

Outflow forecast on a mountain river! (Emergency Management in the Canton of Nidwalden)

Werner Fessler, Dipl. Kult. Ing. ETH¹; Markus Klauser, Dr. sc. ETH¹, Dipl.Ing.; Peter Seitz, Dipl. Ing.¹;
Josef Eberli, Dipl. Kult. Ing. ETH¹

ABSTRACT

Emergency management in the Canton of Nidwalden ensures timely and targeted intervention in case of a flood event on the Canton's main river, the „EngelbergerAa“. In case of an event, the emergency planning includes the definition of processes and responsibilities as well as monitoring. It provides necessary resources and basis for decision making. In addition, a reliable forecast of the expected development is fundamental for an effective intervention.

However, customary rainfall-outflow models do not represent the EngelbergerAa, a river characterized by steeply rising hydrographs with pronounced peaks. The Canton Nidwalden developed for that reason a customized rainfall-outflow model, based on a simple three-storage-reservoir-system as a function of time. The developed model for outflow-prediction in the EngelbergerAa has proven its steadiness during various incidents and generated valuable services. Despite the simple architecture of the applied algorithms, the tool allows to trigger and control the necessary measures at the right time. Though, the experience and assessment of management staff as well as task forces have to complete the resulting forecasts.

Durch die Notfallorganisation wird im Kanton Nidwalden sichergestellt, dass bei Hochwasser an der Engelberger Aa gezielt und rechtzeitig interveniert wird. In der Notfallplanung werden, in Berücksichtigung relevanter Kennwerte, für den Ereignisfall Abläufe, Überwachungen und Zuständigkeiten festgelegt, sowie die erforderlichen Hilfsmittel und Entscheidungsgrundlagen bereitgestellt. Entscheidend für eine wirkungsvolle Intervention ist aber auch eine zuverlässige Vorhersage der zu erwartenden Entwicklung.

Gebräuchliche Niederschlag-Abfluss-Modelle werden dem Gebirgsbach-Charakter der Engelberger Aa mit einer steil ansteigenden Abflussganglinie und einer ausgeprägten Spitze jedoch kaum gerecht. Für die Vorhersage des erwarteten Abflusses wird deshalb ein - beim Tiefbauamt des Kantons Nidwalden entwickeltes - Niederschlags- Abflussmodell eingesetzt. Das "N-A-Modell Engelberger Aa" simuliert grundsätzlich ein integrales Drei-Speicher-System in Funktion der Zeit. Das für die Vorhersage an der Engelberger Aa entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell hat sich während verschiedenen Ereignissen bewährt und wertvolle Dienste geleistet. Trotz der einfachen Architektur der Simulationsalgorithmen erlaubt die Abflussvorhersage - ergänzt durch Erfahrungen und Beurteilungen von Führung und

¹ Tiefbauamt Kanton Nidwalden, Stans, SWITZERLAND, werner.fessler@nw.ch

Einsatzkräften - die notwendigen Massnahmen der Notfallplanung rechtzeitig auszulösen und zu steuern.

KEYWORDS

Emergency management, Krisen-Management; Emergency planning, Notfallplanung; outflow forecast, Abfluss-Vorhersage; integral rainfall-outflow model with three storage reservoirs, integrales Niederschlag-Abfluss-Modell mit drei Speichern; Excel routine mountain stream, Excel-Routine Gebirgsbach

EINFÜHRUNG

Hochwasserschutz ist dann wirksam, wenn vorausschauende, organisatorische Massnahmen der Notfallplanungen optimal mit raumplanerischen und baulichen Massnahmen korrespondieren. Dabei wird das Risiko durch die kombinierte Umsetzung der Massnahmenelemente deutlich reduziert und Schäden können verhindert bzw. vermindert werden. Entscheidend für eine rechtzeitige und wirkungsvolle Intervention ist aber auch eine frühzeitige und zuverlässige Alarmierung.

Im Kanton Nidwalden obliegt die Verantwortung für die Engelberger Aa dem Kanton. In den Jahren 1998 bis 2007 wurden von Dallenwil bis Buochs - als Schlüsselemente des integralen Risikomanagements - verschiedene bauliche Massnahmen am Gewässer realisiert. Die Anforderungen an ein robustes Systemverhalten und vorliegende Platzverhältnisse begründen eine sukzessive Entlastung. Hierbei werden Wassermassen, welche die Gerinnkapazität übersteigen, an festgelegten Entlastungsstellen ausgeleitet. Dadurch kann eine Überlastung des Gewässer-Systems ausgeschlossen werden und dessen Funktionalität bleibt jederzeit gewährleistet. Die resultierenden Abflüsse ausserhalb des Gerinnes werden in Abflusskorridoren mit möglichst geringem Schadenpotential flächig zum See geleitet.

