

STEUERUNG DES OBERFLÄCHENABFLUSSES DURCH STANDORT- OPTIMIERTE WALDBEWIRTSCHAFTUNG

SURFACE RUNOFF CONTROL BY ADEQUATE FOREST MANAGEMENT

Bernhard Kohl¹, Ralf Klosterhuber², Manfred Hotter², Gerhard Markart¹

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluss der Vegetation auf den Wasserkreislauf ist mannigfaltig. Aus biologischen, geometrischen, energetischen sowie hydrologischen Gründen sind Evaporation, Transpiration und Interzeption jeder Pflanze und jedes Bestandes unterschiedlich. Aus einer Vielzahl an Beregnungsexperimenten am Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald-, Naturgefahren und Landschaft (BFW) konnten drei Hauptkomponenten für die Abflusssentstehung abgeleitet werden: (1) Initialabstraktion und Wasserspeicherung, (2) Abflussbeiwert in Abflusskonstanz und (3) Oberflächenrauheit.

Im Rahmen des Projektes :nab (Naturpotentiale alpiner Berggebiete), gefördert von der Gemeinschaftsinitiative INTERREG IIIB des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und beauftragt durch die Gruppe Forst im Amt der Tiroler Landesregierung, wurde vom Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung (WLM) die Walddtypisierung und Waldstratifizierung Tirol durchgeführt. Alle Waldtypen dieser Modellierung wurden hinsichtlich ihres hydrologischen Potentials beleuchtet. Unter der Vorstellung durchschnittlicher, relativ reifer Bestände wurden diese Waldtypen als hydrologische Reaktionseinheiten (HRE) attribuiert. Die zuvor angesprochenen drei Hauptkomponenten für die Abflusssentstehung wurden für jede HRE unter Berücksichtigung von topographischen Parametern (Morphologie, Exposition, Neigung und Strahlung), Bodenparametern (Textur, Skelettgehalt und Gründigkeit) sowie Vegetationsparametern (Artenzusammensetzung, Frequenz und Deckungsgrad) zugeordnet. Aktuelle Kartierungen (Abflussbeiwert, Oberflächenrauheit) nach Markart et al. (2004) im Einzugsgebiet Enterbach Inzing / Tirol wurden für den Vergleich und die Validierung dieser HRE – Standortspotentiale herangezogen.

Die Auswirkung unterschiedlicher hydrologischer Eigenschaften zwischen aktueller Ausstattung und Standortspotential wurde an ausgewählten Waldtypen am Computermodell simuliert. Die hydrologische Wirkung einer multifunktionalen Forstwirtschaft auf Einzugsgebietesebene hängt sehr stark von der aktuellen und potentiellen Waldausstattung und zudem von möglichen Überregnungsszenarien dieser Flächen im Einzugsgebiet ab. Modellrechnungen eines Bemessungsereignisses der Jährlichkeit 100 für das Testgebiet Enterbach zeigen eine substantielle Reduktion der Abflussspitze um 15 Prozent im Vergleich der aktuellen und potentiellen Waldsituation.

¹ Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Abteilung Gebietswasserhaushalt, A-6020 Innsbruck, Rennweg 1 – Hofburg, bernhard.kohl@uibk.ac.at; gerhard.markart@uibk.ac.at

² WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung; A-6020 Innsbruck, Innstrasse 23, manfred.hotter@wlm.at; ralf.klosterhuber@wlm.at

Die Vegetationsdecke, im speziellen die Waldausstattung, bietet eine effiziente, ökonomische und nachhaltige Steuerungsmöglichkeit für den Hochwasserschutz am Ort der Abflussbildung. Der dargestellte Ansatz unterstützt den Ausbau eines integralen multifunktionalen Schutzwaldmanagements hinsichtlich des Schutzes vor Hochwasser, welcher zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Keywords: Multifunktionale Forstwirtschaft, präventiver Hochwasserschutz, Oberflächenabfluss

ABSTRACT

The influence of vegetation cover on hydrologic cycle is variate. Evaporation, transpiration and interception differ for each plant and habitat for biologic, geometric, energetic and hydrologic reasons. Three main factors influencing flood generation have been deduced from analysis of a multitude of rain simulation experiments carried out at the Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape (BFW): (1) initial abstraction and water storage, (2) surface runoff coefficient and (3) surface roughness.

Within the project :nab Natural Potential of Alpine Regions, co-financed by the Eu-Initiative INTERREG IIIB – Alpine Space, and by order of the regional forest authority Tyrol the forest typing and forest stratification Tyrol was carried out by WLM. The forest types of this modelling approach have been evaluated concerning their hydrologic potential. The different forest types, considered as relatively mature habitats at an average, have been attributed as hydrological response units (HRU). The three main factors mentioned above have been assessed for each HRU, taking into account topographic parameters like morphology, exposition, slope and radiation as well as soil properties like texture, soil skeleton and depth and further vegetation spectrum with its coverage and frequency.

Current mapped parameters served for comparison with the habitat potential. Subject to vegetation, soil properties and land use surface runoff coefficient and surface roughness have been estimated within the test site Enterbach, Inzing / Tyrol according to Markart et al. (2004).

The differences in hydrological properties between habitat potential and current forest situation have been simulated for a couple of selected forest types at the plot scale. At the catchment scale the hydrological effects of a flood-protection functional forest management is strongly depending on current and potential forest area and moreover how relevant rain scenarios cover this area. In our test site simulation of a recurrent design event with a return period of 100 years showed a substantial reduction of the flood peak of about 15% comparing hydrological habitat potential and current situation.

Vegetation, especially forest cover is an efficient, economic and sustainable control factor for preventive flood protection at the point of origin of runoff. The shown approach helps to expand integral multi-functional protection forest management with the forest function flood protection that is becoming more and more important.

Keywords: multi-functional forest management, preventive flood protection, surface runoff

EINLEITUNG

Erklärte Ziele des Interreg IIIB Projekts :nab (Naturpotenziale alpiner Berggebiete) waren unter anderen die Entwicklung von Leitlinien zur schutzfunktionalen Bewirtschaftung von Bergwäldern durch eine flächige Beurteilung der Wirkungen von Standort, Vegetation, Wasserhaushalt und Landnutzung zum Schutz vor Hochwasser, Erosion und Muren sowie die

Entwicklung von Analyse- und Planungsinstrumenten zur Bewertung von Wildbacheinzugsgebieten und die Schaffung transnationaler Standards.

Im vorliegende Projektteil sollte der Versuch unternommen werden, modellierten Waldtypen (Waldtypisierung und Waldstratifizierung Salzstraße, HOTTER, 2006) aktuelle und potentielle Oberflächenabflussbeiwerte und Oberflächenrauigkeitsklassen zuzuordnen und damit die Auswirkungen künftiger Zustandsänderungen im Boden-Vegetationskomplex auf den Oberflächenabfluss speziell in Waldflächen als auch im gesamten Einzugsgebiet darzustellen.

