

EIN FRÜHWARNSYSTEM FÜR DEN THUNERSEE

HYDRO-METEOROLOGISCHE INDIKATOREN FÜR DEN BETRIEB DES ENTLASTUNGSSTOLLENS IN THUN

AN EARLY WARNING SYSTEM FOR THE THUNERSEE HYDRO-METEOROLOGICAL INDICATORS FOR THE OPERATION OF THE CULVERT IN THUN

Peter Mani¹, Peter Schmocker², Erik Bollaert³, Martin Andres⁴

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ereignisse vom Mai 1999 und August 2005 haben die Probleme des hydraulischen Systems Thunersee-Aare deutlich gezeigt. Die Ausflusskapazität aus dem Thunersee ist, bezogen auf die möglichen Zuflussvolumen zum Thunersee, ungenügend. Ein Grund dafür ist die Umleitung der Kander in den Thunersee, mit der im 18. Jh das Einzugsgebiet um rund 100 % vergrößert wurde. Um diese Situation zu verbessern, wird ein Entlastungsstollen gebaut. Mit diesem Stollen können knapp 100 m³/s Wasser mehr aus dem Thunersee abgeleitet werden. Eine massgebende Verbesserung der Situation bringt der Stollen jedoch nur, wenn er dazu eingesetzt wird, den See vor einem Ereignis abzusenken. Im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen wurden Indikatoren für eine frühzeitige Hochwasserwarnung erarbeitet. Dabei wird zwischen Indikatoren, die die kurz- bis mittelfristige Disposition beschreiben und solchen, die ein beginnendes Ereignis anzeigen, unterschieden.

Keywords: Hochwasser, Frühwarnsystem, Hydro-Meteorologie

ABSTRACT

The flood events from May 1999 and August 2005 have clearly shown the problems of the hydraulic system Thunersee-Aare. Compared to the possible inflow volume, the outflow capacity of the Thunersee is insufficient. A reason for this is the reroute of the Kander into the Thunersee, which was made in the 18th century and increased the catchment area at around 100%. To improve this situation a culvert will be built. With this culvert about 100 m³/s additional water can be derived from the Thunersee. However, the culvert can only bring a significant improvement, if it is used to lower the water level of the lake before an event occurs. For this extensive investigations were carried out to derive indicators for an early flood warning. Thereby we distinguish between indicators, which describe a short to medium term disposition and such, which indicate the beginning of an event.

Keywords: Flood, early warning system, hydro-meteorology

1 geo7 AG, geowissenschaftliches Büro, Neufeldstrasse 5-9, 3012 Bern, Schweiz, (Tel. +41 (0)31 300 44 33, Fax: +41 (0)31 302 76 11, email: peter.mani@geo7.ch)

2 bhc Projektplanung, Mühlemattweg 7, CH-3752 Wimmis, (Tel. +41 (0)33 657 24 26, Fax: +41 (0)33 657 24 86, email: info@bhc-projektplanung.ch)

3 AquaVision Engineering, P.O. Box 73 EPFL, CH-1015 Lausanne, (Tel. +41 (0)21 691 45 13, email: erik.bollaert@aquavision-eng.ch)

4 Kissling + Zbinden AG, Ingenieure Planer USIC, Oberlandstrasse 15, 3700 Spiez, Schweiz, (Tel. +41 (0)33 650 71 71, Fax: +41 (0)33 650 71 72, email: martin.andres@kzag.ch)

AUSGANGSLAGE

Der Thunersee liegt im Einzugsgebiet der Aare im Berner Oberland (Abb. 1). Die wichtigsten Zuflüsse sind die Aare, die vorher den Brienersee durchfließt und die Kander, in die kurz vor der Einmündung in den See die Simme mündet. Die Kander wurde erst im Jahr 1714 in den Thunersee umgeleitet, wodurch sich die Einzugsgebietsfläche auf 2490 km² verdoppelte. Das Einzugsgebiet reicht von 557 m ü.M. bis in die Berner Hochalpen (Höchster Punkt: Finsteraarhorn, 4274 m ü.M.). Der Thunersee hat im Verhältnis zu seinem Einzugsgebiet eine sehr kleine Fläche (1.9 %) und nur wenig Spielraum zwischen der "normalen" Sommer-Seekote (557.80 m ü.M.) und der Hochwassergrenze von 558.30 m ü.M. Dies entspricht einem Rückhaltevolumen von lediglich 21 Mio. m³. Zudem ist der Ausfluss sehr seicht, wodurch die Ausflusskapazität stark eingeschränkt ist. Ein Zuflussüberschuss von 100 m³/s führt in einem Tag zu einem Seespiegelanstieg von 18 cm.

