

CC-WARE

Workpackage 4

Act. 4.2

Qualitative Beschreibung der Ökosystem- Dienstleistung 'Trinkwasser- Ressourcenschutz' – Waldökosysteme in Bergregionen und im Flachland

Roland Koeck und Eduard Hochbichler

März 2015



Qualitative
Beschreibung -
Ökosystem-
Dienstleistungen



Inhalt

	Seite
1 Einleitung	3
2 Die Trinkwasser-Schutzfunktion (TWF) von Wäldern – Die Hauptfunktionen von Waldökosystemen zur Bereitstellung der finalen Ökosystem-Dienstleistung	4
2.1 Infiltration des Niederschlagswassers	5
2.2 Wasserspeicherung und Wasserrückhalt (Retention)	7
2.3 Schneespeicher-Kapazität	8
2.4 Stabilisierung der Boden- und Humusbildungen	10
2.5 Vermeidung oder Entschärfung von Erosionsprozessen	11
2.6 Filter für das Niederschlagswasser	14
3 Trinkwasserschutz durch Waldökosysteme	15
4 Schlussfolgerungen	18
5 Literaturliste	19

CC-WARE – Workpackage 4

Act. 4.2 Qualitative Beschreibung der Ökosystem-Dienstleistung ‘Trinkwasser-Ressourcenschutz‘

Waldökosysteme in den homogenen Bereichen “Gebirge” und “Flachland”

1 Einleitung

Die im Projekt CC-WARE analysierte finale Ökosystem-Dienstleistung (OESD) ist „die Versorgung mit reinem Trinkwasser in angemessener Qualität und Quantität“. In dieser Arbeit werden alle relevanten Funktionen von Waldökosystemen, welche zu diesem finalen OESD beitragen, in qualitativer Form beschrieben. Es wird betont, dass die Waldökosysteme in den betroffenen Trinkwasser-Schutzgebieten (TWS) diverse weitere Ökosystem-Dienstleistungen erbringen können, welche im Projekt CC-WARE allerdings nicht thematisiert wurden. Die relevanten Prozesse für die nachhaltige Bereitstellung der thematisierten finalen OESD werden auf dem Level der Waldökosystem-Funktionen beschrieben. Alle diese Funktionen tragen zur Bereitstellung der finalen OESD „Versorgung mit reinem Trinkwasser in angemessener Qualität und Quantität“ bei.

Die Idee dahinter war, die Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TSF) von Waldökosystemen, welche die Bereitstellung der finalen OESD ermöglicht, auf verständliche Weise darzustellen, um damit den Bezug zu den Management-Optionen (MO) und Best Practices (BP) zur Verbesserung der TSF herzustellen. Das soll helfen, damit alle involvierten Stakeholder wie etwa Wasserversorger, Waldbesitzer, Regierungsorganisationen, Nichtregierungs-Organisationen und die allgemeine Öffentlichkeit die maßgeblichen Prinzipien des Trinkwasser-Ressourcenschutzes verstehen und die Möglichkeiten erkennen, um die finale OESD zu verbessern.

Es wird eine zusätzliche Gliederung in ‘homogene Regionen’ durchgeführt, um die OESD Funktionalität für unterschiedliche ökologische Rahmenbedingungen zu skizzieren. Die unterschiedlichen homogenen Regionen sind (1) Waldökosysteme in Gebirgen, (2) Auen-Waldökosysteme und (3) Waldökosysteme im Flachland. Diese homogenen Regionen werden nicht weiter aufgegliedert, nachdem die Beschreibung der wesentlichen funktionalen Unterschiede für die Bereitstellung der OESD mit diesen drei Kategorien erfüllt werden kann.

Die finale OESD und die Trinkwasser-Schutzfunktionalität von Waldökosystemen

Um die finale OESD zu erbringen, müssen die Waldökosysteme in adäquatem Zustand sein. Die Trinkwasser-Schutzfunktionalität von Waldökosystemen (TSF) subsummiert alle wesentlichen Waldfunktionen, welche zur Bereitstellung der finalen OESD „**Versorgung mit reinem Trinkwasser in angemessener Quantität**“ beitragen.

Alle nachfolgenden Beschreibungen sind in die homogenen Regionen ‚Gebirge‘ und ‚Flachland‘ in SEE eingeteilt. Waldökosysteme in Feuchtgebieten werden im Kapitel Feuchtgebiete erläutert.

Trinkwasser-Schutzgebiete (TWS) sind im wesentlichen Einzugsgebiete, welche Trinkwasser-Versorgungseinrichtungen zugeordnet werden können. Diese können ihre Versorgung aus Quellen, Grundwasserkörpern oder Wasserspeicherseen beziehen, weshalb TWS eine große räumliche Ausdehnung aufweisen können.

2 Die Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TWS) von Waldökosystemen – Die Hauptfunktionen von Waldökosystemen für die Bereitstellung der finalen OEDS

Im Kontext der Bereitstellung der finalen Ökosystem-Dienstleistung (OEDS) „Versorgung mit reinem Trinkwasser in angemessener Quantität“ können Waldökosysteme bezüglich ihrer Hauptfunktionen, welche diese OEDS unterstützen, analysiert werden. Die wichtigsten Waldfunktionen, welche für die Bereitstellung der finalen OEDS von Bedeutung sind, werden in diesem Kapitel erklärt und erläutert. Zuerst wird ein Überblick gegeben.