Fragestellung

Eine naturnahe, standortgerechte und nachhaltige Forstwirtschaft wirkt sich positiv auf den Hochwasserschutz aus (GÖTTLE, 2006). Generell wird Wald im Vergleich mit anderen Vegetationstypen günstiger in Bezug auf Abflussminimierung angesehen. Es soll hier jedoch differenziert betrachtet werden, wo welcher Waldstandort in welchem Ausmaß eine Abflussminderung bewirken kann. Wie viel kann im Waldgebiet zukünftig nach Änderung der Abflussbedingungen durch Bewirtschaftungsmaßnahmen zurückgehalten werden, und in welchem Ausmaß wirkt sich dies auf die Hochwasserwelle im Einzugsgebiet aus?

Zielsetzung

Vorrangiges Ziel des Projektes war es, für großflächig, relativ rasch und kostengünstig modellierbare Waldtypen Aussagen über ihr Verhalten gegenüber konvektiven Starkregen treffen zu können bzw. waldbezogene Eingangsdaten für die Simulationen von potentiellen Oberflächenabflüssen (z.B. als Datenbasis für Niederschlag-Abflussmodelle) zu erhalten. Die Studie wurde in dem hydrologisch abgegrenzten Einzugsgebiet des Enterbaches durchgeführt, für welches terrestrisch kartierte aktuelle Abflussbeiwert- und Rauigkeitsklassen (KOHL et al., 2006) erhoben wurden. Die Karte der potenziellen Abflussbeiwerte sollte der Kartierung des aktuellen Zustandes gegenübergestellt und die hydrologischen Parameter interpretiert werden. Hieraus sollte eine flächenbezogene Prioritätenreihung für die funktionale Schutzwaldbewirtschaftung in Bezug auf Hochwasserschutz ableitbar sein. Die Ergebnisse liefern Informationen über die hochwasserrelevanten Gebietscharakteristika bezüglich der Faktoren Vegetation und Boden. Der Einfluss der geologischen Ausstattung des Einzugsgebietes (NITTEL et al. 2005) wird bei den potenziellen Abflussbeiwerten nicht direkt sondern über die waldtypenspezifischen Bodentypengruppen beurteilt.

OBERFLÄCHENABFLUSS

Allgemeines, Wirkung des Waldes

Bewaldeten Flächen wird in der Regel eine hohe abflussdämpfende Wirkung zugesprochen. Durch die gegenüber anderen Nutzungen erhöhte Interzeption und die starke Transpiration von Waldbeständen ist die Bodenfeuchte unter Waldbeständen im Sommer und Herbst in der Regel geringer als im Umland, was in diesem Zeitraum ein erhöhtes Aufnahmevermögen des Bodens für Wasser zur Folge hat. Die Art der Bewirtschaftung des Waldes hat einen potenziell größeren Einfluss auf das Abflussverhalten von Waldflächen als die An- oder Abwesenheit des Waldes an sich. Zu den Einflussfaktoren der forstwirtschaftlichen Nutzung auf den Hochwasserabfluss zählen vor allem:

- Weitgehende Bodenversiegelung durch Wegebau.
- Verdichtung des Bodens (durch Befahrung mit hohen Achslasten bzw. im alpinen Raum durch intensive Waldweide).
- Anlage von Entwässerungsgräben.
- Erhöhte Anfälligkeit für Waldschäden in ökologisch labilen forstlichen Monokulturen.

Die Pflanzendecke selbst trägt in mehrfacher Hinsicht zur Verminderung und Verzögerung von Hochwasserabfluss bei:

- Vorübergehende Speicherung und Verdunstung von Niederschlagswasser an Pflanzenoberflächen und damit Verminderung des Hochwasservolumens.
- Verzögerung von Oberflächenabfluss durch Erhöhung der Rauigkeit der Bodenoberfläche.
- Tendenzielle Verbesserung der Infiltrationsbedingungen durch Wurzelgänge.
- Dämpfung des an der Bodenoberfläche auftreffenden Niederschlages und damit Schutz vor Verschlämmung und Verdichtung der Bodenoberfläche sowie deren negativen Folgen für die Infiltration von Niederschlagswasser.
- Verhinderung von Krustenbildung an der Bodenoberfläche durch Schutz vor Austrocknung des Oberbodens.

In der Vergangenheit wurde die hochwasserdämpfende Wirkung von Wald häufig sehr undifferenziert gepriesen. Dass diese Wirkung nicht zwangsläufig zum Tragen kommt, wird durch den starken Einfluss von Bodenmächtigkeit, -textur und -lagerung auf die Hochwasserentstehung erklärt. Je nach Untergrund, auf dem sich ein Boden entwickelt, übt der Wald eine mehr oder weniger starke Wirkung auf die Speicherkapazität aus (HEGG, 2006). Stockt der Wald auf geringmächtigen Böden mit grobem Substrat, so können unterirdische Fließprozesse auch auf Waldflächen eine rasche Abflussreaktion hervorrufen.

Wie sehr der Einfluss des Waldes gegenüber den geomorphologischen Rahmenbedingungen eines Gebietes in den Hintergrund treten kann, wird auch durch aktuelle Untersuchungen belegt (z.B. KOHL et al., 2008, BESCHTA et al., 2000). In großen Einzugsgebieten und bei sehr seltenen Ereignissen ist der Einfluss der Bewaldung bzw. von Kahlschlägen auf die Hochwasserentstehung nicht mehr zweifelsfrei nachweisbar.

Der Einfluss der Vegetation auf den Wasserhaushalt ist mannigfaltig: Evaporation, Transpiration und Interzeption sind aus biologischen, geometrischen, energetischen und hydrologischen Gründen für jede Pflanze und jeden Bestand individuell verschieden. Über die Bodenbildung werden von der Vegetation Tiefensickerung, Kapillaraufstieg, sowie Zu- und Abfluss im Boden beeinflusst. Die Boden-/Vegetationsoberfläche selbst nimmt in Bezug auf die Abflussbildung eine Schlüsselstellung ein. Sie entscheidet häufig darüber, ob das Wasser infiltrieren kann oder Oberflächenabfluss entsteht. In vielen Fällen steuert die Vegetation die Auswirkungen des Wassers auf das Abtragsgeschehen und auf die Abtragsbereitschaft, da die hydrologischen Standorteigenschaften durch die Vegetation beeinflusst werden. Die Pflanzendecke ist also maßgeblich mit der Infiltration bzw. der Bildung von Abfluss verknüpft. Aus einer Vielzahl an Beregnungsexperimenten am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen, des Bundesforschungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und den begleitenden vegetations- und bodenkundlichen Untersuchungen lassen sich für den Hochwasserabfluss drei wesentliche Einflussgrößen zusammenfassen. Ein Starkregen, im Beispielfall ein einstündiger Niederschlag mit einer Regensumme von 100 mm pro Stunde, erzeugt auf einer Homogenfläche nach einer **Abstraktionszeit** eine trapezförmige oder schiefwinkelige Abflussganglinie. Der Anstieg dieser Ganglinie ist, neben den topographischen Standortparametern Hangneigung und Hanglänge sowie der Fließmenge, wesentlich von der Oberflächenrauigkeit (**Rauigkeitsklasse RKL**) abhängig. Die Fließmenge ist durch den Parameter Oberflächenabflussbeiwert (**Abflussbeiwertklasse AKL**) charakterisiert. Inhomogenitäten, wie sie in nahezu allen natürlichen Vegetations-/Bodenkomplexen anzutreffen sind führen zur Ausrundung der Trapezganglinie mit längeren Nachlaufzeiten.