Der Thunersee wird über zwei Schleusen (Mühle- und Scherzligschleuse), die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erbaut wurden, reguliert. Die Regulierung des Sees erfolgt heute anhand eines Linienreglementes. Dieses ordnet, abhängig von der Jahreszeit, einem bestimmten Seestand einen definierten Abfluss aus dem See zu. Ab einer Seekote von 558.0 m ü.M. werden die Schleusen vollständig geöffnet. Der Ausfluss aus dem See ist dann direkt von der Seekote abhängig.

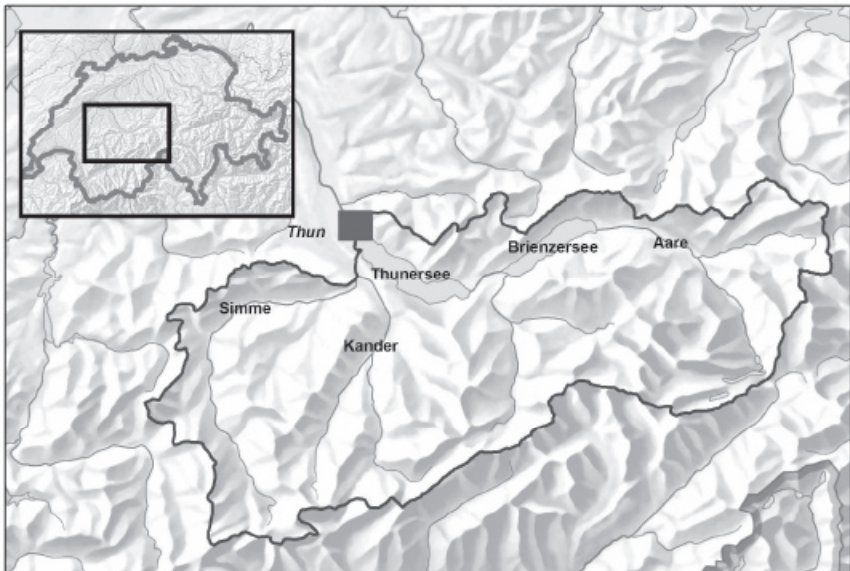


Abb. 1 Gebietsübersicht Thunersee-Einzugsgebiet

Fig. 1 Overview Thunersee catchment area

Die Hochwassergrenze des Thunersees liegt auf 558.3 m ü.M., wobei grössere Schäden erst ab einer Seekote von 558.6 m ü.M. auftreten. Dieser Wert wurde seit Messbeginn im Jahr 1905 viermal überschritten, wovon zweimal in den letzten acht Jahren (Abb. 2). Bei den beiden letzten Ereignissen in den Jahren 1999 und 2005 überstieg der Seespiegel die Hochwasser-

grenze um fast einen Meter. Der Charakter der beiden Hochwasserereignisse war jedoch sehr unterschiedlich.

- Beim Hochwasserereignis im Mai 1999 führte nach einem schneereichen Winter eine intensive Schneeschmelze zu einem langsamen aber stetigen Seespiegelanstieg bis auf eine Kote von 558.10 m ü.M. Auf diese Phase folgten mehrere Tage mit intensiveren, jedoch nicht aussergewöhnlichen Niederschlägen. Da jedoch die Abflussbereitschaft aufgrund der Vorgeschichte sehr hoch war, führten diese Niederschläge zu grossen Zuflüssen zum Thunersee und dort zu einem sehr raschen Seespiegelanstieg. Der Anstieg von 62 cm in drei Tagen war damals der zweithöchste Wert seit Messbeginn. Ein noch stärkerer Anstieg von 68 cm in drei Tagen war im Juni 1910, ebenfalls im Zusammenhang mit Schneeschmelze und Starkregen, registriert worden. Am 15. Mai erreichte der See mit einer Kote von 559.17 m ü.M. den Höchststand.
- Einen wesentlich anderen Verlauf nahm das Hochwasser vom August 2005. Vor dem Ereignis lag der Seespiegel auf einem normalen Niveau, dies trotz einer relativ feuchten Vorgeschichte. Grossräumige Starkniederschläge im ganzen Berner Oberland führten dann zu grossen Zuflüssen zum Thunersee und zu einem äusserst raschen Anstieg von 140 cm in zwei Tagen. Der See erreichte eine Kote von 559.25 m ü.M. Schon im Jahr zuvor wurde im Juni ein Anstieg von 70 cm in zwei Tagen registriert.

