren Feldkapazität an der Waldmessstation ForeStClim im Pfälzerwald von Januar 2018 bis März 2022 in Abhängigkeit der Tagesniederschläge

In der Folge zeigten sich z.B. bei (Alt-) Buchen und auch bei Kiefern seit dem Sommer 2020 **deutliche Trockenstress-Symptome** bis hin zu möglichen Absterbe-Erscheinungen. So prognostizieren Leuschner & Ellenberg (2017) für planare und kolline Lagen ein vermehrtes Vorkommen von wärme- und trockenheitsangepassten oder sogar von xerophilen Baumarten und in submontanen Lagen Eichen-dominierte Waldgesellschaften. Der Buche, als bisherige Leitbaumart der in Rheinland-Pfalz vorherrschenden Waldgesellschaften wird dagegen nur noch ein konkurrenzstarkes, dominierendes Wuchsverhalten in montanen Lagen zugebilligt. Schabel (2020) hat bereits Arealverluste der Buche in Südwestdeutschland bestätigt und für Buchenwälder in planaren und kollinen Lagen Zwangsnutzungen und einen beschleunigten Verjüngungsvorgang mit anderen wärmeangepassten und weniger Trockenstress-empfindlichen (isohydrischen) Mischbaumarten diskutiert.

Bei Starkregen kann es dann auf den ausgetrockneten, hydrophoben Böden zu einer verschlechterten Wasseraufnahme kommen, so dass mit einer Erhöhung des Oberflächenabflusses das Erosionsrisiko und die Gefahr von Sturzfluten zunehmen. Gleichzeitig führen häufiger auftretende konvektive Niederschlagsereignisse vermehrt zu Starkregen, und insbesondere, wenn sie längere Zeit an einem Ort niedergehen, zu Sturzfluten und Erosionen auch im Wald, z.T. sogar zu Erdbeben und menschengefährdenden Überschwemmungen (<https://wasserportal.rlp-umwelt.de/servlet/is/10080/>).

Im Zuge der erwarteten Klimaveränderungen wird eine Häufung von Wetter-Extrema erwartet (Reiter et al. 2020). Daher müssen Waldbewirtschaftungsmaßnahmen an den

geänderten Wald-Wasserhaushalt angepasst werden, um jeglichen beschleunigten, insbesondere anthropogen bedingten Wasserabfluss möglichst im Wald zurückzuhalten. Wasserrückhaltemaßnahmen im Wald dienen einerseits der Vorsorge gegenüber Hochwasser- und Sturzflutentstehung durch Reduktion eines beschleunigten, oft auch anthropogen verursachten Wasserabflusses aus dem Wald und andererseits der Wasserversorgung der austrocknenden Wälder und letztlich auch der Trink- und Brauchwasserversorgung der Gesellschaft über die Förderung der Grundwasserneubildung (Schüler et al. 2007, Müller 2022).

Die regulative Ökosystemdienstleistung zum Oberflächenabfluss im Wald mit Blick auf die Vorsorge gegen die Entstehung von Sturzfluten

Naturnahe und naturbelassene Wälder haben durch das Brechen der Niederschlagsenergie im Kronenraum und durch günstige physikalische Bodenbedingungen für die Infiltration und Bodenwasserspeicherung per se ein höheres, aber standortsabhängiges Wasserrückhaltevermögen (Retentionspotenzial). Sie leisten dadurch einen Beitrag zum dezentralen Hochwasserschutz (Peck & Mayer 1996; Schüler 2006b; Hegg et al. 2004 in Nordmann 2011; EEA 2015; Bott 2002). Intakte Waldökosysteme bieten einen weitgehenden Erosionsschutz, und sie bremsen den Stofftransport in Oberflächengewässer (Eutrophierungsschutz) (Neary et al. 2009; Wagenbrenner et al. 2010). Allerdings ist der Schutz der Wasserressourcen im Wald untrennbar mit dem Bodenschutz verbunden (Schüler et al. 2002; Nordmann 2011; Leuschner 1998, Schäfer et al. 2002).