Initialabstraktion, Wasserspeicherung

Die Abstraktion entspricht jener Niederschlagshöhe, die erforderlich ist, um einen Direktabfluss zu erzeugen. Sie beinhaltet all jene Wasserverluste, die für die Bestimmung extremer Hochwässer zu berücksichtigen sind. Zu diesen so genannten Wasserverlusten von Niederschlägen zählen das Haftwasser an Boden und Vegetation (Interzeption), die

Verdunstung an Boden und Vegetation (Evaporation), der aktive Wasserverbrauch der Pflanzendecke (Transpiration), der Wasserrückhalt in Bodenebenenheiten (Muldenpeicher), das Versickern (Infiltration) und schließlich der unterirdische Abfluss. Für den unterirdischen Abfluss ist die Wasserspeicherung des Bodens von wesentlicher Bedeutung. Beide Größen, die Summe der Anfangsverluste und das Speicherpotenzial des Bodens sind neben den klimatischen Vorbedingungen (Vorfeuchte) im Wesentlichen von der Pflanzenausstattung des Standortes abhängig.

Hier sind die entscheidenden Fragen, wie viel Wasser im Starkregenfall im System gebunden werden kann und wie schnell der Standort dieses Speicherpotenzial für ein neuerliches Niederschlagsereignis wieder zur Verfügung stellen kann? Wie rasch entsteht Oberflächenabfluss und wie viel Regenwasser gelangt in den unterirdischen Abfluss?

Abflussbeiwert

Unter dem Begriff Abflussbeiwert verstehen wir das Verhältnis Niederschlag zu Abfluss in einem Zeitintervall der Abflusskonstanz. Dieser Gleichgewichtszustand zwischen Infiltration und Abfluss ist in unterschiedlichem Maß von den Faktoren Vegetation und Boden geprägt. Die Vegetation als Ausdruck historischer wie aktueller Landnutzung kann die Infiltrationsleistung des unterliegenden Bodenkörpers gänzlich überprägen. Beispielsweise führen hydrophobe Effekte nach Austrocknung von Moderhumusaufgaben unter dichten Fichtenbeständen, dichter Wurzelfilz oder Strohdacheffekte der Totmasse von Borstgrasrasen zur Entstehung hoher Oberflächenabflüsse. Im Gegenzug fördert eine lockere hohe Durchwurzelung die Infiltration bis hin zum Makroporenfluss in abgestorbenen Wurzelkanälen. Der Bestand und seine Struktur nehmen also direkt oder indirekt - über seine Effekte auf den Boden - Einfluss auf den Oberflächenabfluss.

Aufbauend auf den Ergebnissen einer Vielzahl von Starkregensimulationen wurde in einer Kooperation vom Bundesforschungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und Bayerischem Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) eine "Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes alpiner Boden-/Vegetationskomplexes bei konvektiven Starkregen" (MARKART et al. 2004) entworfen. Unter Verwendung dieser Anleitung sollte es möglich sein, die dominanten Boden-/Vegetationskomplexe der Ostalpen ab der montanen Stufe einer von 7 Abflussbeiwertklassen zuzuordnen. Die wichtigsten Kriterien dafür sind hydrologische Bodeneigenschaften, Bodenvegetation und aktuelle Bewirtschaftung.

Unter dem Link <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=4343> ist die Geländeanleitung vom Netz ladbar. Für das gegenständliche Projekt erfolgte die Abschätzung der aktuellen Abflussbeiwertklassen nach obigem System anhand einer Kartierung des gesamten Einzugsgebietes im Maßstab 1:5.000.

Oberflächenrauigkeit

Eine oft deutlich unterbewertete Rolle im Bezug auf den Einfluss der Vegetation auf die Abflussbildung spielt die Rauigkeit der Oberfläche. Die Geschwindigkeit des Abflusses trägt maßgeblich zur Ausprägung der Abflussganglinie eines Hochwassers bei. Raue Oberflächen dämpfen die Hochwasserwelle, je länger das Wasser im Bestand verbleibt, desto positiver ist seine hydrologische Wirkung.

Unterschiedliche Rauigkeiten und damit Fließgeschwindigkeiten wurden während Starkregensimulationen über Salz- und Farbracerexperimente gemessen. Ähnlich der Geländeanleitung zur Abflussbeiwertschätzung wurde ein Schema zur Klassifizierung der Rauigkeit nach Art und Qualität des Bewuchses entworfen (MARKART et al. 2004).

Die Kartierung im Einzugsgebiet erfolgte auch für die aktuelle Rauigkeitsklasse entsprechend der Geländeanleitung nach obigem System.

Kriterien für die Bewertung des Wasserhaushalts von Waldtypen

Bodeneigenschaften und vegetationsökologische Parameter wurden als Kriterien für die Bewertung des Wasserhaushalts der 27 Waldtypen im Testgebiet Enterbach herangezogen (siehe Tabellen 1 und 2).

Initialabstraktion, Wasserspeicherung

Die Bewertung der Wasserspeicherung orientiert sich an der nutzbaren Wasserspeicherkapazität bzw. der Feldkapazität (nWSK) und dem Welkepunkt. Die Einstufung erfolgte anhand von Wasserspannungskurven (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1982) als verfügbares Haftwasser (Werte zwischen Feldkapazität und Welkepunkt). Das aktuelle *Speichervermögen* eines Bodens ist stark von den Feuchtebedingungen zu Beginn des Niederschlagsereignisses abhängig. Da der Bereich der Feinporen im humiden Klimabereich nur sehr selten entleert wird, kann jedoch bereits das Volumen der Mittelporen (bzw. Grobporen >10 Mikrometer) als maximal speicherbare Niederschlagsmenge angesehen werden. Als Kriterien für die Einteilung wurden Entwicklungstiefe (Gründigkeit), Skelettgehalt, Bodenart und Gehalt an organischer Substanz (gutachterlich, Erfahrungswerte und Aufnahmematerial) verwendet und wie folgt kalkuliert:

Nutzbare Wasserspeicherkapazität nWSK = (Gründigkeit * verbleibender Feinboden [100 – mittlerer Skelettanteil %] * mittleres Volumsprozent verfügbares Haftwasser) * 0,1.