Mit den baulichen Massnahmen wurde gleichzeitig eine Notfallplanung erarbeitet und umgesetzt. Durch die Notfallplanung wird sichergestellt, dass bei Hochwasser gezielt und rechtzeitig interveniert wird. In Berücksichtigung relevanter Kennwerte werden für den Ereignisfall Abläufe, Überwachungen und Zuständigkeiten festgelegt sowie die erforderlichen Hilfsmittel und Entscheidungsgrundlagen für eine zielgerichtete, speditive und zeitnahe Reaktion bereitgestellt.

Das resultierende Krisenmanagement stellt - in Zusammenarbeit mit den örtlichen Interventionskräften - eine Verbundaufgabe der relevanten kantonalen und kommunalen Kompetenzen dar. Ein Stab aus Fachleuten beurteilt kritische Situationen laufend, ergreift Massnahmen und gewährleistet eine rechtzeitige Alarmierung der Einsatzkräfte und der Bevölkerung. Die Alarmierung der Führungskräfte bezüglich der Engelberger Aa erfolgt basierend auf den automatisch übermittelten Abflussmessungen der Messstelle Buochs. Ergänzend werden bei kritischen Wetterentwicklungen entsprechende Warnungen abgesetzt. Die Abläufe orientie-

ren sich an den „Pegel-Marken“ 80m³/s (=> Beobachtung), 100m³/s (=> Vorbereitung) und 125m³/s (=> Intervention).

Damit fundierte Entscheide gefällt und zweckmässige Massnahmen ergriffen werden können, ist auch eine zuverlässige Vorhersage erforderlich. Die „Zentrale Wasserbau“ - eine dem kantonalen Führungsstab unterstellte Fachinstanz - ist für die hydraulische Vorhersage der erwarteten Entwicklung zuständig. Mit dem Ziel, den Entscheidungsträgern einen Vorsprung zu verschaffen, wird die Vorhersage der Abflussentwicklung fortlaufend aufbereitet. Hierfür wurden einfache Algorithmen entwickelt und als Berechnungsroutine in Excel bereitgestellt. In Berücksichtigung der Abflusssituation und in Anwendung von Niederschlagsmessungen / Niederschlagsprognosen werden mit Hilfe der Berechnungsroutine insbesondere nachfolgende Fragestellungen fokussiert:

- Wann werden voraussichtlich die Kennwerte der Notfallplanung erreicht?
- Wie wird sich die Abflussdynamik der Engelberger Aa entwickeln?
- Welche mutmasslichen Abflussspitzen sind zu erwarten?
- Wann muss voraussichtlich mit der Abflussspitze gerechnet werden?

METHODEN

Gebräuchliche, grossräumige Niederschlag-Abfluss-Modelle werden dem Gebirgsbach-Charakter der Engelberger Aa mit einer steil ansteigenden Abflussganglinie und einer kurzen, ausgeprägten Spitze kaum gerecht. Für die Vorhersage des erwarteten Abflusses wird deshalb ein beim Tiefbauamt des Kantons Nidwalden entwickeltes Niederschlags-Abflussmodell eingesetzt. Als Input berücksichtigt das "N-A-Modell Engelberger Aa" erhältliche Messungen von Abfluss und Niederschlag ergänzt mit verschiedenen Niederschlags-Prognosen. Die verfügbaren Daten werden fortlaufend, manuell in eine „Excel-Routine“ eingepflegt.

Das "N-A-Modell Engelberger Aa" simuliert grundsätzlich ein integrales Drei-Speicher-System in Funktion der Zeit (vgl. Abbildung 1). Jeder der drei Speicher nimmt das zugehörige Niederschlagsvolumen auf (Speicherfüllung), speichert es (Retention) und gibt die Wassermassen sukzessive an den Abfluss weiter (Speicherentleerung). In Anlehnung an das Reaktionsverhalten werden die virtuellen Speicher mit Fern (=> langsam); Mittel und Nah (=> schnell) bezeichnet.

Die einzelnen Speicher bzw. deren Reaktion werden durch „Speicherparameter“ (vgl. Tabelle 1) charakterisiert, welche das zugehörige Einzugsgebiet repräsentieren. Aufgrund der gegenseitigen Interaktion ist eine Anpassung der "Speicherparameter" während einem Ereignis kaum angezeigt. Die „Speicherparameter“ wurden anhand bekannter Messreihen für die Engelberger Aa kalibriert. Da Extremereignisse für die Kalibrierung nur beschränkt zur Verfügung stehen, stellt das Ereignis 2005 bis dato das massgebende Extrem-Hochwasser-Referenz- Ereignis dar.