Überblick zu den Waldfunktionen, welche für die Bereitstellung der finalen OEDS bedeutsam sind:

+ Optimale Infiltrations-Bedingungen für das Niederschlagswasser (1)

(Gute Infiltrationsbedingungen für das Niederschlagswasser in die Bodenmatrix)

+ Wasserspeicherung und Wasserrückhalt (2)

(Speicherung von Niederschlagswasser im Interzeptions- und Boden-Speicher)

+ Schneespeicher-Kapazität (3)

(Speicherung von Schnee in strukturierten und gemischten Wäldern)

+ Stabilisierung von Boden- und Humusbildungen (4)

(Das dichte Wurzelgeflecht von Waldökosystemen stabilisiert Boden- und Humusbildungen und die Waldbedeckung beschattet sie auch. Die Waldbäume nähren den Humusbildungsprozess)

+ Vermeidung oder Entschärfung von Erosionsprozessen (5)

(Vermeidung oder Entschärfung von Steinschlag, Erdbeben, Muren oder Lawinen durch dichte und stabile Wälder)

+ Filterwirkung für Niederschlagswasser (6)

(Die Waldböden zusammen mit den Humusschichten stellen einen natürlichen Filter für diverse Substanzen dar, welche mit dem Niederschlagswasser infiltrieren)

Im folgenden Kapitel wird eine detaillierte Beschreibung der Waldfunktionen für die Bereitstellung der finalen OEDS gegeben. Das ist der zentrale Part der qualitativen Beschreibung der finalen OEDS innerhalb der homogenen Regionen Gebirge und Flachland.

Die Beschreibung der Relevanz der diversen Waldfunktionen für die verschiedenen homogenen Regionen ist in Tabellen dargestellt. Die Relevanz-Kategorien sind ‚sehr hoch‘, ‚hoch‘, ‚mittel‘, ‚niedrig‘ und ‚sehr niedrig‘. Diese qualitativen Einschätzungen der Waldfunktionen geben einen Überblick für die homogenen Regionen, jedoch mit einer Betonung auf den Kategorien ‚Gebirge‘ und ‚Flachland‘.

Zusätzlich wurden Trinkwasserschutz-Funktionalitäts (TSF) – Abstracts formuliert, in welchen die wesentlichen Fakten der TSF kurz und prägnant beschrieben wurden.

2.1 Optimale Infiltrationsbedingungen für Niederschlagswasser

In Trinkwasser-Schutzgebieten (TWS) ist es von wesentlicher Bedeutung, dass Niederschlagswasser in die Bodenmatrix infiltrieren kann. Waldböden, welche von adäquat bestockten und stabilen Waldbeständen bewachsen werden, bieten gute Infiltrationsbedingungen für Niederschlagswasser, was die Wasserspeicherung im Boden ebenso fördert wie die Tiefenversickerung und den Lateralabfluss. Das ist in TWS eine erwünschte Situation, weil das Niederschlagswasser dadurch die Bodenmatrix durchfließen kann und somit von den Bodenkompartimenten transformiert werden kann.

Die Waldfunktion einer verbesserten Infiltration von Niederschlagswasser kann mit der Bildung von typischen Waldböden erklärt werden, weil diese einen hohen Makroporen-Anteil aufweisen. Die Makroporen in Waldböden werden sowohl von den Wurzelkanälen der Vegetation (Bäume und Krautschicht) als auch durch die Aktivitäten der Bodenfauna gebildet. Für Waldböden wird von Infiltrationsraten zwischen 6 mm und 206 mm/Stunde berichtet (Harden und Scruggs 2003). Als Extremwerte wurden in Europäischen Wäldern Infiltrationswerte von bis zu 650 mm/Stunde gemessen (Eichhorn 1993). Im Falle von karstalpiner Bodenbildungen mit Waldbedeckung wurde die Infiltration von 100 mm/Stunde während einer Starkregen-Simulation gezeigt. Während dieses Experiments trat keinerlei Oberflächenabfluss auf (Markart et al. 2011). All diese Beispiele heben die Kapazität von Waldböden für eine effiziente Infiltration von Niederschlagswasser hervor.

Im Sommerhalbjahr vermindert der Beschattungseffekt einer dichten Waldbedeckung in Relation zu einer offenen Rasenfläche deutlich die Bodentemperaturen in den Oberbodenschichten (Koeck 2008; Kang et al. 2000). Das reduziert die Tendenz zur Ausbildung von wasserabstoßenden Oberbodenschichten (Hydrophobie des Oberbodens) und verbessert somit die Infiltrationsbedingungen.

Im Winterhalbjahr garantiert der Beschattungseffekt der Waldbedeckung höhere Bodentemperaturen im Vergleich zu offenen Flächen. Im Falle von Buschvegetation (z. B. Latschenbuschwald) kann auch eine durchgehende Schneedeckenbildung gefördert werden, während auf offenen Flächen der Schnee durch Starkwinde abgeweht werden kann. Das kann die Infiltration von Schneeschmelzwasser im Frühling fördern (Koeck 2008).

Die Relevanz der TSF 'Optimale Infiltrationsbedingungen für Niederschlagswasser' wurde innerhalb aller ‚homogenen Regionen‘ mit ‚sehr hoch‘ eingestuft (Tab. 1).

TSF-Abstract:

Es kann resümiert werden, dass die spezifischen Rahmenbedingungen von Waldböden zusammen mit dem Beschattungseffekt der Baumschicht optimale Infiltrationsbedingungen für Niederschlagswasser und Schneeschmelzwasser bieten. Das ist die erste und wesentliche Facette der Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TSF) von Waldökosystemen in allen homogenen Regionen, wobei dieser Funktionalität in Gebirgsregionen eine spezielle Bedeutung durch die Verminderung oder Verhinderung des Oberflächenabflusses zukommt.

Tabelle 1: Relevanz der TSF 'Infiltration von Niederschlagswasser' in den verschiedenen homogenen Regionen

TSF	WOE in Gebirgen	WOE in Flussauen	WOE im Flachland
Infiltration von Niederschlagswasser	Sehr Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch

TSF...Trinkwasser-Schutzfunktionalität; WOE...Waldökosysteme

2.2 Wasserspeicherung und Wasserrückhalt

Wälder haben die Fähigkeit zur Wasserspeicherung. Die Wasserspeicherung findet sowohl im *Interzeptionsspeicher* als auch im *Bodenspeicher* statt. Der *Interzeptionsspeicher* eines Waldbestands ist von seiner Baumartenzusammensetzung und den Wuchsbedingungen des Waldstandortes abhängig und variiert innerhalb Europas Wälder nach Baumgartner und Liebscher (1990) zwischen 0,2 mm und 7,6 mm. Der Interzeptionsspeicher umfasst die Stämme, Äste, Nadeln oder Blätter der Bäume (Cantu-Silva und Okumura 1996; Carlyle-Moses et al. 2004; Savenije 2004). Der interzeptierte Niederschlag kann evaporieren (= verdunsten) und erreicht folglich nicht den Waldboden.