Die Berechnung (379 Standortaufnahmen) ergibt einen numerischen Richtwert, der stark vereinfacht einem mittleren Wasseraufnahmevermögen entspricht. Zur Darstellung erfolgte die Einteilung in 5 grobe Klassen (siehe Tabelle 1). Die unterschiedliche Speicherfähigkeit des humosen Mineralbodens blieb dabei unberücksichtigt, ebenso die Wasserspeicherung im Auflagehumus. Diese wirkt sich vor allem bei Standorten mit mächtigen Humusaufgaben (Rohhumus, Tangel, Kalkmoder und organischen Böden) entscheidend auf die Wasserspeicherung aus und wurde getrennt berücksichtigt. Eine Absicherung der Einschätzung der Wasserspeicherung erfolgt durch Vergleich der Waldtypen untereinander. Mit Ausnahme weniger Standorte in Gewinnlagen bzw. Vernässungsstandorten werden die Kategorien „gering“ bis „mittel“ vergeben.

Tab. 1: Legende der Bodeneigenschaften (*nach OTT et al., 1997).

Tab. 1: Legend of soil properties

| | | | | | |
|--|-------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Gründigkeit | | | | | |
| cm | 0 - 15 | 15 - 30 | 30 - 60 | 60 - 120 | 120 - |
| Beschreibung | sehr flach | flach | mittel | tief | sehr tief |
| Skelettgehalt | | | | | |
| % | 100 - 80 | 80 - 40 | 40 - 20 | 20 - 10 | 10 - 0 |
| Beschreibung | überwiegend | s. hoch | hoch | mäßig | gering |
| Bodenart | | | | | |
| Schwereklassen | 1 (S, uS) | 2 (U, IS, sU) | 3 (IU, sL, tS) | 4 (L, sT, uL) | 5 (T, IT) |
| Beschreibung | sehr leicht | leicht | mittel | schwer | sehr schwer |
| Wasserspeicherung (aus Gründigkeit, Skelettgehalt und Bodenart abgeleitet) | | | | | |
| nWSK [mm] | 0-20 | 20-60 | 60-100 | 100-300 | 300-600 |
| Beschreibung | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch |
| Versickerung / Durchlässigkeit (aus Skelettgehalt und Bodenart abgeleitet) | | | | | |
| Klasse | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Beschreibung | sehr hoch | hoch | mittel | gering | sehr gering |
| Durchlässigkeit * | übermäßig | normal | leicht gehemmt | stark gehemmt | undurchlässig |

Abflussbeiwert

Die Darstellung der Bodeneigenschaften beim jeweiligen Waldtyp bezieht sich primär auf die vegetations- und bodenökologisch relevanten Größen Gründigkeit, Skelettgehalt und Bodenart. Zur Abschätzung des Abflussbeiwertes wurde insbesondere die Versickerung

(„Durchlässigkeit“ nach FREHNER et al. 2005) herangezogen. Von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Durchlässigkeit ist die *Luftkapazität* (Luftgehalt bei Wassergehalt der Feldkapazität; entspricht dem Volumen der nicht wasserhaltenden Grob- und Größtporen) welche in hohem Maße von Bodenart und Skeletgehalt beeinflusst wird.

Die Klassifizierung der Durchlässigkeit erfolge entsprechend anhand einer Kombination der am häufigsten vorkommenden Schwereklasse bzw. Bodenart für den jeweiligen Waldtyp mit der am häufigsten vorkommenden Skelettklassensklasse (Skelett >2mm; Berechnung ohne Felsanteil). Der mittlere Felsanteil des Standortes (100 % Abfluss) wird beim Abflussverhalten (genauso vegetationsloser Boden) gesondert berücksichtigt. Die Abstimmung mit vergleichbaren Waldstandorten von OTT et al. (1997) und FREHNER et al. (2005) ist möglich, zeigt aber manchmal unterschiedliche Einschätzungen. Versickerung „mittel“ in der Darstellung entspricht der Durchlässigkeit „leicht gehemmt“ (bis „normal“) bei OTT et al. (1997). Neben der Durchlässigkeit wurde für die Beurteilung des potentiellen Abflussbeiwertes das Kriterium *Bodenvegetation* verglichen. Es wurden die mittleren Deckungsgrade in Prozent der im Gelände angesprochenen Vegetationsschichten berechnet. Unter 70 % Deckungsgrad besteht nach FREHNER et al. (2005) ein erhöhtes Abfluss- und Erosionspotenzial. Durch die Zusammenführung der Wasserhaushalts- und Vegetations-Kenngrößen wurde der abflussbeiwert gutachterlich in Bezug zur Geländeanleitung nach MARKART et al. (2004) erschlossen.

Oberflächenrauigkeit

Ergänzend zur Beurteilung nach Erfahrungswerten und Berechnungsversuchen (siehe MARKART et al. 2004) wurden Mittelwerte für die Deckungen der Vegetationsschichten (Moos- und Flechtenschicht, Farn-, Kraut-, Gras- und Zwergstrauchschicht) eines jeden Waldtyps errechnet und als Kriterien für die Beurteilung der potentiellen Rauheit der Bodenoberfläche verwendet.

ERGEBNISSE

Den 27 im Einzugsgebiet vorkommenden Waldtypen wurde jeweils die Abflussbeiwertklasse (**AKLpot**) und die Rauigkeitsklasse (**RKLpot**) zugewiesen (vgl. Tabelle 2). Die Einstufung geht von einem Idealzustand eines ungleichaltrigen Dauerwaldes mit lockerem Bestandesschluß (Kronenschlußgrad 0,6-0,8 bei Fi-, Fi-Ta-, Fi-Ta-Bu- und Lh-Wäldern und 0,4-0,6 bei (Ei-)Ki-, Lä- und Zirbenwäldern), gut entwickelter und natürlicher Bodenvegetation, ausreichender Verjüngung aller Hauptbaumarten, vertikal und/oder horizontal strukturierten Beständen aus den Hauptbaumarten in den geforderten Anteilen der Potentiell Natürlichen Waldgesellschaft (PNWG) aus.

