

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 26 (2021)

Heft: 2

Artikel: Modellierung der Auswirkungen einer möglichen Bewässerung auf den Wasserhaushalt im Klettgau

Autor: Gmünder, Christian / Graf, Hans Rudolf / Dierauer, Hansueli

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-977325>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Modellierung der Auswirkungen einer möglichen Bewässerung auf den Wasserhaushalt im Klettgau

Christian Gmünder¹, Hans Rudolf Graf², Hansueli Dierauer³, Michael Sinreich⁴, Jürg Schulthess⁵

Stichworte: Klettgau, Hydrologie, Grundwasser, Bewässerung, Klimawandel, Modellierung

Zusammenfassung

Angesichts der mit dem Klimawandel zunehmend auftretenden Trockenperioden steigt das Interesse an einer Nutzung des Grundwassers zu Bewässerungszwecken. Den Klettgau unterlagert ein grosses, bisher ausschliesslich für die Trinkwasserversorgung genutztes Grundwasservorkommen. Im Rahmen eines Pilotprojekts «WasserZukunft Klettgau» wurde untersucht, wie sich vor dem Hintergrund des Klimawandels eine Erweiterung der Nutzung zu Bewässerungszwecken auf den Wasserhaushalt im Klettgau auswirken würde. Dazu wurde der Wasserhaushalt mit drei gekoppelten Modellen vom Niederschlag bis zum Abfluss in Oberflächengewässern und im Grundwasser abgebildet. Im Bodenwasserhaushaltsmodell ist das System Boden – Pflanze – Atmosphäre wiedergegeben. Im Niederschlags- / Abflussmodell wird die zeitliche Verzögerung vom Niederschlagsereignis bis zum Abfluss in den Gewässern nachgebildet. Die beiden Modelle ergeben die Randbedingungen für das dritte Modell, ein numerisches Modell des Grundwasserleiters. Zur Quantifizierung der Auswirkungen einer landwirtschaftlichen Bewässerung wurden zwei Klimamodelle (CH2018) und vier Entnahmeszenarien ausgewählt. Mit den Modellen wurde der Zeitraum von 1981 bis 2049 durchgerechnet. Der Klimawandel übt insbesondere einen Einfluss auf die minimalen Grundwasserstände aus. In Folge zu erwartender, auch über mehrere Jahre dauernder, Trockenzeiten sinkt der minimale Grundwasserstand gegenüber dem Referenzzeitraum um bis zu 5 m. Beim ungünstigsten Szenario wird der Grundwasserstand durch die Bewässerung

um weitere 3 m abgesenkt. Da das Grundwasservorkommen bis zu 50 m mächtig ist, erscheint ein Bezug von Grundwasser zu Bewässerungszwecken – unter Priorisierung der Trinkwasserversorgung – trotzdem denkbar. Ob dies auch hinsichtlich wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und ökologischer Aspekte sinnvoll ist, wird momentan in einem zweiten Teil des Projekts untersucht.

Abstract

More frequently occurring drought periods under climate change conditions lead to an increasing interest in the use of groundwater resources for irrigation purposes. In the Klettgau region, an extensive groundwater body exists that has so far exclusively been used for drinking water supply. Within a pilot project, in the framework of climate change adaptation, the potential of additional groundwater usage for irrigation and its impact on the Klettgau aquifer has been studied. Three coupled models are used to calculate the water balance, (i) a soil-water balance model representing the soil-plant-atmosphere system, (ii) a precipitation/runoff model for reproducing the time lag between precipitation events and surface runoff, and (iii) a numerical groundwater model. In order to quantify the effect of irrigation, two climate scenarios (CH2018) and four irrigation scenarios were simulated. The three models were run to calculate the time period from 1981 to 2049. The main effect of climate change can then be deduced from the comparison of minimal groundwater levels. In view of the forecast of long-lasting drought periods, groundwater level decreases up to 5 m compared to the reference period must be expected. For the maximum irrigation scenario, a supplemental lowering of additional 3 m is modeled. Given the groundwater of the Klettgau aquifer reaching 50 m of thickness, withdrawal for irrigation purposes appears conceivable – though categorically prioritizing drinking water supply. Whether irrigation would make sense, when also considering economic, ecologic and social aspects, is currently being investigated in a second part of the project.