Jedoch werden im bewirtschafteten Wald

aufgrund von notwendigen Infrastruktureinrichtungen, insbesondere von Waldwegen mit wegebegleitenden Grabensystemen, von den zur Förderung des Fichtenanbaus vor mehr als 100 Jahren angelegten Drainagegräben zur Entwässerung nasser Waldstandorte, und von Befahrungslinien für die maschinelle Holzernte und –vorlieferung Wasserrückhaltefunktionen und die Versickerungsleistung für Wasser eingeschränkt (Calder 2005, Grant 2005, Schüler 2006). Für den Pfälzerwald im Südwesten Deutschlands mit seinen durchlässigen Buntsandsteinverwitterungsstandorten wurden die durch die Waldbewirtschaftung ausgelösten Veränderungen von Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung mit dem Gebietswasserhaushaltsmodell SWAT+ (Gassmann et al. 2007, Bieger et al. 2016) analysiert und in Klimaprojektionen bis Ende des Jahrhunderts abgebildet (Müller 2022), um die hydrologischen Folgen des Waldwegenetzes im Hinblick auf den Oberflächenabfluss und auf die Abflusspende in die Vorfluter abzuschätzen. Durch die Linienstruktur der Waldwege wird der Oberflächenabfluss an den Wegen

gesammelt und konzentriert und nimmt um 36,2 % zu, obwohl die durch die Waldwege versiegelte Fläche nur 10,87 % ausmacht (**Übersicht 1**). Betrachtet man sich das Abflussgeschehen in einer höhen/zeitlichen Auflösung so ist zu erkennen, dass durch das Wegenetz regelrecht kurzfristige Abflussspeaks mit einem entsprechenden Beitrag in die Vorfluter entstehen (Müller 2022), was wiederum das Risiko von Sturzfluten steigert.

Risikobeladen für die Sturzflutentstehung ist auch der Oberflächenabfluss, der durch das Rückegassennetz zur Holzernte und zur Holzbringung aus der Waldfläche ausgelöst wird. Allerdings ist die Bodenverdichtung durch schwere Forstmaschinen abhängig vom Bodensubstrat, was sich durch eine Substrat-abhängige Steigerung des Oberflächenabflusses deutlich bemerkbar macht (**Übersicht 2**).

Danach steigt die Gefahr der Sturzflutentstehung mit extremen Abflussspitzen auch bei dem Einsatz von schweren Forstmaschinen auf schluffigen und lehmigen

Das Waldwegenetz im Biosphärenreservat Pfälzerwald versiegelt 10,87 % der Gesamtfläche

Wasserhaushaltsparameter	Änderung in % mit Bezug zur reinen Waldfläche
Oberflächenabfluss	+36,2 %
Beitrag in die Vorfluter	+12,3 %
Grundwasserneubildung (oberes Grundwasserstockwerk)	-2,0 %
Grundwasserneubildung (tieferes Grundwasserstockwerk)	-1,7 %

Übersicht 1: Hydrologische Folgen des Wegenetzes im Pfälzerwald (2001-2010), berechnet mit dem Wassereinzugsgebietsmodell SWAT+ (Müller 2022)

Rückegassen im Abstand von 40 m zueinander = 13,5 % der Waldfläche mit Bodenverdichtung (Quelle: Handbuch Walderschließung, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2018)

Bodensubstrat	Änderung des Oberflächenabflusses in % mit Bezug zur unbefahrenen Waldfläche
Sande aus Buntsandsteinverwitterung	+9,00 %
Sandige Lehme	+11,18 %
Lehme	+46,03 %
Sandige Schluffe	+ 126,10 %

Übersicht 2: Hydrologische Folgen des Rückegassennetzes im Pälzerwald (2001-2010), berechnet mit dem Wassereinzugsgebietsmodell SWAT+ (Müller 2022)

Waldböden erheblich an (Müller 2022).

Die versorgende Ökosystemdienstleistung zur Grundwasserneubildung unter Wald

Der Pälzerwald als größtes geschlossenes Waldgebiet Deutschlands ist ein überregional bedeutender Grundwasserspeicher (Heitele et al. 1987 in Geiger 1987). Allerdings hat im Pälzerwald die Grundwasser-Neubildungsrate seit 20 Jahren gegenüber der Zeit von 1961 – 1990, durch den Klimawandel bedingt, deutlich abgenommen (**Übersicht 3**) (Müller 2022).