Die Klassifizierung von AKLpot und RKLpot wurde vorab anhand der Typus-Beschreibungen der Waldstratifizierung durchgeführt und in einer Diskussionsrunde mit den Boden- und Vegetationsauswertungen abgeglichen. Bei zwei Typen ergaben sich aufgrund des breiten Standortsspektrums Probleme: Der Warme Silikat-Fichten-Tannenwald (FT 11) kommt nicht nur auf gemäßigten Sonnseiten, sondern auch in der unteren Hochmontanstufe (mittelmontan) an extrem steilen, trockeneren und felsigen Hängen vor, welche einen höheren Abflussbeiwert hätte. (ähnlich FT 12), wurde aber vorerst nicht geteilt. Der Arme Silikat-Kiefern-Eichenmischwald Ei 7 (und eingeschränkt auch der Frische Silikat-Linden-Eschen-Stieleichenwald) kommt zwar meist auf sandig-kiesigen Terrassensedimenten vor, kann aber auch in einer nicht getrennt modellierten Ausbildung auf tonigem Substrat (Grundmoräne, Bänderton) vorkommen und wäre dann ebenfalls ungünstiger zu bewerten. Für alle aktuellen Waldflächen im Einzugsgebiet (Flächenkategorien Hochwald und Krummholz) wurde eine Karte der potenziellen Abflussbeiwertklassen erstellt. Nicht berücksichtigt werden konnten Flächen, die bei der Realraumanalyse Österreichs (SEGER

2001) und im Waldlayer der Österreichischen Karte 1:50.000 (ÖK 50) als Nichtwald aufscheinen (z.B. „Natürliche Rasen“, aktuell aber bereits wieder bestockte Schlagflächen oder Grünerlengebüsche).

Tab. 2: Vegetationsökologische Parameter für die Zuordnung von potenziellen AKL und RKL zu den Waldtypen.

Tab. 2: Vegetation ecological factors for classification of potential surface runoff (AKL) and potential surface roughness (RKL).

| Code | WST | AKLpot | RKLpot | WSPP | Boden | KS ges | ZwSt | Gräser | Farne | HoSt | Moos | WHH | VS | ÜS | n |
|------|--------|--------|--------|------|-------|--------|------|--------|-------|------|------|-----|----|-----|----|
| Bu11 | ZB2Bti | 0 | 2 | 4 | 76,4 | 21,6 | 0,8 | 7,0 | 3,2 | 2,3 | 2,0 | 4,0 | 2 | 8,8 | 5 |
| Ei1 | ZE2Qmi | 0 | 3 | 4 | 28,8 | 61,3 | 0,0 | 17,7 | 2,8 | 2,0 | 10,0 | 4,0 | 2 | 7,8 | 4 |
| E4 | wE3Qbr | 0 | 3 | 3 | 42,5 | 47,1 | 1,5 | 33,6 | 2,0 | 1,0 | 10,3 | 2,1 | 4 | 7,3 | 7 |
| Ei7 | dE1Qmy | 0 | 3 | 4 | 46,3 | 29,2 | 12,0 | 12,0 | 1,0 | 0,0 | 24,5 | 2,7 | 4 | 7,8 | 6 |
| Fs1 | dS1Smy | 0 | 6 | 4 | 0,0 | 68,3 | 41,0 | 18,1 | 6,8 | 10,0 | 45,0 | 4,3 | 4 | 6,1 | 39 |
| Fs17 | ZS2Sha | 1 | 4 | 3 | 33,9 | 34,7 | 4,2 | 15,1 | 10,0 | 1,0 | 31,4 | 4,4 | 4 | 6,2 | 7 |
| Fs2 | wS1Sva | 2 | 3 | 3 | 39,9 | 41,0 | 22,1 | 17,5 | 1,4 | 2,0 | 19,1 | 3,1 | 4 | 6,7 | 35 |
| FT1 | ZT2Tea | 0 | 4 | 3 | 32,5 | 38,1 | 8,2 | 17,8 | 4,7 | 2,6 | 29,4 | 3,7 | 3 | 7,5 | 41 |
| FT11 | dT1Tms | 1 | 4 | 3 | 44,3 | 18,9 | 16,9 | 5,8 | 2,5 | 1,0 | 36,9 | 2,9 | 4 | 7,2 | 16 |
| FT2 | dT1Tmy | 0 | 5 | 3 | 0,0 | 52,4 | 41,6 | 9,2 | 2,2 | 3,0 | 58,5 | 3,6 | 3 | 7,4 | 17 |
| FT9 | ZT3Tgr | 0 | 3 | 4 | 32,5 | 40,4 | 2,1 | 13,3 | 6,5 | 6,4 | 27,1 | 3,6 | 3 | 7,1 | 12 |
| Ki15 | WB1Kpf | 0 | 5 | 2 | 15,0 | 30,0 | 20,0 | 6,0 | 1,0 | 0,0 | 50,0 | 1,1 | 4 | 5,0 | 1 |
| Zi1 | dP1Zrf | 0 | 6 | 4 | 0,0 | 80,7 | 64,0 | 19,1 | 5,0 | 1,8 | 41,7 | 4,4 | 4 | 4,2 | 29 |
| Z4 | wP1Zlh | 0 | 6 | 2 | 26,8 | 62,9 | 32,3 | 33,7 | 1,0 | 1,4 | 10,4 | 3,2 | 4 | 5,4 | 14 |
| FT5 | nT2Tdr | 1 | 3 | 3 | 12,1 | 59,6 | 2,5 | 13,6 | 19,7 | 17,9 | 28,4 | 4,6 | 3 | 7,2 | 35 |
| Lh3 | RE2Eti | 1 | 4 | 3 | 38,9 | 55,5 | 1,0 | 9,3 | 9,4 | 17,6 | 5,6 | 4,3 | 4 | 8,0 | 11 |
| Fs10 | LS2Sav | 2 | 4 | 3 | 0,0 | 75,0 | 12,0 | 37,5 | 17,0 | 11,3 | 27,8 | 4,8 | 3 | 6,2 | 10 |
| Fs3 | DS1Scv | 2 | 4 | 3 | 5,7 | 56,1 | 21,5 | 34,4 | 4,4 | 4,7 | 38,2 | 3,9 | 3 | 5,9 | 24 |
| FT12 | DT1Trf | 2 | 6 | 3 | 23,8 | 43,3 | 18,7 | 21,3 | 5,1 | 2,0 | 32,9 | 3,7 | 4 | 6,7 | 19 |
| La5 | DP1Lev | 2 | 4 | 3 | 0,0 | 71,7 | 37,2 | 34,4 | 5,6 | 1,3 | 37,8 | 4,2 | 4 | 4,8 | 9 |
| La6 | LP2Lav | 2 | 3 | 3 | 0,0 | 88,9 | 20,3 | 45,9 | 18,6 | 16,8 | 18,5 | 4,9 | 3 | 4,4 | 11 |
| Lh5 | nE4Epa | 2 | 4 | 3 | 9,0 | 74,2 | 0,0 | 2,2 | 23,3 | 26,3 | 16,8 | 4,8 | 3 | 8,0 | 6 |
| Er2 | AT2Aap | 4 | 2 | 2 | 0,0 | 82,0 | 0,0 | 5,2 | 5,6 | 21,3 | 20,0 | 5,0 | 4 | 6,5 | 5 |
| Er3 | AE2Aai | 4 | 2 | 2 | 0,0 | 91,7 | 0,0 | 15,0 | 1,0 | 10,0 | 18,3 | 5,7 | 4 | 8,0 | 3 |
| Ge1 | LP2Gav | 4 | 4 | 2 | 0,0 | 85,0 | 17,3 | 35,0 | 14,5 | 27,5 | 35,0 | 5,0 | 4 | 6,8 | 4 |
| Fs11 | NS4Seq | 5 | 5 | 1 | 0,0 | 69,2 | 15,5 | 33,3 | 14,5 | 5,7 | 33,3 | 6,0 | 1 | 6,2 | 6 |
| Fi7 | NT0Fsp | 6 | 5 | 1 | 0,0 | 51,7 | 58,3 | 4,0 | 12,7 | 1,0 | 85,0 | 6,0 | 2 | 7,0 | 3 |