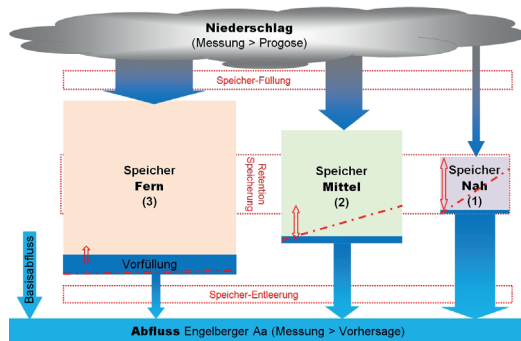


Abbildung 1: Schematische Funktionsweise N-A-Modell Engelberger Aa (Drei-Speicher-Modell)

Tabelle 1: Modellparameter N-A-Modell Engelberger Aa (Drei-Speicher-Modell)

Grundparameter		Speicherparameter				Fern	Mittel	Nah	Gesamt	
Einzugsgebietsgrösse	F_{EZG}	227	[km ²]	Anteil am Einzugsgebiet	f_{x,n_x}	60%	30%	10%	100%	[-]
Abflusswirksamer Niederschlag	n_A	100%	[-]	Speicherhöhe	h_{Sx}	1.0	0.4	0.2	0.74	[m]
Basisabfluss	Q_B	0.0	[m ³ /s]	Entleerungsrate bei Vollfüllung	e_{Vx}	2%	30%	80%	4.24%	[-/h]
Verzögerung für Speicharentleerung	$\Delta t'$	1.0	[h]	relative Vorfüllung (Zeitpunkt 0)	ξ_{s0}	12.0%	7.5%	1.5%	11.0%	[-]

Die "Grundparameter" (vgl. Tabelle 1) dienen der Steuerung der berechneten Abflussganglinie. Durch Änderung der kalibrierten "Grundparameter" besteht die Möglichkeiten die Abflussvorhersage während einem Ereignis visuell zu justieren, gleichzeitig ist diese Manipulation der Grundparameter jedoch kritisch zu hinterfragen bzw. zu begründen:

- Q_B : vertikale Verschiebung der Abflussganglinie (+ grösserer bzw. - kleinerer Abfluss)
- $\Delta t'$: horizontale Verschiebung der Abflussganglinie (+ späterer bzw. - früherer Abfluss)
- n_A : Geografische Niederschlagsverteilung im Einzugsgebiet ($\Sigma N < \text{oder} > \Sigma \text{Messung/Prognose}$)
- FEZG: Abflusswirksames Einzugsgebiet (z.B. $< \text{FEZG} - \text{Schneefall}; > \text{FEZG} + \text{Schneeschmelze}$)

Das "N-A-Modell Engelberger Aa" berücksichtigt das gespeicherte Volumen als Grundlage für die abflussrelevanten Anteile der einzelnen Speicher. Die Berechnungsalgorithmen der „Excel-Routine“ ermitteln pro Speicher zeitbezogen die integrale bzw. summarische Bilanz der anteilmässigen Niederschlags- und Abflussvolumen (vgl. Tabelle 2).

Der Vorgang der Speicherfüllung ist geprägt durch den im Einzugsgebiet gemessenen bzw. vorhergesagten Niederschlag. Die Berechnungsalgorithmen der „Excel-Routine“ berücksichtigen eine anteilmässige Verteilung des Niederschlags auf die einzelnen Speicher (vgl. Tabelle 3). Die räumlichen Unterschiede werden durch die gewichtete Mittelwertbildung verschiede-

Tabelle 2: Speichervolumen zum Zeitpunkt t als Bilanz im zugehörigen Berechnungszeitraum