Auch die für die nähere (2031 -2050) und fernere Zukunft (2071-2099) errechneten Grundwasser-Neubildungsraten bleiben mit den meisten Klimaprojektionsdaten

geringer als die der Referenzperiode von 1961 – 1990 (**Übersicht 3**).

Die mit SWAT+ berechneten forsthydrologischen Folgen zeigen, dass nicht nur die Grundwasserneubildungsrate deutlich zurückgeht, sondern dass auch eine permanent geringere Bodenfeuchte und damit Trockenstress für die Wälder auch in der Zukunft zu erwarten ist (**Übersicht 4**).

Management der Ökosystemdienstleistungen „Wald für Wasser“

Ursprünglich war die Mittelgebirgslandschaft geprägt durch ausgedehnte Wälder, auch auf nassen Standorten. Bäche und Flüsse mäandrierten in den Bachauen, also

	Vergleichs-zeitraum	Beobachtungs-zeitraum	Klimaprojektionen RCP 2.6 / RCP 8.5		Klimaprojektionen RCP 2.6 / RCP 8.5	
			2031-2050		2071-2099	
			MIN	MAX	MIN	MAX
Grundwasserneubildung [mm/a]	286	178	173	259	168	292

Übersicht 3: Grundwasserneubildungsraten im Pälzerwald, berechnet mit dem Wassereinzugsgebietsmodell SWAT+ (Müller 2022)

				RCP2.6/RCP8.5			
	1961-1990	2000-2020		2031-2050		2071-2099	
	Bezugs- periode	Absolut- werte	% zur Bezugs- periode	worst	best	worst	best
				case	case	case	case
% zur Bezugsperiode							
Niederschlag [mm]	1184.56	821.38	-30.66	-36.37	-3.77	-36.01	2.02
aktuelle ET [mm]	707.13	635.7	-10.10	-15.07	3.48	-31.70	4.11
Bodenfeuchte [mm]	246.08	164.17	-33.29	-34.52	-7.52	-38.50	-6,90
Grundwasser- Neubildung [mm]	285.7	177.6	-37.8	-39.45	-9.23	-41.18	2.07
Oberflächenabfluss [mm]	30	12.47	-58.43	-13.30	-62.18	28.90	-63.13

Übersicht 4: Änderungssignale von Wasserhaushaltsgrößen in der Vergleichsperiode 1961-1990, in der rezenten Periode 2000-2020 und in den Klimaszenarien 2031-2050 und 2071-2099 im Biosphären-Reservat Pfälzerwald (Müller 2022)

in ihren natürlichen Überschwemmungsgebieten. Aber auch in den ursprünglichen Landschaften gab es bereits Hochwasser, denn Abfluss und Hochwasser sind – unabhängig vom Klimawandel - natürliche Prozesse. Später mit steigender Bevölkerungsdichte nutzten die Menschen das Land zunehmend durch Landwirtschaft, Siedlungsflächen und Verkehrsinfrastruktur. Diese sich ändernde Flächennutzung von Wald zur Landwirtschaft und zu Siedlungsgebieten sowie Verkehrsflächen verminderten nachhaltig die Wasserversickerung und beschleunigten den Oberflächenabfluss. Gleichzeitig wurden auch die Wasserläufe zunehmend kanalisiert und die Bach- und Flussauen immer stärker eingeengt und versiegelt, so dass dem erhöhten Oberflächenabfluss nicht mehr genügend Raum blieb, um sich auszubreiten ohne Schäden anzurichten (Schüler et al. 2007). Zur Schadensvorsorge in der vom Menschen veränderten Mittelgebirgslandschaft muss aber Oberflächenabfluss, bevor er richtig Fahrt aufnimmt, kontrolliert werden. Dabei sollte