¹ Simultec AG, Hardturmstrasse 261, 8005 Zürich, cg@simultec.ch

² Dr. von Moos AG, Dorfstrasse 40, 8214 Gächlingen

³ FiBL, Ackerstrasse 113, Postfach 219, 5070 Frick

⁴ Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Hydrologie, 3003 Bern

⁵ Tiefbau Kanton Schaffhausen, Schweizerstrasse 69, 8200 Schaffhausen

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Schweiz muss sich an den Klimawandel anpassen. Der Bund unterstützt deshalb im Rahmen des Programms «Anpassung an den Klimawandel» innovative Vorhaben, welche dazu dienen, die Klimarisiken zu minimieren, die Anpassung zu steigern und einhergehende Chancen zu nutzen (BAFU 2018). Im Rahmen der zweiten Programmphase hat der Kanton Schaffhausen das Pilotprojekt «Konsequenzen einer möglichen Grundwassernutzung zu Bewässerungszwecken» (WasserZukunft Klettgau) eingereicht. Im Klettgau befindet sich ein grosses, bisher ausschliesslich für die Trinkwasserversorgung genutztes Grundwasservorkommen. Angesichts zunehmend auftretender Trockenperioden steigt seitens Landwirtschaft das Interesse an einer Nutzung des Grundwassers zu Bewässerungszwecken. Im ersten Teil des Projekts wurden die Auswirkungen einer möglichen Bewässerung auf den Wasserhaushalt im Klettgau modelliert. Für die Prognose wurden verschiedene Entnahmeszenarien sowie der in den nächsten 30 Jahren zu erwartende Klimawandel berücksichtigt.

2 Geologisch-hydrogeologische Situation

Der Klettgau (Nordschweiz, Kanton Schaffhausen) ist ein altes Flusstal, das sich während der Eiszeiten tief in die Gesteinschichten des Tafeljuras eingeschnitten hat (Stössel-Sittig 2020). Bis in die vorletzte Eiszeit vor ca. 150'000 Jahren wurde es vom Rhein durchflossen. Dann wurde der Talabschnitt zwischen Oberklettgau und Schaffhausen-Breite von den Moränen des Engiwaldes versperrt, weshalb der Rhein seitdem bei Schaffhausen südwärts fliesst.

Der Felsuntergrund im Oberen Klettgau besteht aus Gesteinen des Doggers (Parkinson-Schichten bis Opalinuston). Dabei handelt es sich um dunkelgraue Ton- und Siltsteine

mit kalkigen Zwischenschichten. Weiter gegen Westen bilden vor allem die Schichten des Keupers die Felsoberfläche (bunte Ton-Siltsteine). Die Rinnenbasis liegt in der Talmitte in 80 – 100 m Tiefe. Die rechts und links des Tales aufragenden Flanken sind morphologisch direkt durch die Felsgeologie geprägt: im Norden finden sich eher flachere Hänge, da hier weichere, tonig-mergelige Gesteine überwiegen. Im Süden stehen die kalkigen Gesteine des Malm an, wodurch sich eher steile Hänge ausbildeten.

Über dem Fels liegen direkt eiszeitliche Schotter auf (Hochterrassenschotter, Figur 1), welche in mehreren Phasen abgelagert wurden. Durch die beim Hauptvorstoss der vorletzten Eiszeit östlich von Schaffhausen entstandenen Moränen entstand im Klettgautal eine Stausituation, in Folge derer sich die wechselhaften Sedimente der Schmerlet-Formation ablagerten (Graf 2009). Dabei handelt es sich um eiszeitliche Seeablagerungen, fluviale Sande und Schotterstränge. Der heutige Talboden wurde während der letzten Eiszeit geformt. Seither bildeten sich lokale Hangsedimente und Bachablagerungen, wie z.B. der Schuttfächer von Siblingen.

Die Hochterrassenschotter bilden den Grundwasserleiter des Klettgaus. Sie beginnen bei Schaffhausen-Breite und erstrecken sich via Neunkirch und Trasadingen bis in den deutschen Klettgau. Die Grundwassermächtigkeit beträgt in der Rinnenmitte bis zu 50 m. Bei Schaffhausen-Enge befindet sich die Grundwasserscheide. Östlich strömt das Grundwasser ins Rheintal, westlich durch den Klettgau bis zur Wutach, welche den Vorfluter darstellt.

Da der Flurabstand mit mehreren 10er-Metern recht hoch ist, gibt es im Klettgau keine direkte Anbindung an die dortigen Oberflächen-gewässer. Das Grundwasser wird jedoch zum Teil durch Versickerung aus diesen Gewässern

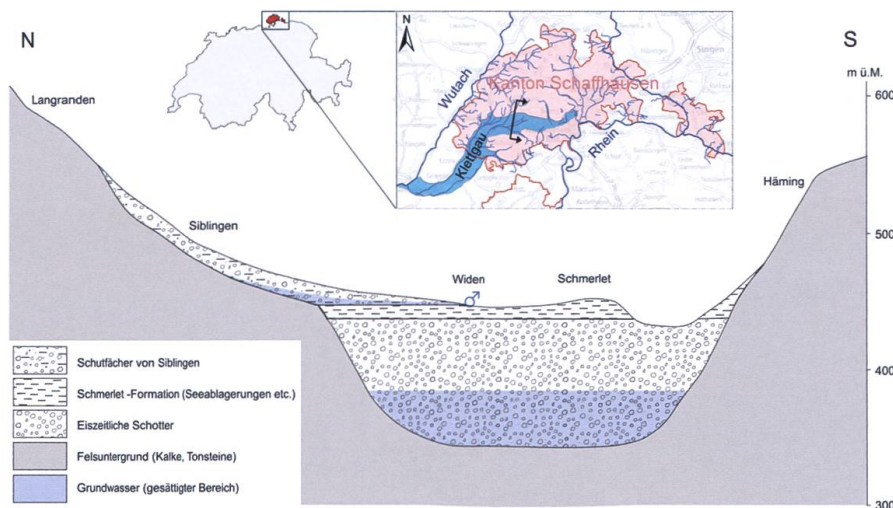


Fig. 1: Schematischer geologischer Schnitt durch die Klettgaurinne bei Neunkirch.