Der zweite Ort der Wasserspeicherung in Waldökosystemen ist der Waldboden, dessen Aufnahmefähigkeit deutlich größer ist, als jene des Interzeptionsspeichers. Die Speicherfähigkeit der Waldböden ist abhängig von der Geologie, der Ektohumusschicht (= Auflagehumusschicht), dem Bodentyp, der Bodenmächtigkeit, der Bodenart, der Bodenstruktur, etc. Wenn Niederschlagswasser oder Schneeschmelzwasser in den Waldboden infiltriert, tritt es in den Bodenspeicher ein und verbleibt dort, bis es sich beispielsweise abwärts bewegt durch Tiefensickerung, oder aufwärts bewegt, durch Pflanzenwurzeln, um den Prozess der Transpiration zu nähren. Der Bodenspeicher ist ein wichtiger Pufferspeicher für beispielsweise die Quellenschüttung oder die Bachschüttung.

Als Teil des Bodenspeichers kann der Ektohumus bis zum vierfachen seines Trockengewichtes an Wasser speichern (Hager und Holzmann 1997) und spielt daher im Falle seines Vorhandenseins eine bedeutsame Rolle (nicht alle Waldböden weisen Ektohumus auf). Speziell in karstalpiner Einzugsgebieten kommt den Ektohumusschichten eine außerordentliche Bedeutung zu, denn oftmals sind Ektohumusbildungen in diesen Waldregionen die einzigen Orte, wo Nährstoff- und Wasserspeicherung und somit Pflanzenwachstum stattfinden können (Koeck 2008). Die dynamische Stabilität von Humusbildungen spielt daher eine wichtige Rolle im Kontext des Trinkwasser-Ressourcenschutzes.

Die Mineralbodenhorizonte können bis zu 50 % ihres Volumens an Wasser speichern, die Maßeinheit wird Volumetrische Bodenfeuchte ($\text{cm}^3/\text{cm}^3 - \emptyset$) genannt, wobei deren Bedeutung im Zusammenhang mit der Infiltrationskapazität der Waldböden (siehe Kap. 2.1) offenbar wird. Wenn Wasser einen intakten Waldboden infiltriert, kann es potenziell im Bodenspeicher gespeichert werden. Die Veränderungen des Wassergehalts im Bodenwasserspeicher sind räumlicher Natur (verschiedene Bodentypen, Bodenmächtigkeiten, Waldstandorte, etc.) und zeitlicher Natur (die Wirkung der Jahreszeiten mit variierender aktueller Evapotranspiration, Niederschlagsereignisse und Trockenperioden).

Wasser welches in Waldböden gespeichert ist, wird entweder an die Wurzeln der Waldvegetation (Bäume und Bodenpflanzen) weitertransportiert und für die Transpiration verwendet, oder es erfährt Tiefenversickerung und trägt somit zur Grundwasser-Neubildung bei. Somit ist es eine Spielart des Wasser-Rückhalts im spezifischen Einzugsgebiet und trägt somit bedeutend zur Trinkwasser-Versorgung bei (Tab. 2).

TSF-Abstract:

Die Wasserspeicher-Kapazität von Bäumen (Interzeptions-Speicher) und von Waldböden trägt zur Funktionalität des Wasserrückhalts bei und ist daher für die Zwecke des Trinkwasser-Ressourcenschutzes von Bedeutung. Die Wasserspeicher-Kapazität von Waldböden ist deutlich größer als jene von Bäumen (Interzeptions-Speicher).

Tabelle 2: Relevanz der TSF 'Wasserspeicherung und Wasserrückhalt' in den verschiedenen homogenen Regionen.

TSF	WOE in Gebirgen	WOE in Flussauen	WOE im Flachland
Wasserspeicherung und Wasserrückhalt	Sehr Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch

TSF...Trinkwasser-Schutzfunktionalität; WOE...Waldökosysteme

2.3 Schneespeicher-Kapazität

Eine spezifische Form der Wasserspeicherung ist im Kontext der Schneespeicher-Kapazität von Waldbeständen gegeben. Diese kann allerdings nur dann wirksam werden, wenn die klimatischen Rahmenbedingungen eines Waldökosystems Schneebedeckung während des Winterhalbjahres ermöglichen, was in Südosteuropa (SEE) im Falle höhergelegener Gebirge garantiert ist, für Flachland-Regionen allerdings nur während kalter Winter mit ausreichend Schneefall gegeben ist. Wälder in schneereichen Regionen haben die Fähigkeit, Schnee bis weit in den Frühling zu speichern. Wenn Waldbestände adäquat strukturiert sind, kann Schnee durch die hohe Oberflächen-Rauigkeit des Waldes akkumuliert werden und durch die beschattende Wirkung der Waldbäume länger als etwa auf offenen Flächen gespeichert werden. Die dadurch ausgedehnte Zeitspanne der Schneeschmelze trägt zu einer ausgeglichenen Quellenschüttung beziehungsweise Grundwasserneubildung bei. Die Schneeschmelze ist ein wichtiger Faktor für Grundwasser-Neubildung und Quellenschüttung, weil sie zu einer Zeit stattfindet, wann kein Wasserbedarf der Vegetation für die Transpiration besteht (Winterruhezeit der Vegetation) und wann nur geringe Evaporationsraten aufgrund der niedrigen Lufttemperaturen gegeben sind.