abfließendes Wasser aus von Menschen geschaffenen Infrastruktureinrichtungen, das sind Wege, Entwässerungsgräben und Rückegassen, kontrolliert in den Wald zurückgeleitet werden, so dass es dort als Teil des naturnahen Wasserkreislaufes versickern oder sich in bereitgestellten Retentionsräumen verteilen kann (Schüler 2021). Der signifikante Einfluss menschlicher Aktivitäten auf wasserbezogene Waldfunktionen, macht also die Auseinandersetzung und Überprüfung der waldwirtschaftlichen Eingriffe im Hinblick auf die Erbringung von wasserbezogenen ÖSDL des Waldes unabdingbar (Schüler 2022). Hydrologische Folgenabschätzungen der Waldbewirtschaftung dienen als Grundlage für die **Optimierung von standortsangepassten Praxismaßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhaltes**, damit zur Vorsorge gegenüber der Entstehung von Sturzfluten, zur Minderung des Trockenstresses und zur Förderung der Grundwasserneubildung (**Abb. 2**).



Abb. 2: Management des Oberflächenabflusses zur Risikovorsorge gegenüber Sturzfluten und zur Erhaltung einer ausreichenden Bodenfeuchte und Grundwasserneubildungsrate (Schüler 2006, Schüler 2022)

Dabei geht es nicht darum, natürliche Gewässerläufe oder einen naturnahen Wasserhaushalt zu verändern. Es sollen vielmehr aus menschengemachten infrastrukturellen Linienstrukturen in Vorfluter mündende Abflussspitzen verhindert oder zumindest verzögert, und möglichst viel Wasser in der Fläche zurückgehalten werden, so dass es dort den Bäumen, bzw. der Grundwasserneubildung zugutekommt. Dies bedarf einer eingehenden Standorts- und Wasserhaushaltsanalyse, um regional angepasste und effektive Maßnahmen zu ergreifen. Im Waldbau geht es darum die Niederschlagsenergie zu brechen. Mit einem Bodenschutzkonzept soll die Infiltration von möglichst viel Oberflächenwasser ermöglicht werden. In und auf allen linienhaften Infrastruktureinrichtungen, wie Wegen, Gräben und Feinerschließungslinien sollte jeglicher Linienabfluss vermieden und/oder in den benachbarten Waldflächen versickert werden. Schließlich sollten Hochwasserwellen sich in Bachauen, also in den natürlichen Retentionsräumen für Wasser, ausbreiten können, um solche Wellen zeitlich zu verzögern und zu entzerren.

Waldbaulich sind daher gut strukturierte, ökologisch stabile, naturnahe, möglichst standortangepasste und klimaresiliente Mischbestände anzustreben. Waldbestände aus winterkahlen Laubbäumen ermöglichen im Winter einen besseren Wasserzutritt zum Waldboden, und sie erlauben wegen verminderter Interzeption außerhalb der Vegetationsperiode eine höhere Grundwasserneubildungsrate. Noch vorhandene labile Waldbestände sind im Voraus zu unterbauen bzw. zu verjüngen, um ggf. im Katastrophenfall bereits einen Grundbestand an Vegetation zu behalten. Katastrophenflächen, z.B. nach Borkenkäferkalamitäten, dürfen nicht flächig befahren werden, und bei Aufräumarbeiten sollte möglichst viel Totholz, Ast- und Reisigmaterial auf der Fläche verbleiben, welches einen Oberflächenabfluss zumindest teilweise abbremsen kann. Besteht jedoch die Gefahr, dass stärkeres Totholz in nahegelegene Bäche und Flüsse geschwemmt werden kann, so sollte dieses wegen möglicher Verklausungsgefahren an Brücken und ähnlichen Hindernissen aus der Fläche entfernt werden. Kahllagen selbst sollten möglichst

zeitnah wiederbestockt werden unter Ausnutzung der natürlichen Sukzession (Schüler 2022).