gespiesen. Insbesondere im östlichsten Teil des Tals können die Bäche wegen der allseitig ansteigenden Topografie nicht abfließen und versickern vollständig. Weiter westlich wird der Oberflächenabfluss durch verschiedene Bäche gesammelt und fließt schlussendlich über die Grenze nach Deutschland. Das Grundwasser wird im Weiteren durch den Niederschlag und den Zufluss von den seitlichen Talhängen gespiesen. Niederschlagsversickerung und Bachinfiltration erreichen den gesättigten Grundwasserleiter um mehrere Monate verzögert, da dazwischen mächtige ungesättigte und zum Teil schlecht durchlässige Schichten liegen (Fig. 1).

3 Landwirtschaftliche Nutzung und Klimawandel

Im Klettgau herrscht ein eher mildes und trockenes Klima. In letzter Zeit sind gehäuft trockene Sommer aufgetreten. Die Landwirtschaft hat sich in den letzten 30 Jahren laufend an diese Verhältnisse angepasst. Spätestens seit dem Hitzesommer 2003 sind sich die Landwirte bewusst, dass heute auch mit längeren Trockenphasen gerechnet werden muss und ihre Kulturen dadurch teilweise geschädigt werden können.

Da im Projektgebiet derzeit nur punktuell bewässert werden kann, wurden immer weni-

ger wasserbedürftige Kulturen angebaut. So sind Kartoffeln zusammen mit Gemüsebau, die beide einen hohen Wasserverbrauch aufweisen, heute flächenmässig unbedeutend.

Die Fruchtfolgen werden von relativ wenigen Kulturen wie Winterweizen, Mais, Raps und Rüben dominiert. Zudem haben viele Klettgauer Landwirte die Milchproduktion aufgegeben und sind zu reinem Ackerbau übergegangen. Durch weniger Raufutterverzehrer wurden auch immer weniger Kunstwiesen in die Fruchtfolgen integriert. Der Anteil Kunstwiesen macht daher heute nur noch 5% aus. Der grösste Teil der einstigen Kunstwiesen wurde in extensive Wiesen ohne wesentliche Nutzung umgewandelt, welche nicht bewässert werden müssen.

Um eine produzierende Landwirtschaft zu erhalten, wurde der Ackerbau so angepasst, dass neben Getreide immer mehr Raps und Sonnenblumen angebaut werden. Statt Sommergetreide wird praktisch nur noch Wintergetreide ausgesät, und bei den Getreiden wird eher auf Arten mit kürzerer Kulturdauer und schneller Abreife gesetzt.

4 Modellkonzepte

Zur Beantwortung der Fragestellung, wie eine zukünftige Bewässerung aus Grundwas-

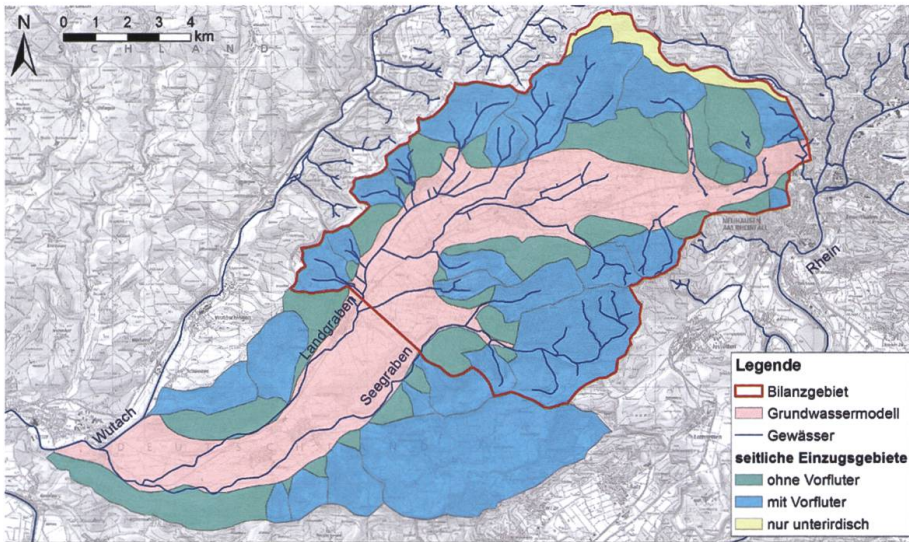


Fig. 2: Grundwassermodell und seitliche Einzugsgebiete mit Bilanzgebiet.

ser den Wasserhaushalt beeinflussen könnte, werden Prognoseinstrumente benötigt. Mit diesen Instrumenten müssen vor dem Hintergrund des Klimawandels die folgenden Teilfragen beantwortet werden:

- Welchen Bewässerungsbedarf weisen verschiedene Kulturen unter zukünftigem Klima auf?
- Wie wirkt sich eine Entnahme von Grundwasser zu Bewässerungszwecken auf die Grundwasserstände aus?
- Wie wirkt sich unabhängig einer allfälligen Bewässerung das zukünftige Klima auf die Grundwasserbilanz aus?