$S_{x_t} = S_{x_0} + N_{S_{x_t}} - A_{S_{x_t}} \quad [m^3]$		
mit: $N_{S_{x_t}} = \int_0^t n_{S_x} _t * dt = \sum_{\Delta t_{N_t}=(0+\Delta t_N)}^{\Delta t_{N_t}=t} \bar{n}_{S_x \Delta t_N} _t * \Delta t_N$		
und: $A_{S_{x_t}} = \int_0^t a_{S_x} _t * dt = \sum_{\Delta t_{A_t}=(0+\Delta t_A)}^{\Delta t_{A_t}=t} \bar{a}_{S_x \Delta t_A} _t * \Delta t_A$		
S_{x_t}	Gespeichertes Volumen im Speicher _x zum Zeitpunkt t = Teilfüllung _x = Retention _x	m^3
S_{x_0}	Gespeichertes Volumen im Speicher _x zum Zeitpunkt 0 =Vorfüllung _x (= $\xi_{0} * h_{S_x} * F_{EZG} * n_x$)	m^3
$N_{S_{x_t}}$	Im Speicher _x aufgefangenes Niederschlagsvolumen bis zum Zeitpunkt t = Speicherfüllung _x	m^3
$A_{S_{x_t}}$	Aus dem Speicher _x abgeführtes Abflussvolumen bis zum Zeitpunkt t =Speicherentleerung _x	m^3
$ n_{S_x} _t$	Durch Speicher _x aufgefangener Niederschlag zum Zeitpunkt t	m^3/s
$ \bar{n}_{S_x \Delta t_N} _t$	Durch Speicher _x aufgefangener mittlerer Niederschlag im Zeitintervall des Zeitpunkts t	m^3/s
Δt_N	Intervall der Niederschlags-Messung / -Prognose zum Zeitpunkt t	s
$ a_{S_x} _t$	Aus dem Speicher _x abgeführtes Abflussvolumen zum Zeitpunkt t	m^3/s
$ \bar{a}_{S_x \Delta t_A} _t$	Aus dem Speicher _x abgeführtes mittleres Abflussvolumen im Zeitintervall des Zeitpunkts t	m^3/s
Δt_A	Intervall der Abflusses-Messung / -Berechnung zum Zeitpunkt t	s
<u>Hinweise:</u>	Die Messungen / Prognosen werden pro Intervall bereitgestellt (Abhängig von den Datengrundlage). Anstelle der Integralberechnung ist entsprechend eine Summenberechnung angezeigt.	
Δt	Zweckmässig werden alle Daten in einem einheitlichen Intervall aufbereitet ($\Delta t = \text{Konstant}$) Beim Modell Engelberger Aa: $\Delta t = \Delta t_N = \Delta t_A = 10 \text{Min} = 600s$	s
S_{x_0}	Mit bekanntem Abfluss (Messung) kann die Vorfüllung der Speicher iterativ evaluiert werden, so dass Messung und Berechnung zu einem bestimmten Zeitpunkt ohne Basisabfluss korrelieren.	

Tabelle 3: Berechnung der Speicherfüllung (aufgefangenes Niederschlagsvolumen) pro Speicher

$N_{S_{x_t}} = F_{EZG} * f_x * \frac{n_A}{1000} * \int_0^{t'} I_t * dt = \frac{F_{EZG} * f_x * n_A}{1000} * R_{t'} = C_{N_x} * R_{t'} \quad [m^3]$		
mit: $R_{t'} = \int_0^{t'} I_t * dt = \sum_{\Delta t_t=(0+\Delta t)}^{\Delta t_t=t'} R_{\Delta t} _t$ und $C_{N_x} = F_{EZG} * f_x * n_A / 1000$		
$N_{S_{x_t}}$	Im Speicher _x aufgefangenes Niederschlagsvolumen im Berechnungszeitraum 0 bis t	m^3
C_{N_x}	Füllcharakteristik des Speichers _x (In Abhängigkeit der Modellparameter konstant)	m^3/mm
$R_{t'}$	Summe der Niederschläge (Niederschlagshöhe) zum Zeitpunkt t' (verzögert)	mm
I_t	Niederschlagsintensität zum Zeitpunkt t (Messung oder Prognose)	mm/s
t'	Um Abflussverzögerung korrigierte Niederschlagszeit zum Berechnungszeitpunkt t' = t - $\Delta t'$ Beim Modell Engelberger Aa: $\Delta t'=0$ bis 1h <small>t > t', $\Delta t' < 0$ Abflusswirkung des Niederschlags wird beschleunigt, früher / t < t', $\Delta t' > 0$ Abflusswirkung des Niederschlags wird gebremst, später</small>	s
dt'_x	Mit dt'_x ist auch eine speicherspezifische Verzögerung möglich. $t'_x = t' - dt'_x$ Beim Modell Engelberger Aa: $dt'_x=0$ <small>$dt'_x < 0$ Abflusswirkung des Speichers wird beschleunigt; früher / $dt'_x > 0$ Abflusswirkung des Speichers wird gebremst; später</small>	s
$ R_{\Delta t} _t$	Niederschlagshöhe im zugehörigen Berechnungsintervall Δt zum Zeitpunkt t	mm
Δt_t	Berechnungsintervall Δt zum Zeitpunkt t (Messung oder Prognose)	s
F_{EZG}	Einzugsgebietsfläche (Gesamt)	m^2
$f_x = n_x$	Flächenanteil des Speichers, am Einzugsgebiet; Beim Modell Engelberger Aa $\Sigma f_x = 1$ = Anteil des Speichers, am abflusswirksamen Niederschlagsvolumen (Zuordnung Niederschlag); Durch eine Reduktion $\Sigma f_x < 1$ kann der abflusswirksame Niederschlag speicherspezifisch reduziert werden.	%
n_A	Abflusswirksamer Anteil des Niederschlags; Beim Modell Engelberger Aa: $n_A = 100\%$ Die Variation bewirkt eine vertikale Stauchung ($n_A < 1$) bzw. Streckung ($n_A > 1$) der Abflussganglinie.	%