Biologisch aktive und durch Befahrung unbelastete Böden besitzen ein wasseraufnehmendes primäres Porensystem. Dieses Porensystem ist durch umfangreiche Bodenschutzmaßnahmen vordringlich zu erhalten. Die Infiltrationsmöglichkeit von Wasser kann durch eine moderate und standortsangepaßte Bodenschutzkalkung wegen einer dadurch ausgelösten verbesserten Durchwurzelung und einer gesteigerten Bioturbation verbessert werden (Schüler 2002, Schüler et al. 2007).

Eine andere Maßnahmengruppe betrifft die Basiserschließung von Waldgebieten, also das Waldwegenetz mit wegebegleitenden Gräben (Backes et al. 2007, Landesforsten Rheinland-Pfalz 2018). Grundsätzlich muss die Wegenetzdichte hinsichtlich ihrer Notwendigkeit beurteilt werden. Ggf. sind nicht benötigte Wege aufzulassen und wenn sie eine Wassersammelfunktion aufweisen auch zurückzubauen. Beim Wegeneubau, oder überall dort wo neue Wegestrukturen geschaffen werden, sind Einwirkungen auf das Grundwasser und die Wasserführung im Einzelfall zu prüfen (Landesforsten Rheinland-Pfalz 2018). So sollte immer zur Disposition stehen, ob überhaupt wegebegleitende Gräben benötigt werden, um zum Beispiel eine ganzjährige Befahrung mit Holzabfuhrfahrzeugen zu gewährleisten. Voraussetzung für Waldwege ohne wegebegleitende Gräben ist ein erhöhtes Wegerundprofil (Landesforsten Rheinland-Pfalz 2018), welches - auch bei Gefälle - eine breitflächige Entwässerung in den angrenzenden Wald ermöglicht. Ein einseitiges Wegequerprofil kann zwar sehr effektiv Wasser vom Wegekörper flächig in den talseitigen Wald leiten. Diese Wege sind jedoch zeitweise, zum Beispiel bei Frost und

Eis, nicht befahrbar. Auf der Bergseite können Spitzgräben überschießendes Wasser aufnehmen. Trapezförmige wegebegleitende Gräben sind grundsätzlich zu vermeiden, da sie sehr viel Wasser aufnehmen und kurzgeschlossen ableiten können, was die Gefahr der Abflusskonzentration und Abflussspitzen steigert. Bevor sich fließendes Wasser auf der Bergseite der Wege sammelt, ist dieses Wasser in breiten diagonalen Vertiefungen über den dort zusätzlich befestigten Wegekörper auf die Talseite zu leiten und flächig im angrenzenden Waldbestand zu verteilen. Wasserableitungen durch Rohrdurchlässe (Dolen) konzentrieren Wasser in linearen Abflüssen (mit Tiefenerosion). Daher sollten mindestens so viele Durchlässe einen Wegekörper queren, dass sich in bergseitigen Gräben kein Wasser ansammelt. Besser ist es komplett auf Durchlässe zu verzichten, denn hydrologisch deutlich sinnvoller sind Rigolen, die das Wasser durch den aus Grobschlag aufgebauten Wegeunterbau hindurchleiten und dann hangabwärts im Wald versickern lassen. Dabei wird der Wegekörper auf einer Strecke von mehreren Metern und einer Tiefe von bis zu einem Meter ausgebaggert und mit Grobschlag ohne feinere Korngrößen aufgefüllt (Backes et al. 2007). Darüber kann dann eine Tragdeckschicht aufgebracht werden, sofern diese Wege nicht nur als reine Maschinenwege benötigt werden. Hangparallele Wege, die das Hangzugswasser (Interflow) abschneiden und den Wasserhaushalt so erheblich stören, können auch komplett als „Rigole“ ausgebaut werden.

Auch können als Notmaßnahme Versickerungs- und Verdunstungsmulden auf weniger durchlässigen Böden überschüssiges Wasser aufnehmen. Solche bis 1 m tiefe und 3 – 6 m³ fassende Mulden müssen jedoch in sehr kurzem Abstand angelegt werden, um deren Aufnahmekapazität nicht zu überschreiten.