Wegen der geringen Ausflussskapazität des Thunersees dauerte es im Jahr 1999 12 Tage, bis der Seespiegel wieder unter die Hochwassergrenze absank, im Jahr 2005 waren es 5 Tage.

Neben diesen beiden grossen Hochwasserereignissen wurde die Hochwassergrenze auch in den Jahren 2002 und 2004 überschritten. Schon nach dem Ereignis vom Mai 1999 wurden von den Gemeinden rund um den Thunersee Massnahmen gefordert, um solche Ereignisse zu verhindern. Die weiteren Ereignisse haben diese Forderungen noch verstärkt.

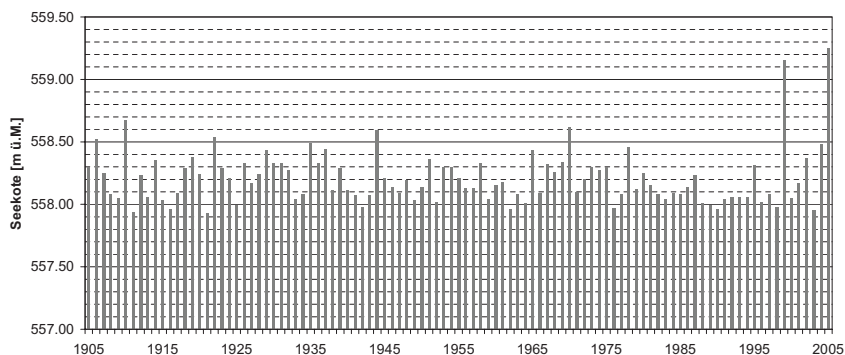


Abb. 2 Jahreshöchststände des Seepiegels Thunersee

Fig. 2 Annual peak sealevel of the Thunersee

DER ENTLASTUNGSSTOLLEN

Das Bauwerk

Die Evaluation verschiedener Massnahmenvarianten zeigte, dass nur ein langer Entlastungsstollen zwischen dem Thunersee und der Aare die Situation massgeblich verbessern kann.

Der Entlastungsstollen weist eine Länge von rund 1'210 m und einen nominalen Innendurchmesser von 5.5 m auf. Er führt vom Ende eines Schifffahrtskanals (in Verlängerung des Thu-

nersees) bis zur Aare unterhalb des Kraftwerks Thun. Das Bauwerk des Entlastungsstollens unterteilt sich in drei Abschnitte: das Einlaufbauwerk, den bergmännisch aufgefahrenen Stollen und das Auslaufbauwerk.

Die hydraulische Funktionsweise des Entlastungsstollens entspricht einem Düker. Dieser nützt das Wasserspiegelgefälle von rund 6 m zwischen der Aare unterhalb des Kraftwerks und dem Schifffahrtskanal. Durch eine Tafelschütze beim Auslauf kann die Durchflussmenge reguliert werden. Der Stollen ist damit immer unter Überdruck und Betriebsbeeinträchtigungen durch instationäre hydraulische Effekte (Luftetrug, Pulsationen etc.) sind nicht zu erwarten. Eine zweite Tafelschütze beim Einlaufbauwerk ist im Normalfall geöffnet. Sie dient als oberes Abschlussorgan zum Leeren des Stollens für den Unterhalt sowie als Notorgan, im Falle, dass sich die Regulierschütze nicht schliessen lässt. Es kann von einer nominalen Abflusskapazität des Stollens bei Vollöffnung der Schütze von 110 - 115 m³/s ausgegangen werden (je nach Wasserstand bzw. Wasserführung der Aare). Dabei wird eine Strömungsgeschwindigkeit im Stollen von bis ca. 4 m/s erreicht.

