

## ANALYSE UND MODELLIERUNG DER WALDWIRKUNG AUF DAS HOCHWASSEREREIGNIS IM PAZNAUN TAL VOM AUGUST 2005

### ANALYSIS AND MODELLING OF THE EFFECT OF FOREST COVER ON THE 2005 FLOOD EVENT IN THE PAZNAUN VALLEY (AUSTRIA)

Bernhard Kohl<sup>1</sup>, Klaus Klebinder<sup>1</sup>, Gerhard Markart<sup>1</sup>, Frank Perzl<sup>1</sup>, Herbert Pirkl<sup>2</sup>, Florian Riedl<sup>3</sup>, Leopold Stepanek<sup>4</sup>

#### ZUSAMMENFASSUNG

Um den Einfluss von Waldausstattung und Waldzustand auf das Hochwasserereignis 22. und 23. August 2005 im Paznauntal zu untersuchen werden im N/A-Modell unterschiedliche Systembedingungen (Zustand 1950 versus 2005) analysiert. Auf der Grundlage von flächendeckenden qualitativen und quantitativen Luftbildinterpretationen beider Zustände wurden Parameter zur Abflussmodellierung abgeleitet. Umfangreiche Standortdaten dienen der Anreichung und Verifizierung der Luftbildinterpretation. Detaillierte hydrogeologische Erhebungen bildeten den Grundstock für die N/A-Modellierungen. Unterschiede der Landnutzung sowohl innerhalb als auch außerhalb des Waldbereiches lassen sich deutlich hervorheben. Die Zunahme an Waldfläche und hydrologisch wirksame Veränderungen im Waldzustand konnten ebenso wie Veränderungen der Freifläche erfasst und beurteilt werden. Die N/A-Modellierungen bilden auf Teileinzugsgebietsebene Auswirkungen dieser Veränderungen auf das Hochwasserereignis 2005 nach Maßgabe des Veränderungsgrades deutlich ab. Bei Betrachtung des Gesamtgebietes wird jedoch die Wirkung der veränderten Landnutzung vernachlässigbar gering. Es kann gezeigt werden, dass die zwar vorhandene, jedoch auf das Gesamtgebiet bezogen vernachlässigbare hydrologische Schutzwirkung des Waldes auf entscheidenden Eigenheiten dieses Extremereignisses beruhen, z.B. der extremen Vorregensumme, der Niederschlagsverteilung, der Niederschlagsdauer und des Ereignistyps im Allgemeinen. Das außerordentliche Niederschlagsereignis vom August 2005 im Paznaun hat die Teilgebieten nachweislich vorhandene Schutzwirkung des Waldes vor Hochwässern regelrecht überfordert.

**Keywords:** Hochwasser, Waldwirkung, N/A- Modellierung

#### ABSTRACT

The impact of changes in forest cover on the flood event of the River Trisanna in the Paznaun valley in August 22<sup>nd</sup> and 23<sup>rd</sup>, 2005 has been investigated by means of process-oriented

<sup>1</sup> Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen, Hofburg – Rennweg 1, 6020 Innsbruck, Österreich (Tel.: +43-512-573933-5132; Fax: +43-512-573933-5135; email: bernhard.kohl@uibk.ac.at)

<sup>2</sup> Büro für Umweltgeologie – Geoökologie GEOÖKO, Gentzgasse 17/1/6, 1180 Wien, Österreich (Tel.: +43-1-4796291; email: herbert.pirkl@chello.at)

<sup>3</sup> Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Langgasse 88, 6460 Imst, Österreich (Tel.: +43-5412-66531; Fax: +43-5412-665312-23; email: florian.riedl@die-wildbach.at)

<sup>4</sup> Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Liebeneggstraße 11, 6020 Innsbruck, Österreich (Tel.: +43-512-596120; Fax: +43-512-581216; email: leopold.stepanek@die-wildbach.at)

hydrological modelling. The effect and influence of different forest cover configurations (status 1950 and 2005) was analysed. Based on qualitative and quantitative aerial image interpretations hydrological response units (HRU) attributed with hydrological parameters for modelling (initial abstraction and water storage, surface runoff coefficient and surface roughness) were derived. Field investigation data (forest site and stand characterisation on approx. 3000 points within the Paznaun valley) were used for calibration and verification of these parameters. Detailed hydro-geological survey and discharge measurements formed the base for hydrological modelling. Differences in land use could be identified clearly within and outside the forest cover. Increase of forest cover and hydrologically effective changes in forest stand characteristics have been detected and evaluated. The impact of these changes on the flood event of August 2005 is shown quite clearly regarding subcatchments of the Paznaun valley according to the degree of variation. The hydrological modelling of the August 23<sup>rd</sup>, 2005, event in the whole Paznaun valley showed only negligible differences between scenario 1950 and 2005. The so “disappeared effects” of forest cover are due to the specific peculiarities of this event, such as an enormous amount of rain during the period before the event, the areal rain distribution, the duration of the event as well as the event type in general. The verifiably protection effects of forest cover on floods in general were overstrained by this extraordinary event.

**Keywords:** flood, effect of forest cover, hydrological modelling

## **EINLEITUNG**

Am 22. und 23. August 2005 führten extreme Niederschlagsmengen zu katastrophalen Hochwasserereignissen in Tirol und Vorarlberg. Im Paznauntal erreichte die Trisanna Abflussspitzen jenseits der HQ<sub>100</sub>-Marke.

In den 50er Jahren des 19. Jahrhunderts erreichte die Entwaldung im Paznauntal einen Tiefpunkt. Der Holzbedarf des mittelalterlichen Bergbaues und Jahrhunderte traditioneller Almwirtschaft reduzierten den Waldbestand beträchtlich (vgl. Abb. 1). Der Zustand vieler verbliebener Waldflächen war hinsichtlich Schichtung, Struktur und Wuchsklasse im Bezug auf die Schutzwirkung des Waldes als kritisch einzustufen.