Da diese Mulden bei Starkregenereignissen überborden können, sollte nach Möglichkeit ein Überlauf in den angrenzenden Waldbestand angelegt werden. Selbst größere Rückhalteteiche mit einem Fassungsvermögen von 200 bis 2000 m³ können sinnvoll sein (OPPERMANN 1993). Diese müssen jedoch im Hinblick auf die Standfestigkeit und Statik genau vorgeplant werden. Je größer das Volumen des Wegeabflusses wird, desto unwahrscheinlicher wird jedoch eine rasche Versickerung in solchen Flutmulden. Wenn viele Mulden erforderlich sind, können diese in einem terrassenförmigen Netzwerk miteinander verbunden werden (SCHÜLER 2003). Bei der Anlage von Sicker- und Verdunstungsmulden sind Belange des Naturschutzes und mögliche wasserrechtliche Genehmigungsverfahren zu beachten.

Nach dem Handbuch Walderschließung (Landesforsten 2018) dürfen Waldböden mit schweren Forstmaschinen zur Holzernte und zum Vorliefern von Holz nur auf festen Linien (Maschinenwege und Rückegassen mit einem Regelabstand von 40 m zueinander befahren werden, um eine flächige Bodenverdichtung und Schädigung des wasseraufnehmenden Bodenporensystems zu vermeiden (HILDEBRAND 2002). Die Realität zeigt jedoch, dass oft vom Regelabstand abgewichen, zum Beispiel bei der Feinerschließung von Hangflächen, bei Hindernissen, oder wenn noch alte Rückegassen vorhanden sind. Trotzdem sollte das Netz aus Rückegassen nie eine Fläche von mehr als 13,5 % der bewirtschafteten Waldfläche überschreiten. Es ist zu beachten, dass selbst eine „technische“ Befahrbarkeit von Rückegassen nicht mehr zu tolerieren ist,

- bei Bodenstrukturveränderungen in der Rückegasse mit plastischem Bodenfließen,
- bei stehendem Wasser in der Fahrspur,
- bei Erosion und
- bei Beeinträchtigung der Waldästhetik (Landesforsten Rheinland-Pfalz 2018)

Wegen dem erheblichen Risiko von Oberflächenabfluss und Erosion von und auf Rückegassen müssen gerade dort möglichst alle Bodenschäden vermieden werden. Daher ist bei mechanisierten Waldarbeiten immer die neueste bodenschonende Technik einzusetzen. Besteht dennoch die Gefahr von linienhaftem Oberflächenabfluss und von Erosion, zum Beispiel in hängigem Gelände oder bei befahrungsempfindlichen Bodensubstraten, muss auf alternative Holzernte- und Rücketechniken (z.B. motor-manuelle Holzaufarbeitung und Seilkräne) ausgewichen werden (GAUMITZ 1991).

Grundsätzlich sind nach jeder Holzerntemaßnahme insbesondere auf Rückegassen Spurgleise zu beseitigen und im hängigen Gelände Wasserrückleitungsvertiefungen diagonal durch die Rückegasse in den benachbarten Wald anzulegen, um so Erosion oder Oberflächenabfluss zu vermeiden. Dies kann mit dem Polterschild eines Forstschleppers geschehen oder mit einer gesonderten Maßnahme nach der Holzernte und -bringung (Schüler 2022).

Die schützenswerten Quell- und Hangbruchbiotop und Moore mit ihren Moorwäldern sind charakteristische Naturelemente in unseren Mittelgebirgen und einzigartige Lebensraumtypen, die der Erhaltung der biologischen Vielfalt dienen. Den Quellmooren, Hangbrüchern und Waldmooren wird wegen ihrer an vorhandenes Wasser gebundenen Eigenschaften oft auch ein Schutz gegen raschen Oberflächenabfluss zugeschrieben. Um diese nassen Standorte für eine auf Produktion ausgerichtete Forstwirtschaft zu gestalten, wurden jedoch seit dem 19. Jahrhundert in den hochsensiblen Moorwaldflächen des Hunsrücks systematisch Netze von Entwässerungsgräben angelegt und unterhalten (Hoffmann 1957, Schultheiß, J. 2014 und 2016). Um die typischen Eigenschaften der