Nadelbäume können mehr Schnee interzipieren als Laubbäume, was von Pomeroy et al. (1998) und Marsh (1999) bestätigt wurde und mit dem relational höheren Blattflächen-Index der Nadelbäume im Winter im Zusammenhang steht. Das ist auch der Grund, warum Nadelbäume im Gegensatz zu Laubbäumen im Frühling einen effizienten Beschattungseffekt auf die Schneedecke ausüben. Ein adäquat überschirmter Waldbestand kann die Schneeschmelze in Relation zu offenen Flächen um bis zu drei Wochen verlängern (Link und Marks 1999).

Auch die Struktur eines Waldbestands ist für die Schneespeicherung von Bedeutung. Kleinräumige Öffnungen in Waldbeständen ermöglichen dort den ‚Schnee-Akkumulations-Effekt‘, welcher auch unter Starkwind-Bedingungen wirksam wird, während unter solchen Witterungsbedingungen auf großflächigen Kahlschlagflächen oder Grasland der Schnee abgeweht wird (Mayer et al. 1997).

Speziell im subalpinen Waldgürtel ist die Schneespeicher-Kapazität von Waldökosystemen sehr hoch. Das kann mit den relativ kühlen Temperaturen in diesen Höhenlagen (kühlere Jahresmittel-Temperaturen) und mit der räumlichen Nähe von höhergelegenen Wiesenflächen (subalpine und alpine Rasen) erklärt werden, wo der Schnee unter Starkwind-Bedingungen abgeweht wird. Dieser abgewehrte Schnee kann in den kleinräumigen Öffnungen der naturnah strukturierten subalpinen Waldgesellschaften abgefangen und akkumuliert werden, nachdem diese Waldbestände einen relativ hohen Rauigkeits-Index aufweisen. Der Beschattungseffekt der umgebenden Baum-Rotten kann auf diesen subalpinen Waldstandorten eine Verlängerung der Schneeschmelz-Periode bis weit in den Spätfrühling hinein bedingen (Koeck 2008).

Die Schneespeicher-Kapazität von Waldökosystemen hat vor allem im Gebirge eine hohe Relevanz, nachdem ein großer Prozentanteil des Niederschlags dort als Schnee fällt. Sie hat für die weiteren homogenen Regionen nur eine mittlere Bedeutung, weil die Schneedecken-Entwicklung in den tiefliegenden Gebieten nicht eine solch bedeutende Rolle spielt (Tab. 3).

TSF-Abstract:

Die Schnee-Akkumulation und Schneespeicher-Kapazität von Wäldern spielt eine wichtige Rolle für die Verbesserung und zeitliche Ausdehnung der Grundwasser-Neubildung und der damit verbundenen Quellenschüttung. Diese können durch Baumarten-Zusammensetzung und Struktur von Waldbeständen kontrolliert werden. Die Schneespeicher-Kapazität von Waldökosystemen ist im Gebirge von hoher Bedeutung, während sie im Flachland und in Auwald-Gesellschaften nur von mittlerer Bedeutung ist.

Tabelle 3: Relevanz der TSF ‘Schneespeicher-Kapazität’ in verschiedenen homogenen Regionen

TSF	WOE in Gebirgen	WOE in Flussauen	WOE im Flachland
Schneespeicher-Kapazität	Sehr Hoch	Mittel	Mittel

TSF...Trinkwasser-Schutzfunktionalität; WOE...Waldökosysteme

2.4 Stabilisierung von Boden- und Humusbildungen

Um optimale Bedingungen für die Infiltration von Niederschlagswasser (siehe 2.1) und für eine gute Wasserspeicher-Funktionalität (siehe 2.2) über Raum und Zeit zu garantieren, müssen die Böden zusammen mit ihren Humusbildungen stabil sein. Waldvegetation hat die Fähigkeit, Boden- und Humusbildungen zu stabilisieren. Diese Stabilisierung ist aufgrund von mannigfaltigen Prozessen, welche einem etablierten Waldbestand und der Wald-Sukzession inhärent sind, gegeben.

Im Gegensatz verursachen offene Flächen ohne etablierte Vegetationsdecke oder mit nur geringen Prozentanteilen von Vegetationsbedeckung während Starkregenereignissen Oberflächenabfluss, welcher Erosion von Boden- und Humussubstanzen verursachen kann und auch eine Gefahr im Kontext von Hochwasserereignissen darstellt. Das Oberflächenabfluss-Wasser kann einen hohen Anteil von Sedimenten und weiteren erodierten Stoffen aufweisen, welche dann die Verwendung des Wassers zur Trinkwasserversorgung vereiteln (was vor allem in Situationen ohne technische Wasseraufbereitung zum Tragen kommt). Dieser Prozess kann sowohl in gebirgigen als auch in Flachland-Waldökosystemen stattfinden.

Die Stabilisierung der Humusdynamik ist ein wesentlicher Bereich der TSF von Waldökosystemen. Die Ektohumus-Horizonte oberhalb der Mineralbodenhorizonte sind von einer kontinuierlichen Nachlieferung von Streu durch den Blattfall und Nadelfall der Waldbäume abhängig. Eine zusätzliche Stabilisierung der Ektohumus-Horizonte ist durch den Beschattungseffekt des Waldkronendaches gegeben. Das dichte Wurzelnetzwerk der Waldbäume und Wald-Bodenvegetation stabilisiert den Ektohumus mechanisch und bewahrt ihn am Waldstandort. Speziell die Ektohumus-Horizonte sind durch einen hohen Anteil an Feinwurzel-Netzwerk charakterisiert, nachdem sie große Konzentrationen von Nährstoffen für das Baumwachstum beinhalten.

Der Ektohumus von Waldböden kann Wasser im Ausmaß vom bis zu 4-fachen seines Trockengewichts speichern (Hager und Holzmann 1997 und Kapitel 2.2). Im Falle von Humus-Abbauprozessen und Mobilisierungsprozessen, wie sie im Zuge von Kahlschlägen oder großflächigen Windwürfen stattfinden, würden die Nährstoffe, welche im Humus gespeichert sind, freigesetzt und in mögliche Verschmutzungen des Trinkwassers verwandelt werden. Der Abbau von Humussubstanzen wird durch erhöhte Bodentemperaturen und erhöhte Bodenfeuchtigkeit, wie sie nach Kahlschlägen und großflächigem Wald-Zusammenbruch eintreten, verursacht (Shutou und Nakane 2004).