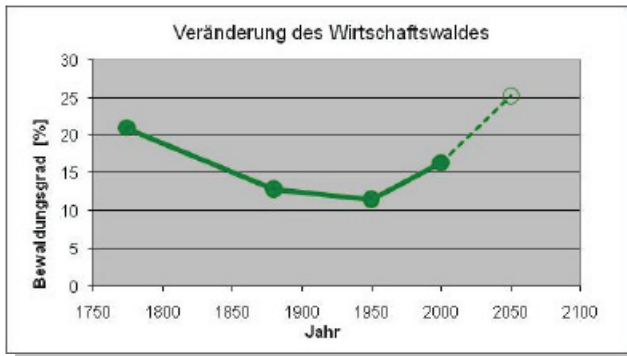
Waldwirkung und Hochwasserschutz ist ein viel diskutiertes Thema. Einen guten Überblick über die vorhandene Literatur zum Thema Waldhydrologie findet sich in den Berichten der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF 2004 und 2006). HEGG (2006) hält fest, dass Bewaldung die Abflussbildung bei Hochwasser nur unter bestimmten Voraussetzungen maßgeblich beeinflusst. Je nach Bodentyp übt der Wald eine mehr oder weniger starke Wirkung auf die Speicherkapazität aus. HUBER (2006) beschreibt wie andere Autoren (KENNEL 2004, MARKART et al. 2006) Wald als natürlichen und kostengünstigen Hochwasserschutz, obgleich auch sie Wald nicht gleich Wald sehen.

In Bezug auf das Hochwasserereignis 23. August 2005 im Paznauntal stand die Frage im Raum, welchen Einfluss denn die Waldausstattung des Tales auf dieses extreme Niederschlagsereignis hatte. Jene, für ihre extrem hohen Regenintensitäten gefürchteten Vb – Wetterlagen könnten mit fortschreitendem Klimawandel im Alpenraum und nördlich davon häufiger auftreten (KIRNBAUER et al. 2008).

Waren Aufforstungs- und Waldverbesserungsmaßnahmen des vergangenen halben Jahrhunderts wirkungslos und ineffizient? Wäre das Ereignis vom August 2005 im Jahre 1950 noch extremer ausgefallen? Oder muss man vermuten, dass das gleiche Ereignis 1950 trotz schlechteren Waldzustandes bei gleichzeitig geringerem Versiegelungsgrad niedrigere Abflussspitzen erzeugt hätte?

Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen initiierte der Forsttechnische Dienst für Lawinen- und Wildbachverbauung das Projekt „HOPWAP - Hochwasser Paznaun - Wald-Ablfluss-Potentiale“.

Ziel dieses Projektes ist es, mittels prozessorientierter hydrologischer Modellierung die Wirkung und Effekte der veränderten Landnutzung und des Waldes im speziellen zu analysieren. Die Orientierung an den stattfindenden Prozessen und die Plausibilisierung der Nachbildung des Hochwasserereignisses vom August 2005 erlauben die Simulation unterschiedlicher Landnutzungsszenarien und auf diesen aufbauend die Überprüfung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen.



**Abb. 1:** Veränderung des Bewaldungsprozentes im Paznauntal. Künftige Bewaldung ist als potentielle bewaldbare Fläche zu verstehen (Quelle: FROMME 1952, SEGER 2001).

**Fig. 1:** Forest cover changes in the Paznaun valley in percent of the basin area. Prospective forest cover is understood as possibly afforestable area (Source: FROMME 1952, SEGER 2001).

## METHODE

Das Projekt HOPWAP wurde in die drei Phasen Lokalisierung, Regionalisierung und N/A-Modellierung gegliedert.

Zur Lokalisierung wurde anhand der am BFW vorhandenen Berechnungsdaten typische hydrologische Reaktionseinheiten (HRE) definiert und deren hydrologische Reaktion auf das Hochwasserereignis 2005 bewertet und modelliert. Weiters wurden die Waldfunktionen-Indikatoraufnahmen des Projektes FOMUMIS (Pitterle und Perzl 2000, 2003), die im Zuge des Projektes HOPWAP digitalisiert wurden, als Punktdaten der aktuellen Waldsituation hydrologisch beurteilt.

Zur Bewertung der Waldsituation 1950 wurden Waldstandsaufnahmen aus den Jahren 1932 bis 1956 im Sinne der oben genannten hydrologischen Reaktionseinheiten interpretiert.

Die Regionalisierung erfolgte flächendeckend mittels Auswertung aktueller und alter Luftbildserien. Im Maßstab 1:5.000 wurden an Orthophotos hydrologische Reaktionseinheiten, im Waldbereich unterschiedliche Hauptwaldtypen, Einheiten unterschiedlicher Wuchsklassen, unterschiedlicher Schichtung und Bestockung abgegrenzt. Diese Standortparameter wurden laufend mit den Daten der Waldfunktionen-Indikatoraufnahmen abgeglichen.

Entsprechend der vorangegangenen Definition hydrologischer Reaktionseinheiten wurden den ausgeschiedenen Landnutzungseinheiten die Parameter Abflussklasse, Oberflächenrauheit und Speicherpotenzial zugewiesen.