Anforderungen an den Betrieb

Mit Hilfe des Entlastungsstollens kann der Abfluss aus dem Thunersee mehr oder weniger unabhängig vom Seestand um 100 m³/s erhöht werden. Während des Ereignisses vom August 2005 lagen die Zuflüsse zeitweise 500 m³/s über dem Ausfluss. Das bedeutet, dass in solchen Fällen weiterhin mit einem raschen Seespiegelanstieg gerechnet werden muss. Der Entlastungsstollen kann seine optimale Schutzwirkung deshalb nur dann entfalten, wenn er frühzeitig eingesetzt wird, um vor einem Hochwasserereignis das Rückhaltevolumen im See zu vergrössern. Andererseits führt ein tieferer Seespiegel zu verschiedenen Beeinträchtigungen, beispielsweise bei der Personen- und Frachtschifffahrt auf dem Thunersee oder bei Feuchtbiotopen im Uferbereich. Weiter müssen auch die Schutzinteressen der Unterlieger berücksichtigt werden. Hier ist es vor allem die Stadt Bern, die schon unter den heutigen Bedingungen bei den beiden Hochwasserereignissen grosse Schäden zu verzeichnen hatte und nun befürchtet, dass mit dem Entlastungsstollen noch grössere Abflussmengen auftreten werden.

Um eine optimale Schutzwirkung des Stollens zu erreichen und die verschiedenen weiteren Ansprüche an den Betrieb des Entlastungsstollens zu berücksichtigen, wird ein Betriebsreglement für den Entlastungsstollen ausgearbeitet. Darin wird festgelegt, wann der Entlastungsstollen geöffnet werden soll und wann im Interesse der Unterlieger eine Drosselung des Ausflusses erfolgen soll. Ein zentrales Element für den Betrieb des Entlastungsstollens ist ein Frühwarnsystem, mit dem eine frühzeitige Absenkung des Seespiegels sichergestellt werden kann, ohne dass "ungerechtfertigte" Absenkungen erfolgen.

Für den Hochwasserschutz Thunersee sind drei Gefahrenstufen vorgesehen:

- Im Bereich GRÜN erfolgt die Regulierung des Sees aufgrund des bisher gültigen Regulierreglementes.
- Bei Gefahrenstufe ORANGE besteht eine Disposition für Hochwasser und der See wird vorsorglich auf eine Kote von 557.70 m ü.M. abgesenkt. Die Absenkung erfolgt wenn nötig mit dem Einsatz des Entlastungsstollens. Die Kote wird anschliessend gehalten.
- Die Gefahrenstufe ROT bedeutet eine weitere Zunahme des Hochwasserrisikos. In dieser Phase wird der Seespiegel um weitere 10 cm auf 557.60 m ü.M. abgesenkt und gehalten.

Neben den Regen-Gefahrenstufen sind zwei Schnee-Gefahrenstufen definiert. Diese werden aufgrund der Disposition für eine intensive Schneeschmelze festgelegt. Wird diese als hoch eingeschätzt, wird der See auf eine Kote von 557.45 m ü.M. abgesenkt.

Dieses Konzept hat zum Ziel, mittels eines frühzeitigen Einsatzes des Entlastungsstollens die maximale Hochwasserkote des Sees soweit zu senken, dass der nun tiefere Seepiegel mit Stollenbetrieb keinen höheren Abfluss bewirkt als der höhere Seepiegel ohne Stollen. Die Gefahrenstufen werden aufgrund von Indikatoren festgelegt.

INDIKATOREN FÜR DAS FRÜHWARNSYSTEM

Die Indikatoren sollen ein frühzeitiges Erkennen von möglichen Hochwasser-Situationen erkennen, dabei jedoch möglichst wenige ungerechtfertigte Alarme generieren. Für die Herleitung von Indikatoren für das Frühwarnsystem wurden meteorologische und hydrologische Messreihen analysiert und die Güte möglicher Indikatoren anhand von früheren Ereignissen und Szenarien überprüft. Grundsätzlich wird zwischen Indikatoren, die die kurz- bis mittelfristige Disposition beschreiben und Indikatoren für ein beginnendes Hochwasserereignis unterschieden. Im Folgenden werden die Indikatoren detaillierter beschrieben.