Für die erste Teilfrage benötigt man ein Prognoseinstrument, welches das System Boden-Pflanze-Atmosphäre behandelt, also ein Bodenwasserhaushaltsmodell. Für die zwei-

te Teilfrage wird ein Grundwassermodell benötigt. Die dritte Frage erfordert eine Kombination der beiden Modelle.

Im Rahmen des Pilotprojekts wurden diese Modelle für den Klettgau entwickelt. Die Modellgrenzen umfassen den gesamten oberirdischen und unterirdischen Einzugsbereich des Klettgaus. In vertikaler Richtung enthält das Bodenwasserhaushaltsmodell den durchwurzelten Boden, das Grundwassermodell den darunter liegenden Untergrund bis zur Schotterbasis. Die Gewässer wurden in einem dazwischen geschalteten Abflussmodell berücksichtigt. Ein Austausch über die Systemgrenzen hinweg erfolgt einerseits über den Niederschlag und die Verdunstung, andererseits über den oberirdischen und unterirdischen Abfluss in das Wutachtal. Im Osten des Klettgaus entwässert ein kleiner Teil

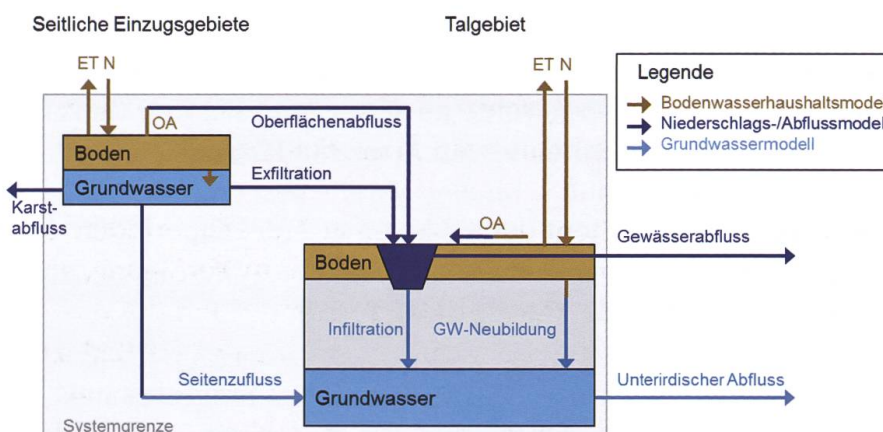


Fig. 3: Verknüpfung der drei Teilmodelle zu einem Gesamtmodell.

des Wassers als Karstabfluss ins Rheintal. Da die oberirdischen Abflüsse in den beiden Gewässern Seegraben und Landgraben nahe der Schweizer Grenze gemessen werden und sich der grenzüberschreitende unterirdische Abfluss aus dem Talquerschnitt, der Schotterdurchlässigkeit und dem Strömungsgradienten berechnen lässt, eignet sich der Schweizer Teil des Klettgaus als Bilanzgebiet (Fig. 2). Das Grundwassermodell musste über das Bilanzgebiet hinaus bis zur Wutach erweitert werden, damit eine von den klimatischen Bedingungen weitgehend unabhängige Randbedingung vorgegeben werden konnte.

Die drei Modelle werden zu einem Gesamtmodell verknüpft. Die resultierenden Fließkomponenten des Bodenwasserhaushaltsmodells werden als Eingangsparameter im Niederschlags-/Abflussmodell und dem Grundwassermodell verwendet. Abhängig von den im Niederschlags-/Abflussmodell ermittelten Gewässerabflüssen wird deren Infiltration im Grundwassermodell vorgegeben (Fig. 3). Dadurch, dass im Gesamtmodell der Wasserhaushalt umfassend betrachtet wird, reduzieren sich die äusseren Randbedingungen auf die klimatischen Parameter. Dies ermöglicht Prognoserechnungen unter Vorgabe unterschiedlicher Klimamodelle und unterschiedlichem landwirtschaftlichem Kulturmix.

Sollen Modelle für die Prognose zukünftiger Zustände einsetzbar sein, so muss zuerst gezeigt werden, dass sie die heutige Situation richtig abbilden. Die Modelle wurden deshalb anhand der Klimadaten der Jahre 2012–2019 und dem heutigen Kulturmix kalibriert. Bei der Kalibrierung wurden die Grundwasserstände und die Oberflächenabflüsse in den Modellen nachgebildet und mit den Messdaten verglichen. Anschliessend wurden die Modelle an den Messdaten der Jahre 1999–2011 getestet.