Abkürzungen:

Code...Waldtypencode Tirol; WST...Waldstratentyp (Codierung WLM); AKL...potentielle Abflussbeiwertklasse; RKL...potentielle Rauigkeitsklasse; WSPP...„Wasserspeicherpotenzial“ (Grobporenspeicher); Boden...Anteil vegetationsloser Boden (Baumschicht nicht berücksichtigt); KSGes...Krautschicht gesamt (Deckungs%); ZwSt...Zwergstrauchschicht (Deckungs%); Gräser...Grasschicht (Deckungs%); Farne...Farnschicht (Deckungs%); HoSt...Hochstaudenschicht (Deckungs%); Moos...Moos- und Flechtenschicht (Deckungs%); WHH...Wasserhaushalt gemittelt (Geländeansprachen des Gesamtwasserhaushalts = Geländewasserhaushalt und Klimafeuchte); VS...Versickerung (häufigster Wert, ohne Streuung; 5=sehr hoch, 1=sehr gering)); ÜS...Überschirmung Baumschicht gemittelt (Geländeansprachen in Zehntel); n...Anzahl der Aufnahmen für die Berechnungen

Schutzfunktionale Hinweiskarte Hochwasser mit Dringlichkeitsreihung

Als abschließender Schritt erfolgte der Verschnitt der potenziellen (vom Standort / Waldtyp abgeleiteten) mit den aktuellen (kartierten) Abflussbeiwertklassen, mit dem Ergebnis einer Dringlichkeitsreihung hinsichtlich Notwendigkeit, Wirksamkeit und Effizienz von Landnutzungs- bzw. – Waldbau-Maßnahmen zum Hochwasserrückhalt.

Erst dieser Verschnitt ermöglicht die Beurteilung der Chancen bzw. Notwendigkeiten von Nutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen in Hinblick auf Hochwasserrückhaltung und somit eine Prioritätenreihung der Waldflächen für die Einleitung von Maßnahmen. Durch Vergleich der Karte der aktuellen mit den potenziellen Abflussbeiwertklassen der natürlichen Waldtypen ergeben sich folgende Kombinationsmöglichkeiten für die „Schutzfunktionale Hinweiskarte Hochwasser mit Dringlichkeitsreihung“ (siehe Tabelle 3).

Tab. 3: Dringlichkeitsreihung (Priorität) durch Vergleich AKL aktuell und potenziell.

Tab. 3: List of main land use types (LN_Htyp ≡ hydrological response unit HRU) with surface ratio (hectare) for the land use scenarios 2005 and 1950 and change in percent.

| Prior | Bezeichnung | Definition | Farbe |
|-------|---|-------------------------------|------------|
| 6 | deutliche Verbesserung möglich | AKL pot. 0-1, akt. - pot. > 1 | Rot |
| 5 | kritische Standorte, deutliche Verbesserung möglich | AKL pot. 2-3, akt. - pot. > 1 | Orange |
| 4 | geringe Verbesserung möglich | AKL pot. 0-1, akt. - pot. = 1 | Hellorange |
| 3 | kritische Standorte, geringe Verbesserung möglich | AKL pot. 2-3, akt. - pot. = 1 | Gelb |
| 2 | kritische Standorte, keine Verbesserung möglich | AKL pot. 2-3, akt. = pot. | Grau |
| 1 | Problemstandorte, keine Verbesserung möglich | AKL pot. >3 | Dunkelgrau |
| 0 | Optimalzustand | AKL pot. 0-1, akt. = pot. | Dunkelgrün |

Legende zur Dringlichkeitsreihung (Priorität):

6: Flächen mit hohem Verbesserungspotenzial: In Flächen, die aktuell im Starkregenfall hohe Mengen an Oberflächenabfluss liefern, potenziell (naturnaher Zustand) jedoch ein sehr hohes Aufnahmepotenzial hätten, besteht die größte Chance, eine deutliche Verbesserung durch waldbauliche Maßnahmen zu erreichen, da sich das Waldökosystem von selbst in die gewünschte Richtung entwickeln würde (Probleme: Waldweide, Wildstände, Einbringung der Tanne etc.). Hier kann mit dem geringsten Aufwand der größte Nutzen erzielt werden.

5-4: Flächen mit unterschiedlichem Verbesserungspotenzial: Wie bei Priorität 6 ist an diesen Flächen mit relativem geringem Aufwand eine Verbesserung der hydrologischen Eigenschaften zu erzielen.

3: kritische Standorte mit geringem Verbesserungspotenzial: In Flächen, die aktuell und potenziell hohen Oberflächenabfluss erwarten lassen, müssen Ziele definiert werden, die unter Umständen vom naturnahen Zustand abweichen, oder technische Maßnahmen ergriffen werden. In diesen Flächen ist die Chance zu Verbesserungen durch waldbauliche Maßnahmen gering bzw. der Aufwand groß, da sich das Waldökosystem von selbst in eine unerwünschte Richtung entwickelt. Prioritäten richten sich nach der Spannweite der potentiellen Abflussreduktion.

2: kritische Standorte: Bereiche, die aktuell wie potenziell ähnlich hohen Oberflächenabfluss erwarten lassen (Vergrasung etc.), müssen sorgfältig bewirtschaftet werden. Es ist keine Verbesserung möglich, die Gefahr für Verschlechterungen (etwa durch Waldweide) jedoch groß.