Indikatoren für kurz- bis mittelfristige Disposition

Ein wichtiger Indikator für die mittelfristige Disposition ist das Wasseräquivalent der Schneedecke im Einzugsgebiet. Aufgrund des grossen Flächenanteils im Einzugsgebiet des Thunersees ist vor allem die Höhenlage zwischen 1000 und 2000 m ü. M. von entscheidender Bedeutung. Liegen hier grosse Schneemengen, können bei einem raschen Temperaturanstieg grosse Flächen gleichzeitig unter Schmelzbedingungen gelangen, was zu einem entsprechend hohen Anfall an Schmelzwasser führt. Dies war beispielsweise im Mai 1999 der Fall.

Für die Herleitung der relevanten Grenzwerte wurden Schneehöhen und Wasseräquivalente ausgewertet. Für die Alarmauslösung soll das Wasseräquivalent verwendet werden. Zwar sind Schneehöhe und Wasseräquivalent in vielen Fällen recht stark korreliert, doch können gerade im Frühling intensive Schneefälle diesen Zusammenhang verfälschen, da das Wasseräquivalent des frisch gefallenen Schnees wesentlich geringer ist, als das von gut gesetztem Altschnee. Für die Analyse wurden die Daten von 6 Schneemess-Stationen ausgewertet. Die Wasseräquivalent-Datenreihen sind jedoch recht lückenhaft und reichen kaum über Ende März hinaus.

Für die Alarmierung ist es wichtig, dass möglichst frühzeitig verlässliche Werte zur Verfügung gestellt werden können. Die Auswertungen ergaben, dass erst Ende März verlässliche Angaben zur Wassermenge, die in der Schneedecke für die Schneeschmelze zur Verfügung steht, gemacht werden können. Zwischen Mitte und Ende März kann sich das Wasseräquivalent noch wesentlich verändern. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein zweistufiges Verfahren festgelegt. Zuerst wird Mitte März die mittlere Schneehöhe von 9 Stationen im sensiblen Höhenbereich ermittelt. Übersteigt die mittlere Schneehöhe am 15. März den Grenzwert von 60 cm, wird Stufe zwei aktiviert. Dazu muss sichergestellt werden, dass Ende März die Wasseräquivalentsmessungen an den festgelegten Stationen durchgeführt werden und die Schneebedeckung im Berner Oberland aus Satellitenbildern ermittelt wird. Wenn über 60 % des Einzugsgebietes von Schnee bedeckt ist, und das Wasseräquivalent bei über 400 mm liegt, wird die Schnee-Gefahrenstufe ORANGE ausgelöst. Wenn über 60 % des Einzugsgebietes von Schnee bedeckt sind, und das mittlere Wasseräquivalent bei den definierten Stationen über 500 mm liegt, wird die Schnee-Gefahrenstufe ROT ausgelöst.

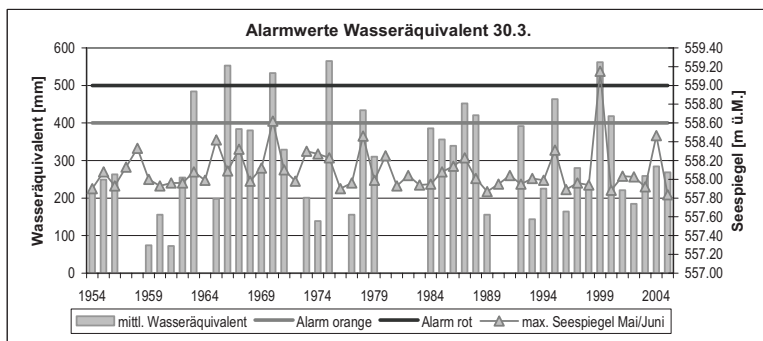


Abb. 3 Test des Indikators Wasseräquivalent der Schneedecke

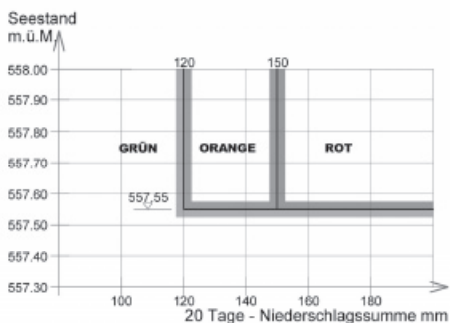
Fig. 3 Test of the indicator water equivalent of the snow cover

Ein weiterer wichtiger Einflussparameter für die kurz- und mittelfristige Disposition ist die Bodenfeuchte. Eine hohe Bodenfeuchte bewirkt bei Starkregenereignissen eine rasche und starke Abflussreaktion. Da eine grossräumig repräsentative Messung der Bodenfeuchte nach wie vor nicht oder dann nur mit sehr grossem Aufwand möglich ist, wurde aus den Niederschlagsdaten ein Indikator hergeleitet.