ner Regenmessstationen abgebildet. Ergänzend oder alternativ kann der abflusswirksame Niederschlag erhöht bzw. reduziert werden. Diesbezüglich ist die gutachterliche Interpretation von verfügbaren Summendarstellungen (z.B. Niederschlagsradar kumuliert über 6h) im relevanten Einzugsgebiet erforderlich.

Die aktuelle Speicharentleerung wird durch die im virtuellen Speicher zwischengelagerten Wassermassen gesteuert. Die Berechnungsalgorithmen der „Excel-Routine“ berücksichtigen hierfür die relativen Füllstände (vgl. Tabelle 4). Bei der Engelberger Aa wird die resultierende Entleerungsrate mit einer linearen Abhängigkeit ($f=1$) von der relativen Speicherfüllung abgeleitet. Alternativ kann mit einer Funktionalitätspotenz ($f <> 1$) die Entleerungscharakteristik der Speicher beeinflusst werden ($f > 1 \Rightarrow$ grössere Retention \Rightarrow geringere Abflüsse; $f < 1 \Rightarrow$ geringere Retention \Rightarrow grössere Abflüsse).

Die Entleerung der virtuellen Speicher hängt vom aktuell gespeicherten Volumen ab, weshalb im Grundsatz eine iterative Berechnung erforderlich ist. Durch kleine Berechnungsintervalle lassen sich das abgeleitete Abflussvolumen bzw. das aktuell gespeicherte Volumen durch

Tabelle 4: Berechnung der aktuellen Entleerung der Speicher zum Zeitpunkt t

$Q_{S_{x_t}} = \frac{1}{60 \cdot 60} * e_{x_t} * S_{x_t} = \frac{e_{V_x}}{3600 * S_{K_x}} * S_{x_t}^{(f+1)} = C_{E_x} * S_{x_t}^{(f+1)} \quad [m^3/s]$		
mit: $e_{x_t} = e_{V_x} * (S_{x_t}/S_{K_x})^f$ und $C_{E_x} = e_{V_x}/3600/S_{K_x}^f$		
für: $A_{S_{x_t}} = \int_0^t Q_{S_x} _t * dt = A_{S_{x(t-\Delta t)}} + \bar{Q}_{S_{x\Delta t}} _t * \Delta t \approx A_{S_{x(t-\Delta t)}} + Q_{S_x} _{(t-\Delta t)} * \Delta t \quad [m^3]$		
und: $A_{S_{x(t-\Delta t)}} = \int_0^{(t-\Delta t)} Q_{S_x} _t * dt = \sum_{\Delta t_t=(0+\Delta t)}^{\Delta t_t=(t-\Delta t)} \bar{Q}_{S_{x\Delta t}} _t * \Delta t$		
$Q_{S_{x_t}}$	Speicharentleerung des Speichers _x zum Zeitpunkt t	m^3/s
C_{E_x}	Entleerungscharakteristik des Speichers _x (In Abhängigkeit der Modellparameter konstant)	$(m^3)^{(f-1)}/s$
S_{x_t}	Gespeichertes Volumen im Speicher _x zum Zeitpunkt t	m^3
e_{x_t}	Entleerungsrate des Speichers _x zum Zeitpunkt t Abhängig von der aktuellen Speicherfüllung (Teilfüllung zum Zeitpunkt t) (Zur Vermeidung einer iterativen Berechnung wird die letzte Teilfüllung \Rightarrow Zeitpunkt t- Δt verwendet)	%/h
e_{V_x}	Entleerungsrate des Speichers _x bei Vollfüllung	%/h
S_{K_x}	Gespeichertes Volumen im Speicher _x bei Vollfüllung = Max. Speichervolumen (Kapazität)	m^3
f	Funktionalitätspotenz für Speicharentleerung bei Teilfüllung $e_{x_t}/e_{V_x} = (S_{x_t}/S_{K_x})^f$ Speicharentleerung in Funktion der relativen Speicherfüllung; EngelbergerAa: f=1 als lineare Funktion. In Berücksichtigung der Gebietscharakteristik ist auch eine potentielle Funktionalität ($f \neq 1$) denkbar ($f > 1$ = grössere Retention, Stauchung des Abflusses / $f < 1$ = geringere Retention, Streckung des Abflusses)	-
$A_{S_{x(t)}}$	Aus dem Speicher _x abgeführtes Abflussvolumen bis zum Zeitpunkt t (bzw. t- Δt)	m^3
$ Q_{S_x} _t$	Mittlere Speicharentleerung (Abfluss) zum Zeitpunkt t / zum Zeitpunkt t- Δt	m^3/s
$ \bar{Q}_{S_{x\Delta t}} _t$	Mittlere Speicharentleerung im Zeitintervall Δt des Zeitpunkts t	m^3/s
Δt	Intervall der Berechnung zum Zeitpunkt t	s