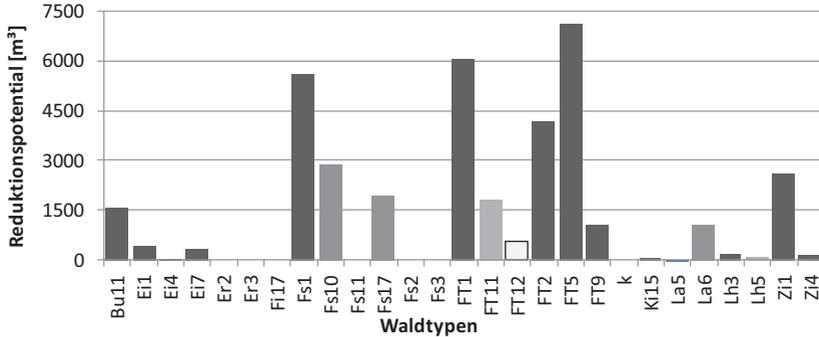
1: Problemstandorte, keine Verbesserung möglich: Sonderstandorte, die aktuell und potenziell im Starkregenfall sehr hohe Abflussspenden aufweisen (z.B. Moor-/Auwälder, Grünerlen), können durch waldbauliche Maßnahmen nicht wesentlich verbessert werden. Verbesserungen könnten nur durch technische Maßnahmen (od. ev. extrem aufwändige Aufforstungen) erzielt werden.

0: Optimalzustand: Bereiche, die aktuell und potentiell geringe Gefährdungen bezüglich Oberflächenabfluss aufweisen, sind als unproblematisch einzustufen. Es sind keine Eingriffe erforderlich.

HYDROLOGISCHE AUSWIRKUNGEN EINER SCHUTZFUNKTIONALEN WALDBEWIRTSCHAFTUNG

Um den Einfluss einer schutzfunktionalen Waldbewirtschaftung aus hydrologischer Sicht auch quantitativ zu veranschaulichen wurde die Abflussreaktion der im Einzugsgebiet Enterbach vorkommenden Waldtypen für ein extremes Starkregenereignis simuliert und flächig quantifiziert (siehe Abbildung 1). Entsprechend der in Tabelle 3 dargestellten Dringlichkeitsreihung können jene Waldtypen mit dem, qualitativ wie quantitativ, größten Verbesserungspotenzial lokalisiert werden. Für drei Waldtypen wurde in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 2 bis 4) beispielhaft die Abflusskurve wiedergegeben. Die potenzielle Abflussreaktion ist durch unterbrochene Linien markiert, die mittlere aktuelle Abflussganglinie durchgezogen dargestellt. In der Modellrechnung wurden je 1 ha Bestand

mit einer Hanglänge von 200m und einer, dem jeweiligen Waldtyp entsprechenden, mittleren Hangneigung einem einstündigen Blockniederschlag mit einer Intensität von 100 mm/h ausgesetzt. Jeder Waldtyp wurde einerseits unter Verwendung der ihm zugemessenen potenziellen hydrologischen Eigenschaften (AKLpot und RKLpot) und andererseits mit den Durchschnittswerten der aktuellen Kartierung der entsprechenden Werte der jeweiligen Waldtypen berechnet.



| | Fläche | Abfluss akt. [m³,%] | Abfluss pot. [m³,%] | Differenz [m³,%] |
|-----------|--------|---------------------|---------------------|------------------|
| Wald | 496,2 | 66.000 19% | 28.000 9% | -38.000 58% |
| Nichtwald | 769,5 | 289.000 81% | 289.000 91% | |
| Gesamt | 1274,0 | 355.000 100% | 317.000 100% | 11% |

Abb. 1: Flächenbilanz, Abflussfracht und Reduktionspotential der Waldtypen im Einzugsgebiet Enterbach
Fig. 1: Area, discharge and reduction potential of forest types at the test site Enterbach / Tyrol; rain: 100mm*h⁻¹

Dem „Reichen Silikat-Fichten-Tannenwald“ (im Enterbach ca. 36 ha), der an seinem typischen Standort in schattseitigen, luftfeuchten Unterhang- und Grabenlagen der hochmontanen Stufe vorkommt, kann als Potenzial ein Abflussbeiwert von 0-10 Prozent (AKLpot 1) zugewiesen werden.

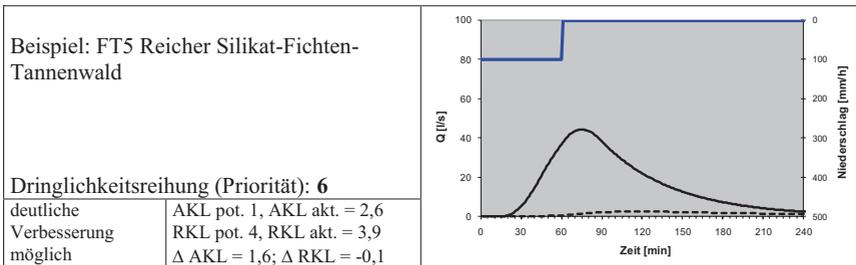


Abb. 2: Abflussganglinien Simulation FT5: aktuell (—) / potenziell (---); Fläche: 1 ha; NS100 mm, 1h
Fig. 2: Simulation hydrographs forest type FT5: current (—) / potential (---); area: 1 ha; rain: 100mm*h⁻¹

Die errechneten aktuellen Werte dieses Waldtyps liegen im Durchschnitt bei 2,6. Die aktuelle Rauigkeitsklasse entspricht ungefähr dem Potenzialwert. Ein extremer Gewitterregen (100 l/m² in einer Stunde) würde auf einem Hektar dieses Waldtyps aktuell mit einer Spitze von ca.

40 l/s ein kleineres Gerinne füllen. Das ausgeprägte Kleingerinnenetz im Bereich dieses Waldtyps untermauert diese Rechenergebnisse. Könnten im Zuge einer schutzfunktionalen Waldbewirtschaftung diese Bestände ihrem hydrologischen Potenzial zugeführt werden, würde der Oberflächenabfluss dieser Bereiche deutlich reduziert. In diesen Beständen besteht die größte Chance, eine deutliche Verbesserung durch waldbauliche Maßnahmen zu erreichen, da sich das Waldökosystem von selbst in die gewünschte Richtung entwickeln würde. Hier kann mit dem geringsten Aufwand der größte Nutzen erzielt werden.

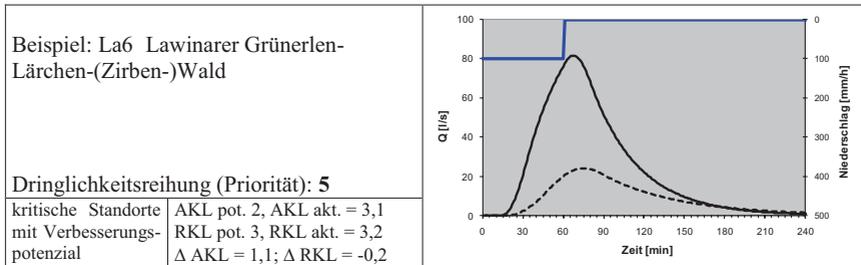


Abb. 3: Abflussganglinien Simulation La6: aktuell (—) / potenziell (----); Fläche: 1 ha; NS100 mm, 1h
Fig. 3: Simulation hydrographs forest type La6: current (—) / potential (----); area: 1 ha; rain: 100mm*h⁻¹

Der „Lawinare Grünerlen-Lärchen-(Zirben-)Wald“ (im Einzugsgebiet mit nur 5 ha vertreten) ist als azonale Lärchenwaldgesellschaft an rutschgefährdeten, fast immer lawinar beeinflussten Einhängen anzutreffen. Aus Sicht einer schutzfunktionalen Waldbewirtschaftung sind diese Standorte als kritische Standorte mit Verbesserungspotenzial zu bewerten. Ihr aktuell schlechter Abflussbeiwert von durchschnittlich 43 % (AKL 3,1) wäre deutlich reduzierbar, jedoch auf Grund der Standorteigenschaften nicht zur Gänze. Dieser Waldtyp gehört zudem zu jenen Standorten, welche bei ungünstiger Bewirtschaftung (z.B. Waldweide) sehr rasch zur Verschlechterung ihrer hydrologischen Eigenschaften neigen.