5 Modellaufbau und Kalibrierung

5.1 Bodenwasserhaushaltsmodell

Das Bodenwasserhaushaltsmodell bilanziert den Wasserhaushalt im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Für ein ausgewähltes Bilanzgebiet gilt folgende hydrologische Bilanzgleichung:

$$N - ET - G - OA = \Delta S$$

Mit N: Niederschlag
 ET: Evapotranspiration (Verdunstung)
 G: Grundwasserneubildung
 OA: Oberflächenabfluss
 ΔS : Speicherveränderung

Zur Bestimmung der Evapotranspiration wurde die Methode nach Penman-Monteith verwendet (Allen et al. 2006). Dabei wird die Referenzverdunstung für eine Grasvegetation von 12 cm Höhe berechnet (Calanca et al. 2011) und aus dieser dann die Verdunstung für eine bestimmte Pflanzenart abgeleitet. Dazu wird abhängig von der Pflanzenentwicklung ein Multiplikationsfaktor K_c vorgegeben. Die in Allen et al (2006) aufgelisteten Phasen der Pflanzenentwicklung und die dazugehörigen Faktoren wurden für Schweizer Verhältnisse angepasst. Grundlage dazu waren verschiedene Untersuchungen, Publikationen landwirtschaftlicher Beratungsstellen und Erfahrungswerte (Fuhrer 2015, Oberholzer et al. 2017, Zenker 2003, Loiskandl 2017, Lüttger et al. 2005, Zimmermann 2018). Die Werte für die Zeit ausserhalb der Wachstumsperiode der Kulturen wurden gegenüber der FAO-Publikation erhöht. Damit werden Forschungsergebnisse zur Verdunstung über Brachen (Knoblauch 2019) sowie die heute verbreitete Zwischenbegrünung besser berücksichtigt.

Steht den Pflanzen in Trockenperioden nicht mehr genügend Wasser zu Verfügung, so reduzieren sie das Wachstum und die Verdunstung. Dies wird über eine lineare Reduktion zwischen Stresspunkt und Welkepunkt berücksichtigt (Allen et al 2006).

Zur Bestimmung des Oberflächenabflusses wurde die SCS curve number method (Mockus 1972) eingesetzt. Für den flachen Talboden ergibt sie gute Resultate. Für die geneigten Flächen der seitlichen Einzugsgebiete wurde ein von der Neigung abhängiger Korrekturfaktor eingeführt (z.B. Verma 2017). Der Oberflächenabfluss wird vor Erreichen des Bodenspeichers abgeführt und steht den Pflanzen nicht zur Verfügung. Bei geneigten Flächen tritt zusätzlich ein Zwischenabfluss auf. Dieser wurde durch einen neigungsabhängigen Anteil der ermittelten Grundwasserneubildung berücksichtigt. Die in Döll & Fiedler (2008) publizierten Anteile, welche den gesamten Direktabfluss beinhalten, wurden dazu um den Oberflächenabfluss reduziert.

Zur Bestimmung der Grundwasserneubildung wurde der Ansatz nach Armbruster (2002) gewählt. Dieser berücksichtigt, dass Starkniederschläge auch bei nicht vollständig gefülltem Bodenspeicher zu Grundwasserneubildung führen.

5.2 Niederschlags- / Abflussmodell

Das Niederschlags-/Abflussmodell dient hier der Kopplung zwischen Bodenwasserhaushaltsmodell und Grundwassermodell. Es beschreibt, welche Anteile des nicht verdunste-

ten Niederschlages mit welcher Verzögerung den vorgegebenen Querschnitt eines Gewässers als Abfluss durchströmen. Zur Kalibrierung der aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell resultierenden Abflussanteile und deren Verzögerungen wurde die Software PEST eingesetzt (Doherty 2004). Der implementierte Algorithmus sucht das lokale Minimum einer Zielwertfunktion – hier die Summe der Quadrate der Differenz zwischen berechneten und gemessenen täglichen Abflüssen. Die beobachteten Abflussganglinien konnten mit dieser einfachen Methode sehr gut nachgebildet werden.

5.3 Grundwassermodell

Im regionalen Massstab kann der Grundwasserleiter des Klettgaus mit einem horizontal-zweidimensionalen Modell mit freier Oberfläche simuliert werden. Das Modell umfasst den gesättigten Bereich der Hochterrassenschotter. Die darunterliegende Felsoberfläche bildet die untere Begrenzung des Modells, die Oberkante des Modells wird durch die Topografie gebildet.