Tests haben gezeigt, dass eine 20-Tagesperiode die zuverlässigsten Alarmwerte ergibt. Längere Perioden führen zu einer späten Reaktion oder zu häufigeren Fehlalarmen, kürzere Perioden sind für die Bodensättigung in den meisten Fällen kaum relevant. Für die Stufe ORANGE wurde ein Schwellenwert von 120 mm, für die Stufe ROT ein Wert von 150 mm festgelegt (Abb. 4). Mit diesen Alarmwerten können in der Periode seit dem 1.1.1905 alle Ereignisse erfasst werden, bei denen der Seespiegel des Thunersees über 558.6 m ü.M. ansteigt.

Abb. 4 Indikator 20-Tagesniederschlag (Bodenfeuchte)

Fig. 4 Indicator 20 day sum of precipitation (soil moisture)



Indikatoren für beginnendes Ereignis

Für die Erfassung eines beginnenden Ereignisses werden räumlich und zeitlich gestaffelte Indikatoren verwendet (Abb. 5).

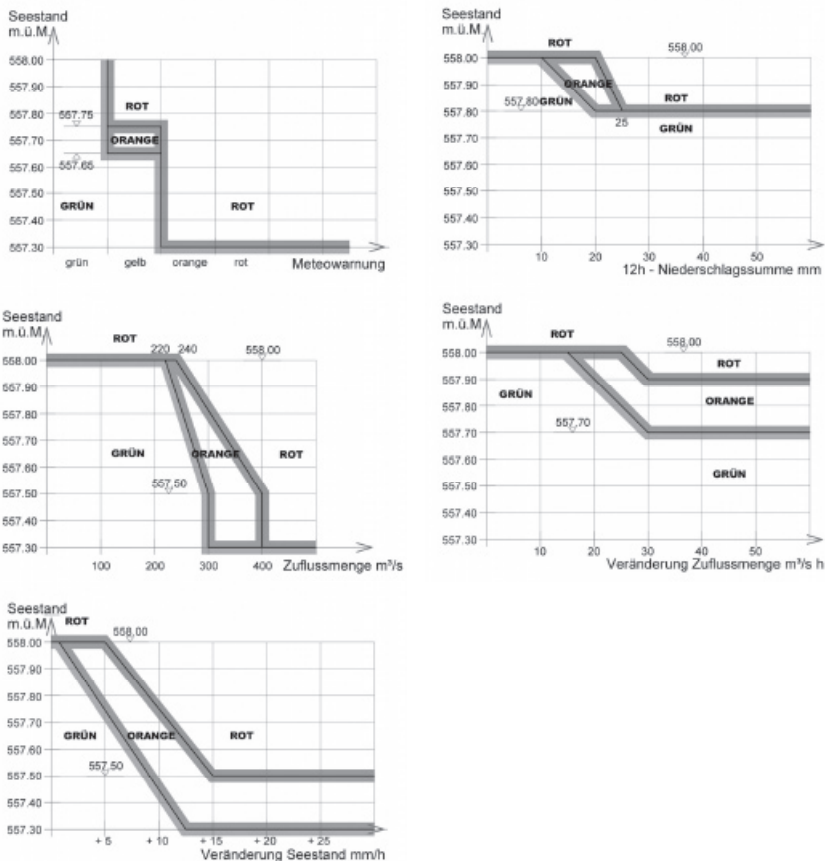


Abb. 5 Alarmfunktionen für die Niederschlags- und Abflussindikatoren

Fig. 5 Alarm functions for precipitation and discharge indicators

- Zuerst werden die Meteowarnungen von MeteoSchweiz bezüglich der zu erwartenden Niederschlagsmengen ausgewertet. Die Festlegung der Regen-Gefahrenstufe erfolgt in Abhängigkeit der Gefahrenstufe von MeteoSchweiz und dem aktuellen Seespiegel.
- Der Niederschlag im Einzugsgebiet bildet den zweiten Indikator. Dafür wird an 11, teilweise neu zu errichtenden Stationen, verteilt über das Berner Oberland, der Niederschlag stündlich erfasst und ausgewertet. Für die Festlegung der Grenzwerte wurde in einem ersten Schritt die geeignete Periodenlänge, über welche die Niederschlagssumme gebildet werden soll, gesucht. Analysiert wurden gleitende 24-, 12- und 6-Stunden-Niederschlagssummen. Das beste Ergebnis liefern die 12-Stundensummen. Die 24-Stundensummen reagieren zu träge. Bei einem hohen Schwellenwert ist der See bereits am Steigen, bei einem niedrigen werden häufig Fehlalarme ausgelöst. Bei der 6-Stundensumme können bereits gewitterartige Ereignisse zu einer Alarmauslösung führen. Solche Ereignisse führen

jedoch zu keinem starken Anstieg des Seespiegels. Für die 12-Stundensumme wurde eine Alarmwert-Funktion erstellt.

- Eine erste Einschätzung der Abflussreaktion lässt sich aus den Abflussmessungen in den höher gelegenen Einzugsgebieten vornehmen. Dazu werden die Messungen von 4 höher gelegenen Abfluss-Messstationen, für den Brienersee an der Lüttschine, für den Thunersee an der Kander, der Engstlige sowie der Simme ausgewertet.