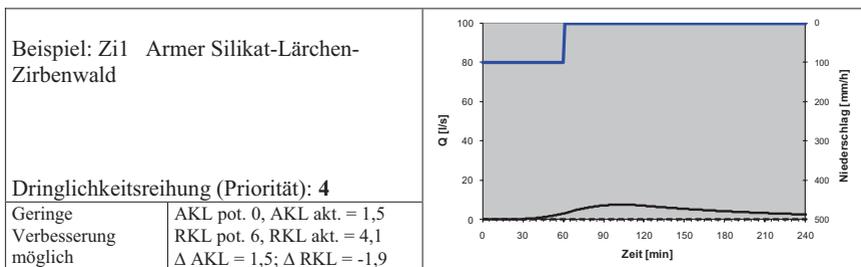


Abb. 4: Abflussganglinien Simulation Zi1: aktuell (—) / potenziell (----); Fläche: 1 ha; NS100 mm, 1h
Fig. 4: Simulation hydrographs forest type Zi1: current (—) / potential (----); area: 1 ha; rain: 100mm*h⁻¹

Die Standorte des „Armen Silikat-Lärchen-Zirbenwaldes“ sind im Untersuchungsgebiet (potenziell 36 ha) in der Priorität, also der Dringlichkeitsreihung der schutzfunktionalen Waldbewirtschaftung über mehrere Kategorien verteilt. Da dieser Waldtyp in seiner optimalen Ausprägung potenziell keinen Oberflächenabfluss entstehen lässt, wäre er aus hydrologischer Sicht sehr wertvoll. Jene zahlreichen Flächen wo aktuell dieser Waldtyp durch Weideflächen ersetzt ist wären Standorte mit einem deutlichen Verbesserungspotenzial

(Priorität 6). Auf den aktuell bestockten Flächen ist jedoch zumeist nur eine geringe bis keine Verbesserung möglich, da diese Flächen bereits aktuell nur geringe Oberflächenabflussbeiwerte aufweisen oder aus hydrologischer Sicht bereits einen „Optimalzustand“ aufweisen.

ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG

Die Wälder tragen im Einzugsgebiet Enterbach 1/5 zum Oberflächenabfluss bei. Bei schutzfunktional idealer Waldbehandlung und -ausstattung könnte der Gesamtabfluss eines gedachten Starkregens von 100 mm/h im Wald um 58% minimiert werden (vergleiche Abbildung 1). Für das gesamte Einzugsgebiet, das zu 40% bewaldet ist, würde dies noch eine Abflussminderung von 11% bewirken. Die Eingriffsmöglichkeiten im Gebiet erscheinen zunächst von geringer Größe. Doch auch 10% mehr Spielraum können bei gewissen Hochwasserereignissen entscheidend sein. Es erscheint deshalb sinnvoll, abflussmindernde Maßnahmen im Zuge einer schutzfunktionalen Waldbewirtschaftung durchzuführen, da damit kein unvertretbarer Mehraufwand verbunden ist.

Eine Steuerung des Abflussgeschehens durch eine naturnahe Waldausstattung ist grundsätzlich möglich. Der Beitrag wird umso größer, je höher die Bewaldung in einem Einzugsgebiet ist und je weniger kritische Waldstandorte in Bezug auf Abfluss vorkommen und je günstiger das Abflussgeschehen im Wald durch waldbauliche Maßnahmen und Nutzungsregelungen unterstützt wird.

LITERATUR

- Beschta R., Pyles M., Skaugset A., Surfleet C. (2000): „Peakflow responses to forest practices in the wetsern cascades of Oregon, USA.“ *Journal of Hydrology* 233; 102-120.
- Frehner M., Wasser B. und Schwitler R. (2005): „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion.“, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 564.
- Göttle A. (2006): „Was erwartet die Wasserwirtschaft von der Forstwirtschaft hinsichtlich der Hochwasservorsorge?“ LWF-Wissen Nr. 55, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2006, 24-28.
- Hotter, M., Plettenbacher T., Aschaber R. und Klosterhuber R. (2006): „Waldtypisierung und Waldstratifizierung Tirol für das Wuchsgebiet 1.2. Subkontinentale Innenalpen – Westteil, Areal 2 und Wuchsgebiet 2.1: Nördliche Zwischenalpen – westteil: Salzstrasse – Oberinntal.“ Im Auftrag der Landesforstdirektion Tirol.
- Kohl B., Klebinder K., Markart G., Perzl F., Pirkel H., Riedl F., Stepanek L. (2008): „Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005.“ *Interprevaent 2008 – Dornbirn* (eingereicht).
- Kohl B., Kohl K. und Markart G., (2006): nab - Naturpotentiale alpiner Berggebiete Modul 1 Naturgefahrenbewertung, Evaluierung ETAlp (Erosion, Transport in Alpenen Systemen). Endbericht Übersichtsebene – Regionalstudie, Themenkomplex Boden, Vegetation und Landnutzung. BFW, Innsbruck
- Markart G., Kohl B., Sotier B., Schauer T., Bunza G. und Stern R. (2004): „Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0).“ BFW-Dokumentation. 3: 83.
- Nittel P., Frank S., Jacobs S., Piccolruaz C., Krainer K. und Poscher G. (2005): „Geologische Karte Projekt Salzstraße. Unveröffentlichte Karte mit 6 Teilberichten. Im Auftrag der Tiroler Landesregierung und der Wildbach- und Lawinenverbauung, Innsbruck.
- Ott E., Frehner M., Frey H.U., Lüscher P. (1997): „Gebirgsnadelwälder: praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung.“ Verlag Paul Haupt, Bern-Stuttgart-Wien.
- Scheffer F. und Schachtschabel P. (1982): „Lehrbuch der Bodenkunde.“ Stuttgart. 11. Auflage.
- Seger, M. (2001): „Rauminformationssystem Österreich - ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes.“ VGI: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation; 89/2; S.101-110.
- Hegg C. (2006): „Waldwirkung auf Hochwasser.“ LWF-Wissen Nr. 55, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2006, 29-33.