Als Grundlage für die Hochwassermodellierung wurden im Projektgebiet umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt und über Luftbildauswertung und Geländeerhebungen das aktuelle Gerinnesystem erfasst. Analog wurden geomorphologische Informationen erarbeitet. Systematische wiederholte Durchflussmessungen lieferten das Fundament zur Charakterisierung typischer Einzugsgebietsreaktionen. Für die Abflussmodellierung stellen die Karte der hydrogeologischen Abflussprofiltypen und die Ausscheidung von Prozessflächen ohne Gerinneanschluss im Ereignisfall eine bedeutende Eingangsgröße dar. Zur Ermittlung des Basisabflusses aller Teileinzugsgebiete und zur Plausibilisierung der N/A-Modellergebnisse wurden die Durchflussmessungen, die Hochwasser 2005 - Ereignisdokumentation (BMLFUW 2006) und Pegelmessungen des Ereignisses der Vorarlberger Illwerke herangezogen.

**Tab. 1:** Modellparameter für die N/A-Modellierung (Art: d.a.P. = direkt abgeleitete und erhobene Parameter; j.P. justierbare Parameter für die Modelleichung).

**Tab. 1:** Model parameters (Art: d.a.P. = directly deduced or collected parameters; j.P. setting parameters for model calibration).

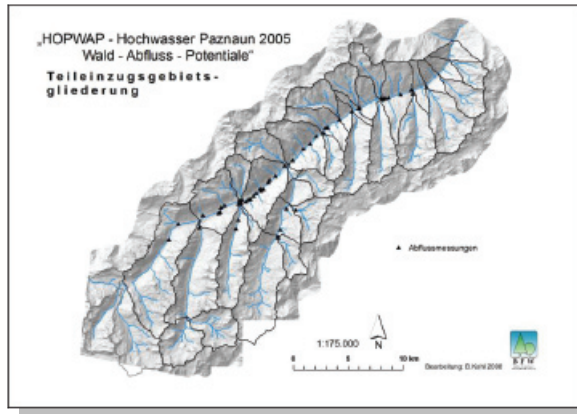
Parameter als Mittelwerte je Teileinzugsgebiet	Einheit	Art
Vorregen	[mm]	d.a.P.
Niederschlag (Intervall 15min, 1x1 km)	[mm]	d.a.P.
Teileinzugsgebietsfläche	[km <sup>2</sup> ]	d.a.P.
Durchschnittlicher Fließweg am Hang (Oberfläche ≙ Zwischenabfluss)	[m]	d.a.P.
Durchschnittliche Hangneigung (Oberfläche ≙ Zwischenabfluss)	[°]	d.a.P.
Flächenanteile je Abflussklasse (MARKART et al. 2004)	[ha]	d.a.P.
Flächenanteile je Rauheitsklasse (MARKART et al. 2004)	[ha]	d.a.P.
Flächenanteile je Speicherpotentialklasse	[ha]	d.a.P.
Flächenanteile je Abflussprofiltypenklasse	[ha]	j.P. / d.a.P.
Prozentanteile der hydrogeologisch nicht beitragender Flächen	[%]	d.a.P.
Widerstands- und Verzögerungsbeiwert Zwischenabfluss	[]	j.P.
Basisabfluss	[m <sup>3</sup> /s]	d.a.P.
Gerinnelänge	[m]	d.a.P.
Gerinneneigung	[°]	d.a.P.
Gerinnerauhigkeit, D90	[m]	j.P. / d.a.P.

Als wesentliche, treibende Eingangsgröße für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung dient die zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung des Hochwasserereignisses 2005 wofür Computermodelldaten verwendet wurden, auf welche im Folgenden noch näher eingegangen wird. Unter Berücksichtigung der beim Ereignis herrschenden Vorbedingungen wurde das Hochwasser mit einer stark modifizierten Version des hydrologischen Modells ZEMOKOST (STEPANEK et al. 2004) anhand der aktuellen Landnutzung nachgerechnet und plausibilisiert. Anschließend erfolgte die Modellierung der Waldflächenszenarien 1950. Tabelle 1 führt die verwendeten Modellparameter an, unter Differenzierung welche Parameter direkt abgeleitet bzw. erhoben wurden und welche als Stellschrauben der Modellkalibrierung dienen.

## TOPOGRAPHIE

Mittels digitalem Geländemodell (10x10 m), zur Verfügung gestellt vom LFRZ (Land-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft - BMLFUW) wurde das hydrologische Einzugsgebiet der Trisanna (Paznauntal, 409 km<sup>2</sup>) abgegrenzt und nach den maßgeblichen Zubringern in 37 Teileinzugsgebiete zwischen 2 und 40 km<sup>2</sup> Größe gegliedert. Im

Geographischen Informationssystem wurden für jedes Teileinzugsgebiet die durchschnittliche Hangneigung und der durchschnittlich maximale Fließweg am Hang abgeleitet. Als mittlere maximale Fließstrecke wurde für alle Zellen (10x10m) eines Teileinzugsgebietes mit einer Akkumulation = 1, also alle Zellen unterhalb einer Wasserscheide, der Fließweg bis zu einer Gerinnezelle berechnet und gemittelt. Für die Fließwege des Zwischenabflusses wurden dieselben Hanglängen angenommen.



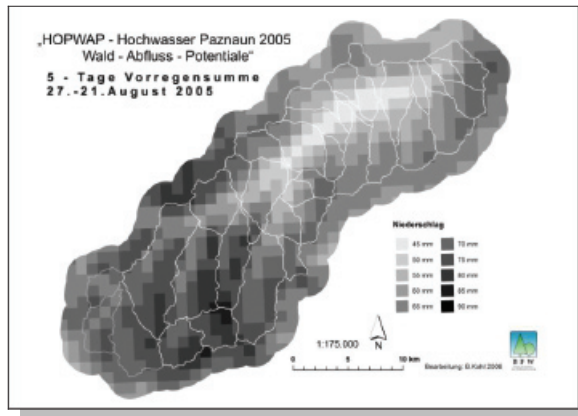
**Abb. 2:** Teileinzugsgebietsgliederung, Gerinnenetz und Abflussmessstellen im Paznauntal.  
**Fig. 2:** Subcatchments, locations of discharge measurement and channel network in the Paznaun valley.