Hangmoore wiederzugewinnen, wurden diese Entwässerungsgräben auf vielen Flächen in jüngerer Zeit verschlossen (Gallus et al. 2007). Allerdings reagiert der oberflächennahe Durchfluss in den Hangmoorbereichen fast ohne zeitliche Verzögerung auf Niederschlagsereignisse, und er kann auch innerhalb von wenigen Stunden nach Beendigung eines Niederschlagsereignisses deutlich zunehmen (Zemke 2018). Auch bei anderen anthropogenen Störungen des Wasserhaushaltes auf diesen Nassstandorten, wie Wegebau mit Wegebegleitgräben oder Konzentration des freien Wassers durch Rohrdurchlässe sowie die flächige Entnahme des aufstockenden Waldbestandes und damit Entnahme des Verdunstungsschutzes hat immer eine Abflussreaktion fast ohne zeitliche Verzögerung zur Folge (Schüler et al. 2020). Aus gestörten Hangbrüchern und Mooren fließt das Wasser in stark ausgeprägten Peaks ab. Renaturierungsmaßnahmen können den Oberflächenabfluss regulieren, insbesondere, wenn Drainage- und Wegebegleitgräben, die zur Tiefenerosion neigen und nicht Teil des natürlichen, reliefbedingten und permanent vorhandenen Entwässerungssystemes sind, verschlossen werden. In naturnahen Hangbrüchern und Waldmooren ist der Abfluss oft ausgeglichen und ohne deutliche Abflusspeaks (Schüler et al. 2020).

Da Hochwasserwellen auch in unbewirtschafteten Wäldern – in Abhängigkeit von den auslösenden meteorologischen Ereignissen und den Standortsbedingungen - entstehen können, und weil auch die beste Waldbewirtschaftung starke Abflusspeaks nicht verhindern kann, muss dem abfließenden Wasser Platz gegeben werden, wo es möglich ist. Um den Abfluss so lange wie möglich hinauszuzögern, sollte eine Abflusswelle in ausreichend dimensionierte Retentionsräume, wie Bach- und Flusstäler, eingeleitet

werden (KOEHLER 1998). Hier muss sich im Falle von Sturzfluten und Abflusspeaks Oberflächenwasser in der gesamten Fläche verteilen können, um diese Spitzen zu brechen und zeitlich zu verzögern (Sartor & Kreiter 2007, Segatz 2007). Die natürliche Struktur von Waldbächen, Flüssen und Bach- wie Flusssauen muss daher geschützt, gefördert oder wiederhergestellt werden. Die Fließlinien, die Sohlstruktur sowie der Zustand der Ufer und der Vegetation in den Tälern sollten daher so natürlich wie möglich sein. Natürliche Bäche und Flüsse haben oft einen unregelmäßigen, mäandrierenden Verlauf, ein reichhaltig und vielfältig strukturiertes Flussbett und eine entsprechende Ufervegetation. Die Bepflanzung mit Weiden in Wellenbrechern und Bühnen als Fließhindernis und Strömunglenker zur Unterstützung der Mäandrierung von Bächen und Flüssen ist eine biologisch-technische Maßnahme, um einen naturnahen Zustand von Flüssen und Auen wiederherzustellen und so das Flusstal als Retentionsraum zurückzugewinnen (SCHÜLER 2003). Solche Maßnahmen bedürfen jedoch u.U. einer wasserrechtlichen Genehmigung. Waldwege in Überschwemmungsgebieten und Bachauen schränken deren Retentionsvermögen ein. Wenn neue Straßen oder Waldwege entlang von Bach- und Flussläufen gebaut werden, sollten sie weit genug vom Fluss entfernt sein, um einen Konflikt zwischen Flussentwicklung und Wege- und Straßenbau zu vermeiden (Forstverwaltung Rheinland-Pfalz 2002). Alte Wege entlang von Flussläufen sind zu deaktivieren oder sogar zurückzubauen, so dass sich Spitzenabflüsse während der Hochwasserentstehungsphase über die gesamte Talsohle ausbreiten kann, ohne jedoch einen Rückstau zu erzeugen, der ggf. Oberlieger gefährden kann. Daher sollte sich die Flächennutzung in den Überschwemmungsgebieten immer an der Wasserstandsdynamik

in den Tälern orientieren.