Die Mineralbodenhorizonte werden ebenfalls durch das dichte Wurzelnetzwerk der Waldbäume und Wald-Bodenvegetation stabilisiert. Der wichtigste Aspekt ist die mechanische Stabilisierung der Bodenhorizonte gegen die Gravitationskraft, wie sie etwa auf steilen Waldstandorten im Gebirge wirksam wird. Aber auch in Flachland-Waldökosystemen ist die mechanische Stabilisierung der Bodenhorizonte von wesentlicher Bedeutung für deren TSF (Tab. 4). Die erosive Kraft des Wassers wird in Wäldern durch das dichte Wurzel-Netzwerk der Bäume entschärft. Auch mittels der Verbesserung der Infiltration von Niederschlagswasser in den Boden (siehe Kap. 2.1) wird der Oberflächenabfluss entschärft oder verhindert, was die Stabilisierung der Bodenhorizonte unterstützt.

TSF-Abstract:

Mineralboden- und Humus-Bildungen werden durch Waldvegetation mittels deren dichten Wurzel-Netzwerk mechanisch stabilisiert. Die Humusbildungen werden durch adäquate Waldbedeckung in einer stabilen dynamischen Beschaffenheit erhalten, und zwar mittels Bereitstellung von Streufall und Beschattung. Die Stabilisierung der Boden- und Humusbildungen ist sowohl für Waldökosysteme in Gebirgen als auch im Flachland von Relevanz.

Tabelle 4: Relevanz der TSF ‘Stabilisierung der Boden- und Humusbildungen’ in den verschiedenen homogenen Regionen

TSF	WOE in Gebirgen	WOE in Flussauen	WOE im Flachland
Stabilisierung von Boden- und Humusbildungen	Sehr Hoch	Hoch	Hoch

TSF...Trinkwasser-Schutzfunktionalität; WOE...Waldökosysteme

2.5 Verhinderung oder Entschärfung von Erosionsprozessen

Die steilen Abhänge von Gebirgen sind anfällig für Erosionsprozesse wie Steinschlag, Erdbeben oder Schneelawinen. Diese Erosionsprozesse stellen für menschliche Verkehrswege, Siedlungen und für Trinkwasser-Versorgungseinrichtungen eine Gefährdung dar und können auch zur Verschmutzung der Wasserressourcen führen. Daher müssen diese Erosionsprozesse entschärft oder verhindert werden.

Eine stabile und dichte Waldbedeckung bietet den besten Schutz gegen diese erosiven Kräfte. Das verdeutlicht die prioritäre Bedeutung von stabilen Waldökosystemen für steiles gebirgiges Terrain auf der gesamten Erde. Die Schutzfunktion von Wäldern gegen erosive Prozesse erlangt zusätzliche Bedeutung, wenn die gegenständliche Fläche als Einzugsgebiet für die Trinkwasserversorgung genutzt wird.

Die erosive Kraft von Steinschlag tritt in Regionen auf, wo felsige Standorte verbreitet sind. Wenn diese mit Waldgebieten verzahnt sind, kann der Prozess des Steinschlags durch die Waldbestände entschärft werden. Der Steinschlag kann durch Erdbeben, Frost/Auftau-Dynamik, Starkwinde mit Windwurf-Wirkung, wanderndes Wild, etc. verursacht werden. Die meisten dieser auslösenden Prozesse können nicht verhindert werden. In manchen Fällen kann ein dichter und stabiler Waldbestand den zerstörerischen Impact von Steinschlag auf menschliche Infrastruktur-Einrichtungen entschärfen. In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass der Impact von einigen sehr starken Steinschlag-Ereignissen von keinem noch so dichten und stabilen Waldbestand

verhindert oder entschärft werden kann, was vor allem für Felsstürze (Felsen mit großem Gewicht) oder Bergstürze Geltung aufweist.

Je dichter ein Wald unterhalb von Felsflächen ist, desto höher ist sein Potenzial zur Entschärfung oder Vermeidung von Steinschlag-Ereignissen, was mit der höheren Wahrscheinlichkeit erklärt werden kann, dass ein Stein von einem Baum aufgefangen wird. Zusätzlich zur Anzahl der Bäume pro Hektar ist auch die Stabilität der Einzelbäume von herausragender Bedeutung. In diesem Zusammenhang sind der H/D-Wert der Bäume sowie alle weiteren Stabilitäts-Indikatoren von Bedeutung. Nur Durchmesserstarke und stabile Bäume können fallende Steine auffangen.

Erdrutsche (Muren) können sowohl mineralische als auch organische Bodensubstanzen und Grundgesteinsmaterial umfassen. Sie treten meist als Folge von Starkregen-Ereignissen auf, manchmal auch als Folge von Schneeschmelz-Ereignissen. Hoch erosive Standorte können im Falle von Starkregen-Ereignissen trotz stabiler Waldbedeckung Erdrutsche (Muren) hervorbringen, wie beispielsweise aktuelle Ereignisse im Gschlifgraben (Österreich, Oberösterreich) oder in La Villa in Alta Badia (Italien, Südtirol) zeigten. Auf solcherart Standorten sollten keinerlei menschliche Infrastruktur-Einrichtungen errichtet werden.

Eine anders gelagerte Situation ist gegeben, wenn Waldstandorte während Starkregen erodiert werden, nachdem sie zuvor kahlgeschlagen wurden oder ein weitflächiges Windwurf-Ereignis stattfand. Diese Vorgänge sind oftmals mit spezifischen Grundgesteinen assoziiert, welche ein hohes Erosionspotenzial besitzen. In diesen Fällen hätten die Erdrutsche (Muren) durch die Bewahrung einer stabilen und kontinuierlichen Bewaldung verhindert werden können.