Für die numerischen Berechnungen wurde FEFLOW in der Version 7.2 eingesetzt (Diersch 2014), ein Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien. Die Nu-

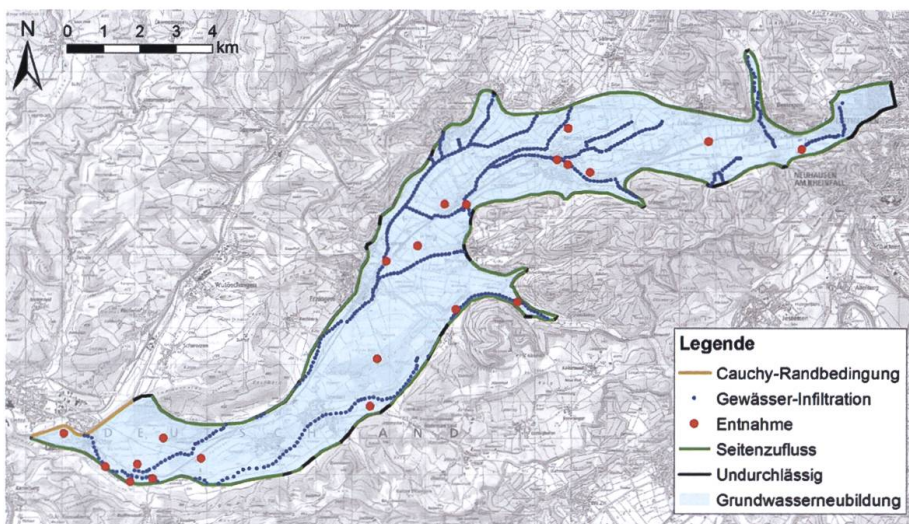


Fig. 4: Randbedingungen des Grundwassermodells.

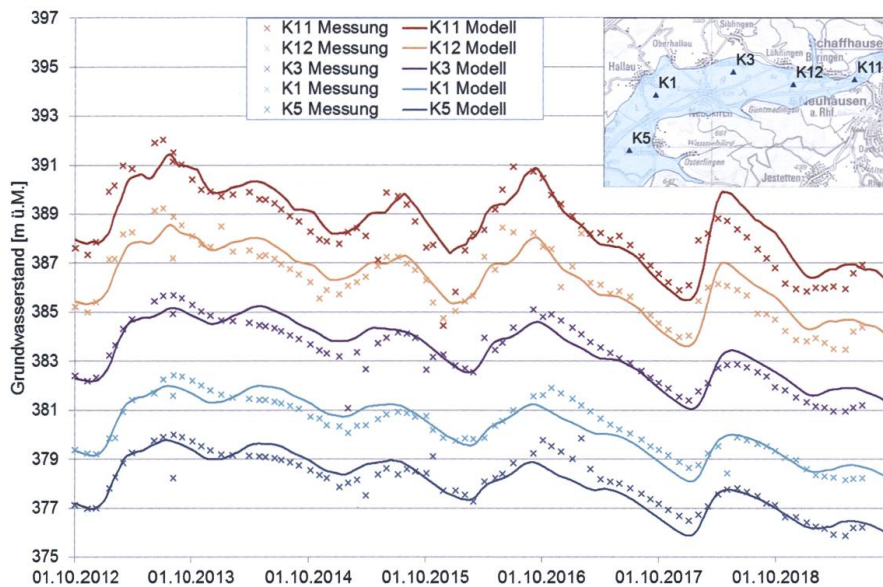


Fig. 5: Zeitlicher Verlauf der Grundwasserstände, Vergleich von Modell und Messung.

merik beruht auf der Methode der Finiten Elemente.

Das gesamte Modellgebiet wurde in 35'400 Dreieckselemente mit 18'200 Knoten unterteilt. Bei einer Modellfläche von etwa 55 km² bedeutet dies eine durchschnittliche Elementfläche von 1'500 m² oder eine charakteristische Seitenlänge von etwa 50 m. Das Modellnetz wurde entlang der Entnahmestellen und der Oberflächengewässer feiner, im übrigen Gebiet gröber unterteilt. Für die zeitliche Diskretisierung wurden Tagesschritte gewählt. Figur 4 zeigt die Modellumrisse und die Randbedingungen des Modells.

Zur Bestimmung der Grundwasserneubildung wurde der Talboden in Kacheln von 500 x 500 m unterteilt. Für jede Kachel wurden die Anteile an Wald, Landwirtschaft und Siedlung bestimmt. Der Kulturmix innerhalb der Landwirtschaftsgebiete wurde auf der Grundlage der Flächen, welche die Produzenten in den Jahren 2014 bis 2019 für Direktzahlungen des Bundes beim Kanton Schaffhausen anmeldeten, ermittelt. Für jede Kachel wurden zudem aus der Bodenkarte (FAP 1989) der Bodentyp und die Gründigkeit erhoben. Diese beiden Parameter sind, zusammen mit der Wurzeltiefe der jeweiligen Kultur, massgebend für die im Bodenwasserhaushalts-

modell verwendete nutzbare Feldkapazität. Zur räumlichen Unterscheidung der klimatischen Bedingungen wurde das Modellgebiet in drei Teilgebiete unterteilt, für die jeweils eine Klimastation als repräsentativ betrachtet werden kann.

Die Infiltration aus den Oberflächengewässern wurde prozentual zu deren, im Niederschlags-/Abflussmodell bestimmten, Abflussmenge vorgegeben.

Für die Versickerung über den ungesättigten Bereich bis zum Grundwasser wurde eine von der Beschaffenheit der Deckschichten und dem Flurabstand abhängige Verzögerung berücksichtigt.