Dem Hochwasserschutz dienen auch künstliche Kleinretentionsräume, zum Beispiel, wenn Wegedämme Fließgewässer kreuzen, Rückhaltebecken oder ehemalige Fischteiche in engen Kerbtälern (MUTH et al. 2001; WESTRICH und SIEBEL 2004). In einer größeren Anzahl terrassenartig hintereinandergeschaltete Rückhaltebecken, aus denen eine Abflusswelle jeweils in das nächste Rückhaltebecken überborden kann, verzögern auch bei nur geringem Einstauvolumen den ungebremsten Abfluss einer Hochwasserspitze (Sartor & Kreiter 2007). Kleinrückhalte sollten sich allerdings auch wieder antizyklisch zur Wasserwelle durch Mönche mit kontrolliertem Auslauf oder gering dimensionierte permanente Durchlässe entleeren können (ASSMANN und GÜNDRA 1999).

In Anbetracht der zunehmenden Trockenperioden in der warmen Jahreszeit (Reiter et al. 2020), muss neben den Retentionsräumen für Hochwasserwellen auch ein Fokus auf Feuerlöschteiche zur Löschwasserversorgung bei möglichen Waldbränden gelegt werden, so dass auch immer wieder einzelne mit Wasser gefüllte Löschwasserteiche verbleiben, wenn sie strategisch günstig gelegen, eine kurze Pendelstrecke zwischen Wasserentnahmestelle und möglichem Einsatzort zur Waldbrandbekämpfung aufweisen und wenn sie im Falle eines Waldbrandes ausreichend Löschwasser vorhalten können. Die Anforderungen an ausgewiesene Löschwasserteiche sind in der DIN14210 ausgewiesen. Für die Löschwasserbevorratung eignen sich auch natürliche offene stehende Gewässer mit eingerichteten Wasserentnahmestellen (Petersmann 2022).

Zur Ausnutzung eines effektiven Wasserrückhalte- und -speichermögens im Wald müssen alle örtlich möglichen Maßnahmen ergriffen werden – und zwar beginnend nahe

am Ort der Abflusentstehung. Werden alle Teileinzugsgebiete eines größeren Einzugsgebietes im Hinblick auf den Wasserrückhalt bewirtschaftet, kann das Auftreten von schadhafte Hochwassern reduziert werden. Das Schlüsselwort ist "reduziert", denn wenn großräumige extremklimatische Situationen Hochwasserwellen auslösen, müssen übergeordnete räumliche Hochwasserschutzplannungen die jeweilige Gefahrenschwelle in Abhängigkeit vom Schadenspotenzial in den Einzugsgebieten prognostizieren, um entsprechende Schutzmaßnahmen einleiten zu können. Ab einer gewissen Schwelle sind die Hochwasserwellen so groß, dass selbst die Kombination verschiedener Landnutzungsmaßnahmen nur noch einen untergeordneten Einfluss auf den Gesamtabfluss haben. Ab da schützen nur noch technische Maßnahmen und Vorwarnsysteme. Dieser Schwellenwert hängt von der meteorologischen Situation, vom Standort und seiner Wasserspeicherkapazität, damit vom Boden, von der Geologie, von der Landnutzung und der Landschaftsmorphologie ab. (Schüler 2006)

Grundsätzlich darf sich die Hochwasservorsorge auch nicht nur auf forstwirtschaftliche Konzepte beschränken. Eine sinnvolle Hochwasservorsorge erfordert in allen unterschiedlichen räumlichen Ebenen das Zusammenwirken von Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Weinbau sowie der Raum- und Infrastrukturplanung und -bewirtschaftung im Siedlungs- und Verkehrsbereich in Verbindung mit der Raumordnung und der Innenpolitik in einem echten ökohydrologischen Ansatz.

Hinweis: Bei Interesse kann das Literaturverzeichnis bei Prof. Schüler angefordert werden (Email: schueler_forestclim@yahoo.de oder gebhard.schueler@wald-rlp.de)