Speziell Grabenstandorte, Grabensysteme und Lawenstriche können anfällig für die Entstehung von Erdrutschen (Muren) sein. Auf diesen (manchmal auch bewaldeten) Standorten findet während Starkregeneignissen eine natürliche Konzentration des Wasserdurchflusses statt. All diese Standorte, welche potenziell bewaldet sind, sollten von den stabilsten erzielbaren Waldbeständen bestockt werden, welche zusätzlich eine adäquate Baumartenvielfalt und Baumartenverteilung aufweisen müssen.

Lawinen entstehen im Gebirge innerhalb des Waldgürtels auf steilen Hängen, wo eine dichte Bewaldung fehlt und Schnee akkumuliert wird. Im Normalfall werden solche aktuell ausgebildete Standorte durch eine spezifische Dynamik und Struktur der Waldvegetation angezeigt (niedrige Wuchshöhe der Bäume bis maximal 5 m, Indikator-Arten der Bodenvegetation, zerstörte Einzelbäume, etc.). Auf solchen Standorten können Lawinen periodisch auftreten (in der Vergangenheit und in Zukunft), der Prozess könnte nur gestoppt werden, falls der sich etablierende Waldbestand einen kritischen Schwellenwert bezüglich Bestockungsgrad und Dimensionen (BHD-Brusthöhendurchmesser und Wuchshöhe) erreicht.

Auch aktuell normal bewaldete Waldstandorte können zu Lawenstrichen werden, wenn sie steil genug sind und kahlgeschlagen wurden oder von großflächigem Windwurf betroffen sind. In solchen Fällen könnten Wiederbewaldungs-Maßnahmen schwierig bis unmöglich werden, falls die Lawindynamik die sich verjüngenden Bäume wiederholt zerstören sollte. Solche Situationen

müssen mittels einer nachhaltigen Bereitstellung einer schützenden Dauerwald-Bestockung vermieden werden.

Die Erosion von Boden- und Humus-Substanzen, welche durch Kahlschläge, großflächige Windwürfe oder intensive Holzernte-Eingriffe (= Kahlschlag-Bedingungen, KSB) verursacht werden, gefährden auch die Qualität der Trinkwasser-Ressourcen. Die Nährstoffe, welche in den Baumwurzeln gebunden und gespeichert sind, werden freigesetzt, nachdem KSB eingetreten sind. Auch jene Nährstoffe, welche in den Boden- und Humusschichten gespeichert sind, werden unter KSB durch Mineralisierung mobilisiert und freigesetzt. Die Auswaschung jener Nährstoffe kann in einer Verschmutzung der Trinkwasser-Ressourcen resultieren. Auf der anderen Seite werden die Waldstandorte durch Nährstoffauswaschung degradiert.

All diese Erosionsprozesse können die Qualität der Trinkwasser-Ressourcen durch erhöhte Trübungen, Stoffkonzentrationen oder Sedimentationsprozesse schädigen und müssen in Trinkwasser-Schutzgebieten folglich vermieden oder entschärft werden. Eine stabile und kontinuierliche Bewaldung schützt effizient vor diesen Erosionsprozessen, indem sie jene entweder vermeidet oder entschärft.

In gebirgigen Regionen sind alle erwähnten Erosionskräfte vorherrschend, weshalb die Relevanz dieser TSF als ‚Sehr hoch‘ bewertet wurde. In Flachland- oder Flussauen-Regionen ist nur die Vermeidung der Boden- und Humuserosion von großer Relevanz, weshalb die TSF für diese Regionen als ‚Hoch‘ bewertet wurde (Tab. 5).

TSF-Abstract:

Stabile, adäquat gemischte und überschirmte Waldbestände bieten Schutz vor oder Entschärfung von Erosions-Prozessen wie Steinschlag, Erdbeben (Muren), Lawinen oder Bodenerosion. Diese Fähigkeit von Waldökosystemen trägt besonders zur Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TSF) von Wäldern in Gebirgen bei und kann als wesentliche Funktion hinsichtlich des Trinkwasser-Ressourcenschutzes gesehen werden.

Tabelle 5: Relevanz der TSF ‘Vermeidung oder Entschärfung von Erosions-Prozessen’ in verschiedenen homogenen Regionen

TSF	WOE in Gebirgen	WOE in Flussauen	WOE im Flachland
Vermeidung oder Entschärfung von Erosionsprozessen	Sehr Hoch	Hoch	Hoch

TSF...Trinkwasser-Schutzfunktionalität; WOE...Waldökosysteme

2.6 Filter für das Niederschlagswasser

Eine Vielzahl verschiedener anorganischer und organischer Substanzen kann über nasse (Niederschlag) und trockene Deposition zu den Waldböden transportiert werden. Diese Substanzen weisen einen unterschiedlichen Grad an Kontaminierungs-Potenzial auf und können entweder ausgewaschen werden und somit in die Aquifere gelangen oder an den Boden- und Humuskomponenten angelagert werden.

Die Boden- und Humusschichten in Waldökosystemen haben die Fähigkeit, Niederschlagswasser quasi zu filtrieren, falls dieses durch die Bodenmatrix fließt. Es muss auch erwähnt werden, dass durch die oftmals auftretenden ‚bevorzugten Wasserleitungsbahnen‘ Schadstoffe die Bodenmatrix, wo deren Anlagerung stattfinden könnte, umfließen können (Keesstra et al. 2012). Der Anteil an ‚bevorzugten Wasserleitungsbahnen‘ kann durch Boden- und Humuserosion entweder erhöht werden, oder durch adäquate waldbauliche Praktiken vermindert werden, jedoch können sie niemals völlig ausgeschlossen werden. Diese Situation verdeutlicht, dass in einigen Bodentypen ein Teil des Niederschlagswassers durch die Bodenmatrix fließt, sodass etwaige Verschmutzungen dort angelagert werden können. Ein anderer Teil des Niederschlagswassers könnte die Bodenmatrix über die ‚bevorzugten Wasserleitungsbahnen‘ umfließen, wodurch etwaige Verschmutzungen direkt in die Aquifere durchsickern würden. In Karstgebieten mit relativ mächtigen Ektohumus-Schichten kann während Trockenperioden durch die Bildung von Schwindungsrissen im Auflagehumus der Anteil an ‚bevorzugten Wasserleitungsbahnen‘ kurzfristig erhöht werden.

Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) müssen als die am häufigsten auftretenden potenziellen Verschmutzungsstoffe hervorgehoben werden. Nitratkonzentrationen in Trinkwasser-Ressourcen sind global von wesentlicher Bedeutung, nachdem sie weit verbreitet auftreten und damit die häufigste Bedrohung für die Wasserqualität darstellen. Nitrat kann, nachdem es ein essentieller Nährstoff ist, von den Pflanzenwurzeln, und dabei speziell von den Laubbaumarten, aufgenommen werden.

In den Waldböden war der Stickstoffgehalt in der Vergangenheit ein limitierender Faktor, sie erreichten nicht den Level der Stickstoff-Sättigung. Aktuell zeigen diverse Waldböden in Europa Stickstoffsättigung (Aber et al. 1989), was von den intensiven Stickstoff-Immissionen über die Luftverschmutzung durch die industrialisierte Zivilisation verursacht wird.

Weitere Berichte wurden im Kontext von Ektohumusschichten der Waldböden kommuniziert, welche in der Lage sind, das radioaktive Isotop Cäsium anzulagern und somit verhindern, dass dieses toxische radioaktive Element aus dem Fallout von Nuklearanlagen in die Aquifere sickert.

Die Filterfunktion der Waldböden für das Niederschlagswasser ist in allen homogenen Regionen von sehr hoher Bedeutung (Tab. 6).

TSF-Abstract:

Waldboden- und Humus-Horizonte haben die Fähigkeit, potenzielle Schadstoffe aus dem Niederschlagswasser zu filtern. Diese Funktionalität kann mit der Anlagerung dieser Substanzen an Boden- und Humuskompartimente erklärt werden. Ein Teil des Niederschlagswassers kann allerdings immer wieder direkt in die Aquifere sickern, was mit dem Umfließen der Bodenmatrix über ‚bevorzugte Wasserleitungsbahnen‘ im Zusammenhang steht.

Tabelle 6: Relevanz der TSF ‘Filter für das Niederschlagswasser’ in den verschiedenen homogenen Regionen

TSF	WOE in Gebirgen	WOE in Flussauen	WOE im Flachland
Filter für das Niederschlagswasser	Sehr Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch

TSF...Trinkwasser-Schutzfunktionalität; WOE...Waldökosysteme

3 Trinkwasser-Ressourcenschutz durch Waldökosysteme

Waldökosysteme können eine umfassende Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TSF) leisten, wenn sie grundlegende spezifische Kriterien erfüllen. Die TSF von Waldökosystemen sichert die nachhaltige Bereitstellung der finalen Ökosystem-Dienstleistung (OEDS) „Versorgung mit reinem Trinkwasser in angemessener Quantität“.

Um die zuvor erläuterten wesentlichsten Waldfunktionen für den Trinkwasser-Ressourcenschutz erbringen zu können, müssen Waldökosysteme und Waldbestände in Trinkwasser-Schutzgebieten (TWS) in adäquatem Zustand sein. Hier werden einige der wichtigsten Kriterien und Eigenschaften für Waldbestände in TWS hervorgehoben.

Anforderungen an Waldökosysteme innerhalb TWS, Spezifische Grundlegende Kriterien (SGK):

+ Die Waldbedeckung (Bestockung) muss kontinuierlich über Raum und Zeit gegeben sein. Dieses Faktum erlaubt nur kleinräumige Öffnungen der Waldbestockung (wie etwa kleine Lochhiebe) zur Etablierung der natürlichen Verjüngung. Holznutzungen sind möglich, wenn sie dieser Anforderung entsprechen.

SGK Dauerwald

+ Die Waldökosysteme und Waldbestände sind stabil und resilient (elastisch).

SGK Stabilität und Resilienz (Elastizität) der Waldökosysteme

+ Die Baumartenvielfalt korrespondiert mit der potenziellen natürlichen Waldgesellschaft (PNWG), die Baumartenverteilung korrespondiert mit einem hohen Grad der Trinkwasser-Schutzfunktionalität.

SGK Baumartenvielfalt entsprechend der PNWG

+ Die Verjüngung der Baumarten entwickelt sich erfolgreich und umfasst alle Baumarten der spezifischen natürlichen Waldgesellschaft

SGK Erfolgreiche und diverse Verjüngungsentwicklung

+ Die Waldbestände sind anpassungsfähig gegenüber Klimaveränderungen (durch einen hohen Grad einer adäquaten standortsspezifischen Baumartenvielfalt).

SGK Die Waldbestände sind anpassungsfähig gegenüber veränderten klimatischen Rahmenbedingungen

+ Die Waldbestände sind mehrschichtig und ungleichaltrig, wodurch sich diverse Waldbestands-Strukturen entwickeln.

SGK Mehrschichtige und ungleichaltrige Waldbestände

+ Die Baumarten eines Waldbestands und Waldökosystems weisen genetische Vielfalt auf und stammen aus dem natürlichen Genpool eines Waldökosystems (autochthone, am Standort etablierte Baumarten).

SGK Gen-Pool der autochthonen Baumarten

+ Ein Regime der geringen Störungen für Waldökosysteme in TWS (Stabilität und Resilienz gegenüber natürlichen Störungen und ein möglichst niedriger Grad bezüglich der Management-Störungen wie etwa Holzernte, Forststraßenbau, etc.).