- Unmittelbar an der Systemgrenze zum Thuner- und Brienersee werden die Hauptzuflüsse ausgewertet. Ermittelt werden einerseits die Summe der Hauptzuflüsse (Aare, Kander, Simme, Lombach), andererseits die Steigerungsrate dieser Zuflüsse. Die Grenzwerte für die Auslösung der Gefahrenstufen wurden aus den Messdaten der letzten 6 Jahre abgeleitet.
- Der letzte Indikator bildet die Veränderung des Seespiegels pro Zeiteinheit. Dieses Kriterium wird auf alle Fälle später reagieren, als die Kriterien "Zuflussmenge" und "Steigerung Zuflussmenge". Es wird jedoch als "Backup-Kriterium" verwendet für den Fall, dass Messungen der Zuflüsse, beispielsweise durch Beschädigung von Messstellen, ausfallen sollten.

Je näher die Indikatoren am Thunersee liegen, umso kürzer wird die Reaktionszeit für die Seeabsenkung.

Herleitung von Indikator-Kombinationen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Indikatoren zwar eine Hochwasserdisposition anzeigen, das Hochwasser dann aber nicht immer eintritt (Fehlalarm). Dies gilt es, wenn immer möglich, zu vermeiden. Die Sensitivität jedes Parameters wurde anhand der Datenreihen aus den Jahren 1999, 2003 und 2005 überprüft. Diese Analyse zeigte, dass die Sensitivität der verschiedenen Indikatoren saisonal unterschiedlich ist. Die Bodenfeuchte zum Beispiel bewirkt im Frühling zu oft einen Wechsel des Systems auf ROT, ohne dass dann ein Hochwasser eintritt (Abb. 6). Dazu braucht es zusätzlich ergiebige Niederschläge. Im Gegensatz dazu können mittlere Niederschlagsereignisse im Sommer bei hoher Bodenfeuchte zu Hochwasser führen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden die Indikatoren saisonal differenziert und Indikatorkombinationen definiert.

Überprüfung des Systems anhand vergangener Ereignisse

Die Überprüfung der Indikatoren anhand vergangener Ereignisse zeigt sehr gute Resultate. Bis auf eine Ausnahme, anfangs Juni 2004, ist es immer gelungen, in der Phase ROT den See auf 557.60 m ü.M. abzusenken. Vor allem durch den Indikator „Bodenfeuchte“ wäre beim Hochwasser August 2005 der See bereits 3 - 4 Tage vor den Starkniederschlägen abgesenkt worden. Ähnliches lässt sich zu den etwas kleineren Hochwassern vom Juli und August 2002 sagen. Beim Hochwasser vom Mai 1999 wäre der See wegen der Schneeschmelzdisposition gegen Ende April abgesenkt worden.

Zurzeit erarbeitet der Kanton Bern eine Studie zu möglichen Extremhochwassern. Das Indikatorensystem wird in nächster Zeit auch aufgrund der Resultate dieser Studie getestet (geo7 et al. 2007).