Die Seitenzuflüsse ergeben sich aus den Bodenwasserhaushaltsmodellen der direkt ins Modellgebiet entwässernden Einzugsgebiete. Für die Randbedingungen entlang der Wutach konnten Pegelmessungen verwendet werden. Im Modell werden 21 punktuelle Grundwasser-Entnahmestellen (Pumpbrunnen) berücksichtigt. Für die Pumpbrunnen lagen Messwerte der Jahresfördermengen vor.

Für die Kalibrierung wurden die gemessenen Grundwasserstände der hydrologischen Jahre 2012 bis 2019 eingesetzt. Insgesamt stan-

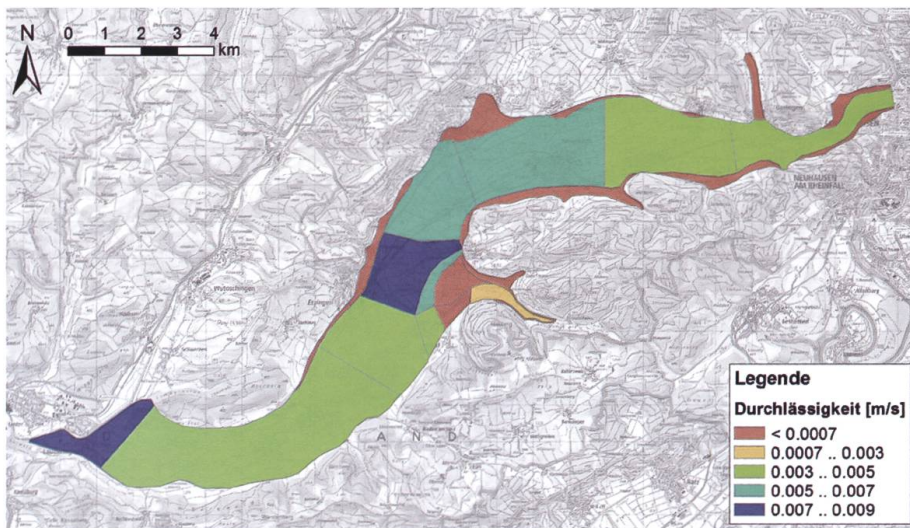


Fig. 6: Aus der Kalibrierung resultierende Durchlässigkeiten für den Schotter-Grundwasserleiter.

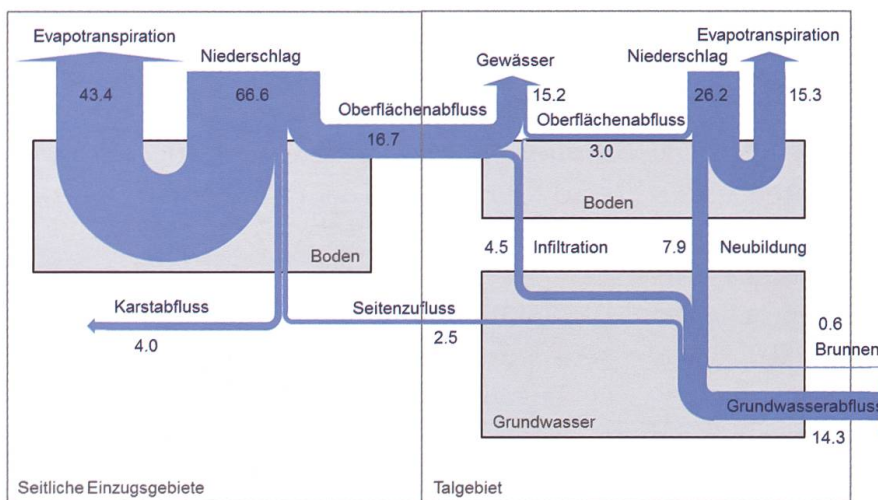


Fig. 7: Mittlere jährliche Wasserbilanz über die hydrologischen Jahre 2000-2019.