Anwendung des vorgängigen Berechnungsschritts ($t=t-\Delta t$) annähern, womit auf die Iteration verzichtet werden kann.

Mit den Rechenalgorithmen gemäss Tabellen 2 bis 4 lassen sich im zeitlichen Verlauf für jeden Berechnungspunkt sowie für die einzelnen Speicher die jeweiligen Speichervolumen sowie die resultierenden Entleerungen ermitteln. Die Aufsummierung der Entleerungen ergibt schlussendlich den voraussichtlichen Abfluss in der Engelberger Aa (vgl. Tabelle 5) und in der Zeitachse die mutmasslich zu erwartende Abflussganglinie.

ERGEBNISSE

Das für die Vorhersage des zu erwartenden Abflusses an der Engelberger Aa entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell wurde massgeblich am Ereignis 2005 entwickelt und kalibriert. Anwendungen in den Folgejahren führten vor allem zur Optimierung der Programmierung der Berechnungsroutinen. Gleichzeitig wurden auch die Eingabemöglichkeiten betreffend der verfügbaren Datengrundlagen (Messungen und Prognosen) angepasst. An den Kerninhalten des Modells waren jedoch aufgrund der Erfahrungen keine massgeblichen Anpassungen angezeigt. Ergänzend wird momentan die Anwendung für weitere Gewässer-Systeme abgeklärt, wobei erste Resultate vielversprechend sind.

Tabelle 5: Berechnung des Abflusses in der Engelberger Aa als Summe der Speicherentleerungen

$Q_t = Q_B + \sum_{(x=1)}^{(3)} Q_{S_{x_t}} = Q_B + \sum_{(x=1)}^{(3)} (C_{E_x} * S_{x_t}^{(f+1)})$		[m ³ /s]
mit: $Q_{S_{x_t}} = C_{E_x} * S_{x_t}^{(f+1)}$		
Q_t	Abfluss in der Engelberger Aa zum Zeitpunkt t	m ³ /s
Q_B	Basisabfluss Der Basisabfluss bewirkt eine vertikale Verschiebung der Abflussganglinie und kann situativ zur Justierung des Modells angewendet werden. ($Q_{Messung_{t_k}} = Q_{Berechnung_{t_k}}$ zum Kalibrierungszeitpunkt t _k)	m ³ /s
$Q_{S_{x_t}}$	Abfluss aus dem Speicher _x zum Zeitpunkt t = Entleerung des Speichers.	m ³ /s
x	Nummer des Speichers _x ; Beim Modell Engelberger Aa 1 bis 3 Die Anzahl der Speicher kann bei Bedarf erhöht werden, wodurch sich jedoch die Kalibrierung erschwert.	-
C_{E_x}	Entleerungscharakteristik des Speichers _x (In Abhängigkeit der Modellparameter konstant)	(m ³) ^(-f) /s
S_{x_t}	Gespeichertes Volumen im Speicher _x zum Zeitpunkt t (Teilfüllung)	m ³
f	Funktionalitätspotenz für Speicherentleerung bei Teilfüllung Beim Modell Engelberger Aa: f=1 (Speicherentleerung als lineare Funktion der relativen Speicherfüllung)	-