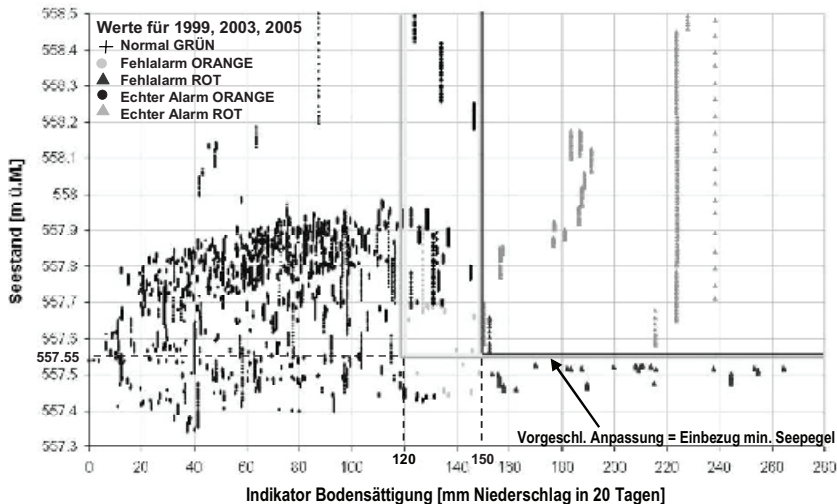


Abb. 6 Evaluation des Indikators Bodensättigung
 Fig. 6 Evaluation of the indicator soil moisture

Schutz Unterlieger

Bekanntlich darf eine Hochwasserschutzmassnahme das Risiko für die unterliegenden Gebiete nicht erhöhen. Um dies zu gewährleisten, enthält das Betriebsreglement einen speziellen Artikel. Der Artikel beschreibt, unter welchen Umständen der Stollen in Thun zu Gunsten der Unterlieger gedrosselt werden muss. Bei den grossen Hochwassern 1999 und 2005 hätte der Stollen einen um etwa 40 cm tieferen Seespiegel bewirkt. Dieser tiefere Seespiegel hätte bewirkt, dass der Abfluss durch die vollständig geöffneten Schleusen um etwa 100 m³/s tiefer gelegen hätte. Dies entspricht dem zusätzlichen Abfluss durch den Stollen. Der Gesamtabfluss hätte damit in der gleichen Grössenordnung gelegen, wie ohne Stollen. Vor und nach der Abflussspitze in Thun liegt der Abfluss mit Stollen allerdings höher als ohne Stollen. Tritt zu diesem Zeitpunkt im Zwischeneinzugsgebiet Thun-Bern ein Hochwasser auf, muss der Abfluss in Thun gedrosselt werden. Da die Hochwasser im Zwischeneinzugsgebiet nur kurze Zeit (einige Stunden) dauern, ist der Einfluss der Drosselung in Thun auf den See eher gering und kann toleriert werden. Für die Erfassung von Hochwasserereignissen aus dem Zwischeneinzugsgebiet wurden, soweit nicht bereits vorhanden, neue Abfluss-Messstationen an den Hauptzuflüssen gebaut. Weitergehende Untersuchungen zum Schutz der Unterlieger sind noch in Bearbeitung.

SCHLUSSBETRACHTUNG

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre im Berner Oberland führten zu neuen Herausforderungen bezüglich Hochwasserschutz am Thunersee. Mit technischen Massnahmen kann der Schutz verbessert werden. Für eine Optimierung der Schutzwirkung sind jedoch zusätzlich organisatorische Massnahmen notwendig. Mit dem neuen Betriebsreglement für den Entlastungsstollen soll dies erreicht werden. Das Frühwarnsystem stellt jedoch hohe Anforderungen an Technik und Organisation und es wird sicher notwendig sein, zumindest in der Anfangs-

phase das System weiter zu optimieren. Die laufende Evaluation der Indikatoren kann auch dazu beitragen, das Prozessverständnis weiter zu vertiefen, was gerade im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderungen im Klimasystem von zentraler Bedeutung sein kann.

LITERATUR

geo7 AG, IUB, Hunziker, Zarn & Partner, Emch + Berger AG (2007): „Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare“. Bericht zuhanden des Tiefbauamtes und des Wasserwirtschaftsamtes des Kantons Bern.