SGK Regime der geringen Störungen für Waldökosysteme in TWS

+ Stabile und resiliente (elastische) Waldbestände bilden die Basis für die Stabilisierung der Boden- und der Humusschichten, welche beide als Speicherort und Filter für das Niederschlagswasser bedeutend sind.

SGK Durch adäquate Waldbedeckung stabilisierte Boden- und Humusschichten

+ Die Dichte der Schalenwild-Population befindet sich auf einem Niveau, welches eine nachhaltige Entwicklung der Waldökosysteme erlaubt (erfolgreiche Naturverjüngungsdynamik aller Baumarten einer PNWG).

SGK Waldökologisch tragfähige Schalenwildbestände

Nachdem die Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TSF) der Waldökosysteme nur dann auf einem adäquaten Niveau gegeben ist, wenn die oben erläuterten SGK erfüllt sind, ist es von grundlegender Bedeutung, in der Waldbewirtschaftung „Best Management Practices“ (BP) anzuwenden. Für alle vier im Projekt CC-WARE bearbeiteten Ökosystem-Typen wurden BP erarbeitet und analysiert. Der BP Katalog wurde als Excel-Tabelle mit operationalisierter Evaluierungs-Information und als jedes BP detailliert beschreibendes Textdokument ausgeführt (www.ccware.eu/ Output Documentation WP4).

4 Schlussfolgerungen

Die finale Ökosystem-Dienstleistung (OEDS), welche im Projekt CC-WARE analysiert wurde, ist „die Versorgung mit reinem Trinkwasser in angemessener Qualität und Quantität“. In diesem Dokument werden alle relevanten Waldfunktionen, welche zur Erbringung dieser finalen OEDS beitragen, qualitativ beschrieben. Die Trinkwasser-Schutzfunktionalität (TSF) von Waldökosystemen wurde in diesem Kontext bezüglich 6 wesentlicher Waldfunktionen mit thematischer Relevanz im Sinne von walddhydrologischen Fragen beschrieben.

Für Zwecke des Trinkwasser-Ressourcenschutzes von herausragender Bedeutung sind Waldspezifische Funktionen wie (1) gute Infiltrationsbedingungen für das Niederschlagswasser, (2) Speicherung und Rückhalt von Niederschlagswasser im Boden- und Interzeptionsspeicher, (3) Schneespeicher-Kapazität, (4) Stabilisierung der Boden- und Humusbildungen, (5) Vermeidung oder Entschärfung von Erosionsprozessen und (6) Filter für das Niederschlagswasser. All diese Waldfunktionen wurden qualitativ beschrieben um somit die TSF in umfassender Form darzustellen.

Die Beschreibung der Waldfunktionen hebt die Notwendigkeit für ein adäquates Management von Wäldern in TWS oder in Einzugsgebieten, welche Trinkwasser-Versorgungsanlagen zugeordnet werden können, hervor. Die wichtigsten Merkmale von Waldökosystemen im Sinne von Spezifischen Grundlegenden Kriterien (SGK), welche für eine optimale TSF gegeben sein müssen, wurden als Übersicht beschrieben. Es wurde hervorgehoben, dass eine optimale TSF von Waldökosystemen nur dann gegeben ist, wenn die Wälder entsprechend Best Management Practices (BP) für Trinkwasser-Schutzgebiete (TWS) bewirtschaftet werden.

5 Literaturliste

- Aber, J.D., Nadelhoffer, K.J., Steudler, P., Mellilo, J.M., 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* 39.
- Baumgartner, A., Liebscher, H.J., (1990). Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Cantu-Silva, I.C., Okumura, T., (1996). Throughfall, Stemflow and Interception Loss in a Mixed White Oak Forest (*Quercus serrata* Thunb.). *J. For. Res.* 1, 123-129.
- Carlyle-Moses, D.E., Flores Laureano, J.S., Price, A.G., (2004). Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *J. of Hydrology* 297, 124-135.
- Eichhorn, K., (1993). Bodenverdichtung durch Forstmaschinen. Diplomarbeit am Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hager, H., Holzmann, H., (1997). Hydrologische Funktionen ausgewählter naturnaher Waldökosysteme in einem alpinen Flusseinzugsgebiet. Projektendbericht. Hydrologie Österreichs, Österreichische Akademie der Wissenschaften.
- Harden, C.P., Scruggs, P.D., (2003). Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* 55, 5-24.
- Kang, S., Kim, S., Oh, S., Lee, D., (2000). Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *Forest Ecology and Management* 136, Issues 1-3, 173-184.
- Keesstra, S.D., Geissen, V., Piirainen, S., Scudiero, E., Leistra, M., van Schaik, L., (2012). Soil as filter for groundwater quality. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 507-516.
- Koeck, R., (2008). Waldhydrologische Aspekte und Waldbaukonzepte in karstalpinen Quellenschutzgebieten in den nördlichen Kalkalpen. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Waldbau (Wien).
- Link, T., Marks, D., (1999). Distribution simulation of snow cover mass- and energy-balance in the boreal forest. *Hydrological Processes* 13, 2439-2452.
- Markart, G., Perzl, F., Klebinder, K., Kohl, B., (2011). Report of work package 5 of the CC-WaterS project. Interreg SEE, www.ccwaters.eu - Output Documentation.
- Marsh, P., (1999). Snow Cover formation and melt: recent advances and future prospects. *Hydrological Processes* 13, 2117-2134.
- Mayer, H., Feger, K.H., Ackermann, B., Armbruster, M., (1997). Schneedeckenentwicklung in Fichtenwäldern im südlichen Hochschwarzwald. *Forstw. Centralblatt* 116, 370-380.
- Pomeroy, J.W., Parviainen, J., Hedstrom, N., Gray, D.M., (1998). Coupled modelling of forest snow interception and sublimation. *Hydrological Processes* 12, 2317-2337.
- Savenije, H.H.G., (2004). The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrological Processes* 18, 1507-1511.
- Shutou, K., Nakane, K., (2004). Change in soil carbon cycling for stand development of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations following clear-cutting. *Ecological Research* 19, 233-244.