Die Kalibrierungscharakteristik des Hochwasserereignisses vom August 2005 ist in Abbildung 2 dargestellt (Berechnungsintervall 30 Min). Das Abflussdiagramm zeigt die gemessenen und die mit dem "N-A-Modell Engelberger Aa" berechneten Abflüsse, sowie die zugehörige Aufteilung auf die einzelnen Speicherentleerungen. Als Berechnungsgrundlage werden die regional gemittelten Niederschlagsmessungen berücksichtigt. Visuell kann festgestellt werden, dass die Abflussganglinien harmonisieren, auch wenn einzelne Ausschläge nicht exakt abgebildet werden. Sowohl die Grössenordnung als auch der Zeitpunkt der Abflussspitze stimmen recht gut überein. Hingegen setzt der gemessene Anstieg in der zweiten Phase

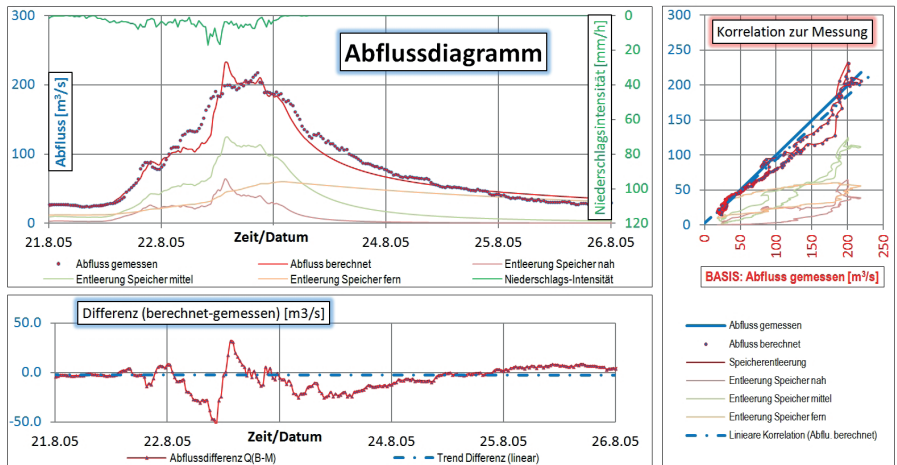


Abbildung 2: Abfluss und Kalibrierung an der Engelberger Aa für das Ereignis 2005

(22.08) etwas früher ein als der Berechnete, was zweiter jedoch durch eine steilere Reaktion kompensiert.

Die Abweichungen in der Differenzbetrachtung erscheinen auf den ersten Blick etwas gross. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die räumliche/zeitliche Variation des Niederschlags nur rudimentär berücksichtigt wird und die Auswertung keine zeitliche Variation beinhaltet. Entsprechend muss die Differenz in der Aussagekraft relativiert werden. Andererseits zeigt der Trend der Differenzen, dass die Kalibrierung den Abfluss in ihrer Gesamtheit recht gut widerspiegelt. Auch die Korrelation der Berechnung mit der Messung berücksichtigt keine zeitlichen Varianzen. Dennoch kann festgehalten werden, dass der Abfluss tendenziell etwas unterschätzt wird, während die Abflussspitze eher überschätzt wird.

Die Grafik zeigt auch die Problematik möglicher Modellanpassungen während einem Ereignis. Wird beispielsweise aufgrund der festgestellten Abweichung am 22.8 vormittags (ca. $30\text{m}^3/\text{s}$) durch Anpassung der "Grundparameter" (vgl. Tabelle 1) der berechnete Abfluss erhöht hat dies zur Folge, dass die Abflussspitze am Nachmittag und Abend noch stärker überschätzt wird.

Die Abbildung 3 zeigt ein Beispiel einer Prognose für das Hochwasserereignis Anfang Juni 2013 mit dem aktuell angewendeten Layout (Ausschnitt) des "N-A-Modells Engelberger Aa". Zur Illustration wurde der effektiv gemessene Abfluss ergänzt. Das Beispiel zeigt, dass der Anstieg der Abflussganglinie in Anwendung der Cosmo2-Prognosen sehr gut abgebildet wird. Mit der Cosmo7 Prognose wird der Abfluss etwas überschätzt. Allerdings ist der Zeitpunkt der vorhergesagten Abflussspitzen nahezu identisch, was darauf hindeutet, dass die Niederschlagsvorhersagen gleichartig verlaufen und entsprechend zuverlässig erscheinen. Aufgrund