Die aus hydrogeologischen Grundlagen und Teileinzugsgebietsgliederung abgeleiteten Gerinneabschnitte wurden über ihre Höhen- und Horizontalabstand definiert, ihre Länge und ihr Pauschalgefälle berechnet. Das Laufzeitverfahren ZEMOKOST benötigt für die Berechnung der Abflussgeschwindigkeit im Gerinne einen Rauheitsparameter, der im verwendeten Berechnungsansatz nach den Empfehlungen gemäß ETALP (BMLFUW, 2003) als Kornrauigkeit (D90) ausgedrückt wird. Diese Kornrauigkeit wurde für die jeweiligen Gerinneabschnitte im Gelände okular geschätzt. Im Zuge der Modellierung, vor allem im Hauptgerinne der Trisanna, entspricht jedoch dieser D90 nicht mehr einer Korngröße, sondern allgemein einem Widerstandsbeiwert. Ausuferung, Erosion und Verlandung können nur durch höhere D90-Werte simuliert werden. Für die seitlichen Zubringer wurde der im Feld geschätzte Korndurchmesser verwendet.

## NIEDERSCHLAG

Essentiell für plausible (Niederschlags-Abfluss-)Modellierungen sind die das Modell antreibenden Niederschlagsdaten. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) stellte für das Projekt HOPWAP INCA-Daten (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) zur Verfügung. Zur Zeit des Hochwasserereignisses war das Wetterradar Valuga noch nicht in Betrieb. Die INCA-Analyse basiert deshalb fast ausschließlich auf Stationsdaten (Stationen: Prutz, Landeck, Pitztaler Gletscher). Die Station Ischgl und Galtür waren am 22.8.2005 um 23 Uhr, also annähernd am Höhepunkt des Ereignisses, ausgefallen und in diesem Zeitraum für die INCA-Auswertung nicht zu verwenden. Um ein möglichst vollständiges und naturgetreues Abbild des Niederschlagsereignisses zu erhalten, wurden nachträglich weitere Stationsdaten (Kappl -

Oberhaus, Ladis) in die INCA-Auswertung eingerechnet. Die überarbeiteten INCA-Daten (Niederschlag und Temperatur) in der Auflösung 1x1 km und 15 min Zeitintervall wurden für die Modellierung je Teileinzugsgebiet gemittelt und in 1 min Zeitschritten verwendet. Die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung wurde dahin interpretiert, dass beim Hochwasserereignis auch bis in die Gletscherregionen von flüssigen Niederschlägen ausgegangen werden kann.



**Abb. 3:** Regensumme 5 Tage vor dem Hochwasserereignis 22.-23. August 2005.  
**Fig. 3:** 5days pre event rainfall sum (05-08-17 to 05-08-21).

Die Vorbedingungen wurden im Modell dahingehend berücksichtigt, dass allen Hydrologischen Reaktionseinheiten (HRE) aus den Erfahrungen der Beregnungsversuche am Bundesforschungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und den zur Verfügung stehenden Geländedaten ein Speichervolumen zuerkannt wurde, das entsprechend der 5 Tage Vorregensumme eine mehr oder weniger große Vorverfüllung aufwies. Abbildung 3 zeigt die Regenmenge der letzten fünf dem Ereignis vorangegangenen Tage.

### LANDNUTZUNGSÄNDERUNG, ABFLUSS, RAUHEIT, SPEICHERPOTENTIAL

Anhand der am BFW vorhandenen Beregnungsdaten wurden typische hydrologische Reaktionseinheiten (HRE) als Landnutzungshaupttypen definiert und ihre Reaktion auf das Hochwasserereignis 2005 bewertet und modelliert.

Tabelle 2 listet diese Landnutzungstypen auf und gibt ihre Flächenanteile in Hektar für die Jahre 1950 und 2005 wieder. Zudem ist die prozentuelle Veränderung bezogen auf das Jahr 1950 angeführt. Für die weitere hydrologische Beurteilung wurden die Waldfunktions-Indikatoraufnahmen des Projektes FOMUMIIS als Punktdaten der aktuellen Waldsituation herangezogen. Bei den FOMUMIIS-Daten (Forest Multiple Use Measurable Indicator Identification System) handelt es sich um eine luftbildgestützte taxative terrestrische Erhebung von Standorts- und Vegetationsmerkmalen auf Waldflächen und unbewaldeten Flächen mit Bezug zu den Waldfunktionen (PITTERLE & PERZL 2000, 2003). Dieser Datensatz mit etwa 4000 Punktaufnahmen und flächiger Abgrenzung von Homogenbereichen, deckt etwa ein Viertel der Gesamtfläche des Pannauntales ab. Für das Projekt HOWAP waren die vorhandenen Daten des BMLFUW für folgende Bereiche verwendbar:

- Erfassung und Überprüfung der Baumartenzusammensetzung in Kombination mit anderen Daten und Methoden und Übertragung derselben für fehlende Bereiche.
- Abschätzung der Bodenbedeckung in den Beständen. Die Bodenbedeckung ist für die Wasserspeicherung im Boden und die Infiltration bzw. den oberflächennahen Abfluss relevant. Die Daten enthalten eine sehr detaillierte Aufnahme der unmittelbaren Bodenbedeckung in den Beständen (Deckungsgrad Bodenvegetation, Streu, Totholz, Blockbedeckung). Diese Informationen können mit Hilfe der Luftbildinterpretation nicht oder nur für gering übersicherte Flächen gewonnen werden.