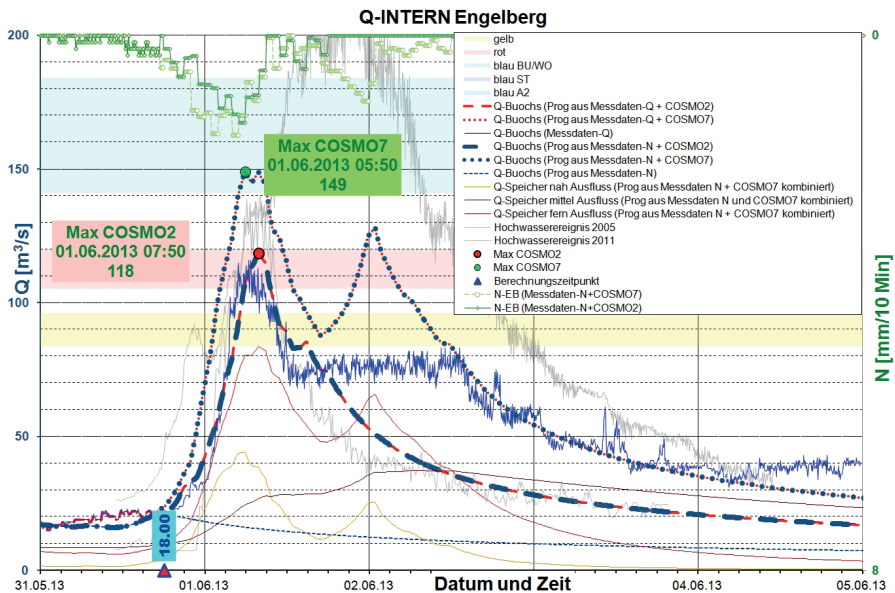


Abbildung 3: Abflussprognose an der Engelberger Aa vom 31. Mai 2013 um 18:00Uhr

der Cosmo7-Prognose ist damit zu rechnen, dass in der Nacht vom 2. auf den 3. Juni eine zweite Abflussschwelle zu erwarten sein wird, welche jedoch aufgrund der effektiven Niederschläge nicht eingetreten ist. Auch diese Grafik lässt tendenziell eine Überschätzung des Abflusses vermuten, allerdings ist zu berücksichtigen, dass die effektiven Niederschläge etwas geringer ausfielen als prognostiziert.

FAZIT

Das für die Vorhersage an der Engelberger Aa entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell hat sich während verschiedenen Ereignissen bewährt und wertvolle Dienste geleistet. Trotz der einfachen Architektur der Simulationsalgorithmen erlaubt die Abflussvorhersage - ergänzt durch Erfahrungen und Lagebeurteilungen von Führung und Einsatzkräften - die notwendigen Massnahmen der Notfallplanung rechtzeitig auszulösen und zu steuern. Bei der Interpretation sind allerdings auch die Systemgrenzen zu berücksichtigen. Die verfügbaren Niederschlags-Prognosen unterliegen im Gebirge bezüglich zeitlicher und räumlicher Verteilung grossen Unsicherheiten. Insbesondere lokale Gewitter sind nach wie vor nur kurzfristig vorhersehbar. Ein grosser Vorteil der manuellen Datenpflege ist der Umstand, dass man sich zeitnah und fortlaufend mit der aktuellen Wettersituation und der Entwicklung auseinandersetzen muss, was die Interpretation der Ereignisse massgeblich begünstigt.

Im Kanton Nidwalden gewährleistet ein engagiertes Team rund um den kantonalen Führungsstab in Zusammenarbeit mit den örtlichen Interventionskräften ein risikobasiertes Krisenmanagement. Durch Erfahrungen aus vergangenen Ereignissen konnte das Krisenmanagement kontinuierlich verfeinert werden. Die Vorhersagen an der Engelberger Aa als kleines Puzzleteil werden vorliegend vorgestellt. Im Dienste der Bevölkerung soll eine zeitgemässe Risikokultur gelebt, vorgelebt und das diesbezügliche Bewusstsein sukzessive erweitert werden. Denn die absolute Sicherheit im Umgang mit Naturgefahren wird es nie geben. Die stetige Auseinandersetzung mit dem Risiko (Restrisiko) und den resultierenden Wirkungen, aber auch die zeitnahe Interpretation der mutmasslichen Entwicklung eines Ereignisses, sind entscheidend für eine wirkungsvolle Schadensminderung und bilden entsprechend eine Kernkompetenz des Krisenmanagements, nicht nur im Kanton Nidwalden.

LITERATUR

- Tiefbauamt Kanton Nidwalden (2009), Integrales Risikomanagement am Beispiel Engelberger Aa
- Tiefbauamt Kanton Nidwalden (2007), Notfallplanung Engelberger Aa, Revisionsstand 2014
- Tiefbauamt Kanton Nidwalden (2015), NG_Berechnung_ProTool_E_Aa_NOTFALLVERSION, V12