**Tab. 2:** Aufstellung der Landnutzungshaupttypen (LN\_Htyp  $\equiv$  hydrologische Reaktionseinheit HRE) mit deren Flächenanteilen in Hektar 2005 und 1950 und ihrer prozentuellen Veränderung.

**Tab. 2:** List of main land use types (LN\_Htyp  $\equiv$  hydrological response unit HRU) with surface ratio (hectare) for the land use scenarios 2005 and 1950 and change in percent.

LN_Htyp	Beschreibung	2005	1950	$\Delta$ [%]
11100	Wohn- und Wirtschaftsflächen	212	76	177
11200	Freizeitflächen (Sportanlagen)	7	0	
11300	Sonderflächen	4	3	25
11400	Bau-, Deponie-, Planieflächen	93	14	575
12000	Verkehrsflächen (Straßen)	472	115	311
13000	Schiwege (für den Schibetrieb errichtete Straßen)	13		
14000	Schlipisten	493		
21110	alpine Rasen und Zwergsträucher auf Fels	3683	3680	0
21120	Fels der Gipfellagen	7860	7764	1
22000	Schutt und kluftige Felsflächen	6941	6606	5
23000	Erosionsflächen	141	161	-12
31100	alpine Rasen und Zwergsträucher auf Schutt	4384	4345	1
32100	Mähwiesen	1689	2506	-33
32200	Weideflächen und Almweiden	1873	2381	-21
33000	Feuchtfelder	406	436	-7
40000	Zwergstrauchheiden	2676	2936	-9
51000	Laubholzgebüsch (ohne Grünerlen)	4	2	127
52000	alpines Laubholzgebüsch mit Latsche/Nadelholz gemischt	412	317	30
53000	Latschen (Deckungsanteil Latsche $\geq 70$ %)	165	162	2
54000	Grünerlengebüsche	1052	869	21
71000	Nadelwald (Deckungsanteil Nadelholz $\geq 70$ %)	6005	5502	9
72000	Laubwald (Deckungsanteil Laubholz $\geq 70$ %)	11	6	84
73000	Laub-/Nadel-Mischwald	65	49	31
74100	räumige Baumbestockung an der Waldgrenze	383	339	13
74200	sonstige Räumden und Blößen (im Wald)	496	709	-30
91000	Seen	44	30	44
92000	Fließgewässer	160	152	5
93000	Gletscher	1115	1688	-34
94000	Verlandungs-, Mäanderzonen	43	51	-15

Zur Bewertung der Waldsituation 1950 wurden Waldstandsaufnahmen (Operate) herangezogen, die den Waldstand um 1932 repräsentieren. Weiters standen Feldaufnahmen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Außenstelle für subalpine Waldforschung in Innsbruck (in den Jahren 1951 bis 1953 aufgenommen) zur Verfügung (PITSCHMANN et al. 1973). Weitere Grundlagen - Auswertungen über die Waldsituation im Paznauntal der 50er Jahre - finden sich auch in den Arbeiten von FROMME (1952, 1957). Die verwertbaren Angaben wurden im Sinne der oben genannten HRE's herangezogen und interpretiert.

**Tab. 3:** Flächen forstlicher Bestockung im Paznauntal – Veränderungen zwischen 1950 und 2005 (Brutto = inkl. eingeschlossene Siedlungs-, Verkehrs-, und Gewässerflächen bzw. Schipisten; Netto = exkl.).

**Tab. 3:** Area under forest management in the Paznaun valley – changes between 1950 and 2005 (Brutto = gross = enclosed settlements, roads, water bodies and ski lanes within forested areas; Netto = net = exclusive).

[km <sup>2</sup> ]	[%]	Flächen
409,0		Gesamteinzugsgebietsfläche
90,8		zwischen 1950 und 2005 Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Brutto)
78,0		1950 Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Brutto)
89,8		2005 Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Brutto)
77,3	19	1950 Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Netto) bzw. Bewaldungsgrad 1950 [%]
85,9	21	2005 Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Netto) bzw. Bewaldungsgrad 2005 [%]
0,7		1950 eingeschlossene Siedlungs-, Verkehrs-, und Gewässerflächen
3,9		2005 eingeschlossene Siedlungs-, Verkehrs-, und Gewässerflächen bzw. Schipisten
8,6	11	Netto-Waldzunahme zwischen 1950 und 2005 (Bezug 1950)
12,8		1950 (gegenüber 2005) noch keine Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Brutto)
11,8		1950 (gegenüber 2005) noch keine Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Netto)
1,0		2005 (gegenüber 1950) keine Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Brutto)
1,0		2005 (gegenüber 1950) keine Flächen mit forstlicher Bestockung > 30% (Netto)
74,0	96	1950 bestockte Flächen sind 2005 bestockt geblieben (Netto)

Unter Bezugnahme auf diese Vorarbeiten und Grundlagendaten wurden im Maßstab 1:5.000 (teilweise bis 1:1.000 im Waldbereich) an aktuellen digitalen Orthophotos und an den digitalisierten Ortholuftbildern der Flüge der Waldstandsaufnahme der frühen 50er Jahre Homogenbereiche der in Tabelle 2 angeführten Landnutzungshaupttypen abgegrenzt. Im Waldbereich wurden zusätzlich Flächen gleicher Bestandeseigenschaften hinsichtlich Bestockungsgrad, Wuchsklasse, Schichtung und Gesamtdeckung ausgeschieden und bewertet. Diese Auswertungen lieferten als Ergebnis zwei Landnutzungsdatensätze, aus denen sich die Veränderungen im Paznauntal der vergangenen 55 Jahre rekonstruieren und kalkulieren lassen. Einerseits lassen sich natürliche Veränderungen nachverfolgen (z.B. Gletscherrückgang, Entstehung und Wiederbewaldung von Erosionsflächen und Lawenstrichen, Anstieg der Waldgrenze,...), andererseits können anthropogene Eingriffe deutlich bemessen werden (z.B. Siedlungsentwicklung, Straßenbau, Auflassen von Mähwiesen, Erschließung von Schigebieten,...).

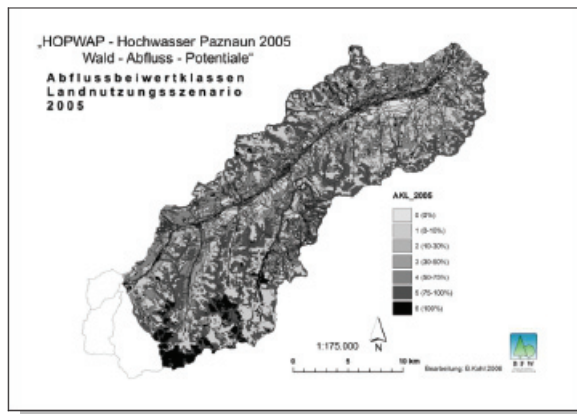
Im Waldbereich, dessen Veränderung Hauptaugenmerk des Projektes HOPWAP ist, werden natürliche sowie von der Bewirtschaftung hervorgerufene Veränderungen ersichtlich. So ist beispielsweise die Bewaldung des Paznauntales von 1950 bis 2005 von 19 auf 21 Prozent angestiegen, was einer Waldzunahme von 11 Prozent entspricht (vgl. Tabelle 3).

Hinsichtlich der qualitativen Veränderungen im Waldbereich konnte festgestellt werden, dass der Überschirmungsgrad aller Flächen mit forstlicher Bestockung seit 1950 von durchschnittlich 46 auf 52 Prozent angestiegen ist.

Die als kleinflächig schlagweiser Hochwald angesprochene Waldfläche hat um 640 ha bzw. relativ um rund 340 % zugenommen. Diese deutliche Zunahme kleinflächig bewirtschafteter Wälder geht überwiegend zu Lasten der Fläche der einschichtigen und schwach gestuften großflächigen (> 1 ha) Stangen- und Baumhölzer (Abnahme um 470 und 340 ha bzw. relativ um 50 % und 11 %). Das ist eine Folge der Veränderung der Bewirtschaftungsart welche sich aus der Luftbildinterpretation und den Operatsbeschreibungen ableiten lässt und zu großflächig einschichtigen Strukturen führte. Sie dürfte auch der Grund für die doppelt so hohe Fläche an Stangenholz (bis schwaches Baumholz) um 1950 im Verhältnis zum Jahr 2005 sein. Die Bewirtschaftungsart änderte sich auch mit der zunehmenden Erschließung der Waldflächen durch Forststraßen. Im Bereich dichter Erschließung an den unteren Talflanken überwiegt nun kleinflächig schlagweise Bewirtschaftung, Plenterung und Femelung (Loch- und Kleinkahlschlag). Großflächig einschichtige Baumhölzer in den weniger dicht erschlossenen Lagen werden vermehrt durch Femelung verjüngt.



Diese Veränderung des Waldes in Richtung kleinflächig strukturierter Wald ist im Verhältnis zur Bewirtschaftung um bzw. vor 1950 aus schutztechnischer Sicht und hydrologisch vermutlich günstig. Durch die kleinflächige schlagweise Bewirtschaftung entstehen zahlreiche Ränder und Säume. Dadurch gelangt Licht in die Bestände und auf den Boden, ohne dass der Schlussgrad der Bestände vermindert wird. Auch bei geschlossenem Kronendach eines Kollektivs kann sich Bodenvegetation entwickeln und werden infiltrationshemmende Streuauflagen abgebaut. Bodenbedeckung mit Bodenvegetation und Totholz ist ein wesentlicher Faktor zur Verminderung des oberflächennahen Abflusses. Die hydrologischen Auswirkungen der Veränderungen in der Landnutzung wurden über die vordefinierten hydrologischen Reaktionseinheiten (HRE) in Form von Abflussbeiwert-, Oberflächenrauheits- und Speicherpotentialkarten ausgewiesen. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Karte der Oberflächenabflussbeiwertklassen für das Landnutzungsszenario 2005.



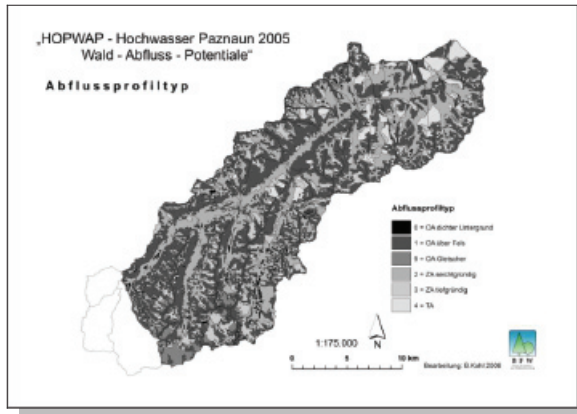
**Abb. 4:** Oberflächenabflussklassen für das Landnutzungsszenario 2005.  
**Fig. 4:** Surface runoff classes for scenario land use 2005.

## HYDROGEOLOGIE

Im Unterschied zu kurzzeitigen Starkniederschlägen, deren Reaktion sich zumeist auf erhöhten Oberflächenabfluss konzentriert, verlagert sich bei Dauerregen der Abflussprozess vermehrt in den Untergrund. In einem eigenen Arbeitsschritt wurden hydrogeologische Grundlagen für die Hochwassermodellierung Paznaun erarbeitet. Hauptziel dieser Untersuchungen war die Identifizierung von Flächen im Einzugsgebiet der Trisanna, die durch Abfluss im Untergrund zum Hochwasser August 2005 beigetragen haben bzw. der Ausschluss solcher Flächen, die keinen Abfluss lieferten. Basis für die hydrogeologische Beurteilung bildeten Auswertungen von Orthophotos zum einen hinsichtlich des aktuellen Gerinnesystems, sowie der Verteilung von Quellen/Quellhorizonten und Feuchtfächen, zum anderen hinsichtlich geomorphologischer Informationen (Auswertung der Flächenverteilung tiefgründiger Massenbewegungen z.B. ausgedehnte Talzuschübe). In Zusammenschau von Orthophotos, digitalem Höhenmodell, geologischer Karte und geomorphologischen Detailinformationen wurden die Massenbewegungskörper für das spezifische Projektziel abgegrenzt. Geländekontrollen, ergänzende Aufnahmen und systematische Abfluss-

/Durchflussmessungen an 53 ausgewählten Messstellen komplettierten die hydrogeologischen Arbeiten.

Als Produkt für die hydrologische Modellierung resultierten daraus eine Abflusstypenkarte (vgl. Abbildung 5) und eine Karte von Flächen, die im Ereignisfall vom Abflussprozess auszuschließen sind sowie eine Ableitung unterschiedlicher Abflussreaktionen von Teileinzugsgebieten aus den systematischen Abfluss-/Durchflussmessungen. Letztere waren für die Plausibilisierung der Modellrechnungen bedeutungsvoll.



**Abb. 5:** Abflussprofiltypenkarte Paznaun.  
**Fig. 5:** Map of dominant runoff processes.

## MODELLERGEBNISSE

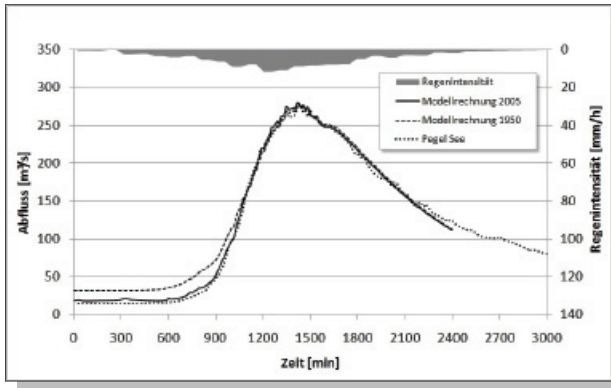
Grundlage für die hydrologische Modellierung stellte eine stark modifizierte Version des Laufzeitverfahrens ZEMOKOST (STEPANEK et al. 2004) dar. Dieses Modell zur Bemessung von Hochwässern bei Starkregen in kleinen Wildbacheinzugsgebieten ermöglichte durch die Verwendung intensitätsabhängiger, variabler Abflussbeiwerte, der Berücksichtigung von Oberflächenrauheit und vor allem der Bezugnahme auf unterschiedliche Speicherpotentiale von Standorten die Modellierung verschiedener Landnutzungsszenarien.

Wesentliche Modifikationen waren einerseits in Bezug auf die Verwendung einer zeitlichen und räumlichen Verteilung des Niederschlages und andererseits für die Berücksichtigung der Laufzeit von oberflächennahem und tiefgründigem Zwischenabfluss notwendig.

Die Geschwindigkeit des Beitrages aus dem Untergrund wurde mittels eines „Rauheitsfaktors“ an den Ergebnissen der Ereignisdokumentation, an den unterschiedlichen Abflussreaktionen von Teileinzugsgebieten aus den systematischen Abfluss-/Durchflussmessungen und an den wenigen vorhandenen Pegeldata geeicht (vgl. Tab 1). Mit diesem validierten Modell wurde dann der Abfluss für das Landnutzungsszenario 1950 gerechnet.

Aus dem Vergleich der Abflussbeiwertkarten 1950 und 2005 (vgl. Abb.4) lässt sich ersehen, dass im Starkregenfall in einzelnen Teileinzugsgebieten Veränderungen in der Größenordnung von minus 12 bis plus 49 Prozent Oberflächenabfluss anzutreffen sind. Die Auswirkungen im Starkregenereignis sind, abhängig vom Überregnungsszenario und der Größe des Teileinzugsgebietes, entsprechend hoch. Auch die Modellrechnung des Ereignisses vom

August 2005 zeigt für einzelne Teilgebiete seit 1950 prozentuell sehr hohe Veränderungen in der Abflussspitze (-25% bis +100%). Absolut betrachtet jedoch sind Veränderungen der Abflussspenden dieser Teileinzugsgebiete verschwindend gering ( $< 1\text{m}^3/\text{s}$ ).



**Abb. 6:** Modellierte Abflussganglinien Landnutzungsszenarien 1950 und 2005 – Einzugsgebiet Trisanna und Ereignisganglinie des Abflusspegels See (Quelle: Vorarlberger Illwerke).

**Fig. 6:** Simulated hydrographs for land use scenarios 1950 and 2005 – Trisanna, Paznaun valley and hydrograph of gauge See (Source: Vorarlberger Illwerke).

In Abbildung 6 sind die Abflussganglinie des Pegels See und die modellierten Abflüsse der beiden Landnutzungsszenarien für das ganze Paznauntal dargestellt. Die höchste modellierte Variation der Abflussspitzen in einzelnen Teileinzugsgebieten liegt zwischen  $\pm 5\text{m}^3/\text{s}$ . Die modellierte Veränderung der Abflussreaktion des Gesamteinzugsgebietes der Trisanna ist aus Abbildung 6 erkennbar. Mit dem Verlust der Wirksamkeit der Kraftwerksableitungen nähern sich die Abflussganglinien der Landnutzungsszenarien sehr stark an. Die Abflussspitze liegt 2005 um 1,6% höher als im Szenario 1950.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Quantitative und qualitative Verbesserungen der Waldausstattung hinsichtlich hydrologischer Schutzwirkung sind im Paznauntal nachweisbar. Im Starkregenfall können diese Besserungen in Teileinzugsgebieten Abflussspitzen mindern bzw. Verschlechterungen kompensieren. Im speziellen Ereignisfall Augusthochwasser 2005 jedoch war die vorhandene Schutzwirkung des Waldes vor Hochwässern regelrecht „überfordert“ bzw. nicht mehr wirksam. Mehrere Gründe sind hierfür maßgeblich:

- Enorme Niederschlagssummen (inkl. 5 Tage-Vorniederschlag je nach Teileinzugsgebiet zwischen 108 und 202 mm) brachten auch die Waldflächen an den Rand der Sättigung ihres Speicherpotentials.
- Hydrologische Verbesserungen im Waldbereich des Paznauntales betreffen nur einen sehr geringen Flächenanteil: Bewaldungsprozent 1950 19 Prozent, 2005 21 Prozent.
- Die Niederschläge des Ereignisses 22.-23. August 2005 waren im waldfreien Bereich deutlich höher als in den bewaldeten Teilen.
- Anthropogene Veränderungen egalieren in zusehendem Maße die hydrologische Schutzwirkung aus dem Waldbereich (Schipisten, Planien, Versiegelungen,...).

## DANK

Das Projektteam HOPWAP dankt DI Siegfried Sauer Moser, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, DI Dr. Dieter Stöhr, Landesforstdirektion Tirol und DI Hubert Steiner, Abteilung Wasserwirtschaft des Amtes der Tiroler Landesregierung, und dem BFW für die Finanzierung des Projektes. Dank gilt ebenso der Gebietsbauleitung Oberes Inntal für die Unterstützung der Geländearbeiten (Herrn Alois Gabl), Herrn DI Günter Moser, Vorarlberger Illwerke AG, Herrn DI Wolfgang Tinkl vom LFRZ, Dr. Wolfgang Gattermayr, Mag. Klaus Niedertscheider und Ing. Martin Neuner von der Abteilung Hydrographie, Dr. Hermann Gspan von der Abteilung Vermessung und Geologie und Dr. Dieter Stöhr von der Landesforstdirektion Tirol für die Bereitstellung von Daten. Ebenso bedanken wir uns bei Dr. Thomas Haiden, Mag. Klaus Stadlbacher und Mag. Dr. Andreas Schaffhauser von der ZAMG für die Bereitstellung der INCA-Daten.

## LITERATUR

- BMLFUW (2003): „Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten (ETALP - Erosion, Transport in Alpinen Systemen).“ S.716.
- BMLFUW (2006): „Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation. Teilbericht der Wildbach- und Lawinenverbauung. S.126.
- Fromme G. (1952): „Schach der Waldverwüstung.“ Teile I-III. Österreichisches Produktivitäts-Zentrum; Überreuter Verlag.
- Fromme G. (1957): „Der Waldrückgang im Oberinntal (Tirol). Untersuchungen über das Ausmaß, die Ursachen und Folgeerscheinungen des Waldrückganges in einem Gebirgslande sowie über die Aussichten der Wiederaufforstung.“ Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn, (54): S.222.
- Haiden T., Kann A., Stadlbacher K., Steinheimer M., Wittmann C. (2006): „Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) - System overview.“ ZAMG internal report, 24p.
- Hegg C. (2006): „Waldwirkung auf Hochwasser.“ LWF-Wissen Nr. 55, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2006, 29-33.
- Huber Th. (2006): „Wald – ein natürlicher und kostengünstiger Hochwasserschutz.“ LWFaktuell, Nr. 52. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2004, 33-34.
- Kennel M. (2004): „Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wald und Forstwirtschaft in Bayern.“ LWF Wissen, Nr. 44, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2004.
- Kirnbauer R., Kohl B., Formayer H., Kromp-Kolb H. (2008): „Coupling Climate Change and hydrological Models to Calculate the Design of Torrent Catchments.“ Natural Hazard Report Chapter 2 (Contribution of BMLFUW - Austria), Interreg III B Project CLIMCHALP.
- LWF (2006): „Wald – Schutz vor Hochwasser.“ LWF-Wissen Nr. 55, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2006, 83.
- Markart G., Kohl B., Perzl F. (2006): „Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung - eine unterschätzte Größe?“ LWF-Wissen Nr. 55, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising 2006, 34-43.
- Pitschmann H., Reisigl H., Schiechl H.M., Stern R. (1973): „Karte der Aktuellen Vegetation 1:100 000 II Teil: Blatt5, Silvretta und Lechtaler Alpen. Documents de Cartographie Ecologique; V.11.
- Pitterle A., Perzl F. (2000): „Kennwertbestimmung für regionale Waldschutzpotentiale sowie Schutzerfüllungsgrade“, unveröffentlichter Bericht an das BMLFUW, Abt. Vc7.
- Pitterle A., Perzl F. (2003): „Schutzwaldinventur 2000-2002. FOMUMIIS-Bewertung der Schutzwirkungen im Schutzwald außer Ertrag.“ Endbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Waldbau-Institut. BOKU-Wien.
- Seger, M. (2001): „Rauminformationssystem Österreich - ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes.“ VGI: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation; 89/2; S.101-110.
- Stepanek, L., Kohl B., Markart G. (2004): „Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss.“ Internationales Symposium Interpraevent 2004 – Garda / Italien, Tagungspublikation, Band 1, I/101-112.