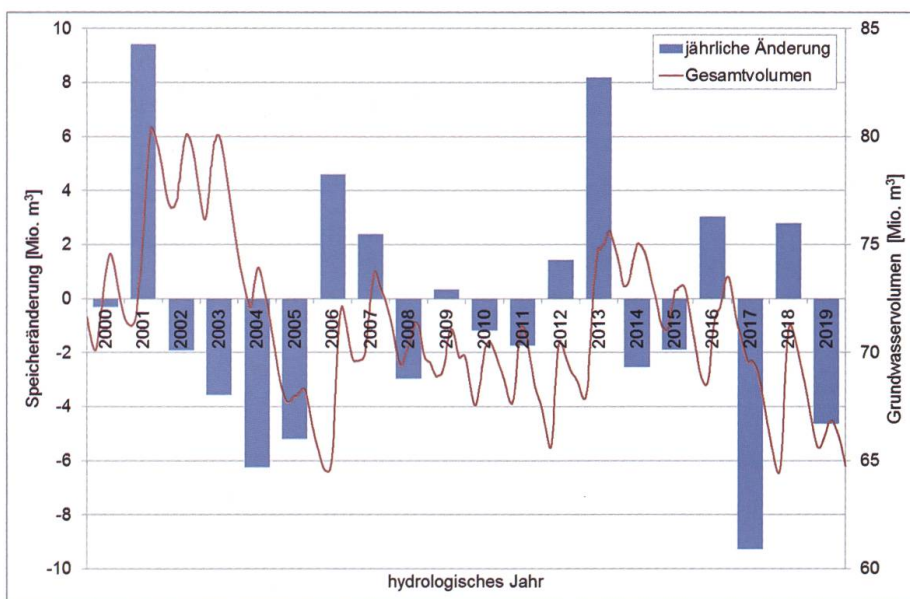


Fig. 8: Grundwasservolumen im Klettgau und dessen jährliche Änderung.

den 1912 Messungen an 15 Messstellen zur Verfügung. Figur 5 zeigt die zeitliche Übereinstimmung von Modell und Messung an fünf für den Schweizer Klettgau repräsentativen Messstellen.

Die aus der Kalibrierung resultierenden Durchlässigkeitswerte sind in Figur 6 dargestellt. Im Hochterrassenschotter beträgt die hydraulische Durchlässigkeit zwischen 3 und 7×10^{-3} m/s. In den Randgebieten und in den Nebentälern liegt die Durchlässigkeit um etwa eine Grössenordnung darunter. Diese Durchlässigkeiten entsprechen etwa denjenigen der Vorgängermodelle. Im Modell aus dem Jahr 1993 (AWBW 1993) resultierte ein Durchlässigkeitsbereich von $4 - 6 \times 10^{-3}$ m/s, im Modell von 1998 (Bühl & Tietje 1999) variierte die Durchlässigkeit zwischen 3.3 und 7.7×10^{-3} m/s.

5.4 Hydrologische Wasserbilanz

Figur 7 zeigt die Mittelwerte der Fliesskomponenten im Schweizer Klettgau über die hydrologischen Jahre 2000 bis 2019 in Mio. m³ pro Jahr. Ein grosser Teil des Niederschlages verdunstet über die Pflanzen, insbesondere in den seitlichen Einzugsgebieten. Dies ist auf den grossen Waldanteil an den südlichen und östlichen Talhängen zurückzuführen. Die seitlichen Einzugsgebiete entwässern mehrheitlich über oberirdische Gewässer in die Talebene. Nur ein kleiner Teil des Wassers fliesst unterirdisch in die Klettgauschotter oder gelangt als Karstabfluss ins Rheintal. In der Talebene überwiegt die Grundwasserneubildung aus Niederschlag gegenüber dem Oberflächenabfluss. Die Infiltration aus den Bächen und der Seitenzufluss führen dem Grundwasserleiter etwa gleich viel Wasser zu wie die Grundwasserneubildung aus Niederschlagsversickerung. Die Entnahmen aus den für die Trinkwasserversorgung genutzten Pumpbrunnen betragen nur etwa 4% des verfügbaren Grundwassers. Die restlichen 96% strömen ungenutzt

unterirdisch aus dem Bilanzgebiet nach Westen ab. Etwa die gleiche Menge Wasser fliesst über die Oberflächengewässer Richtung Deutschland.

Mit dem Grundwassermodell lassen sich die Grundwasserstände an jedem beliebigen Ort des Modellgebiets und somit auch das jeweilige Volumen des Grundwasservorkommens berechnen. Das Grundwasservolumen im Klettgau beträgt im Mittel 70 Mio. m³ und ist signifikanten jährlichen Schwankungen unterworfen. Figur 8 zeigt die Volumenänderungen und das Gesamtvolumen des Grundwassers im Zeitraum 2000–2019. Die jährliche Änderung des Speichers bezieht sich dabei auf den Endwert des jeweiligen Vorjahres.

6 Prognose mittels Szenarienrechnungen

6.1 Verwendung der Klimamodelle CH2018

Das NCCS (National Centre for Climate Services) publizierte im Rahmen des Projekts «CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland» Daten von verschiedenen Klimamodellen (NCCS 2018). Insgesamt stehen etwa 60 unterschiedliche Modelle zur Verfügung. Daraus wurden diejenigen Szenarien ausgewählt, welche für den Zeitraum 2020-2049 von allen Modellen die höchsten Abnahmen entweder der Winter- (DMI-HIRHAM) oder der Sommerniederschläge (SMHI-RCA) aufweisen.

- DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11_RCP26 (Bøssing Christensen et al 2007)
- SMHI-RCA_CSIRO_EUR44_RCP85 (Rummukainen et al 1998)

Dem Szenario «DMI-HIRHAM» liegt das Emissionsszenario RCP 2.6 (konsequenter Klimaschutz), dem Szenario «SMHI-RCA» das Emissionsszenario RCP 8.5 (kein Klimaschutz) zu Grunde. Die Modelle definieren den Referenz-

zeitraum von 1981 bis 2010 und drei Prognosezeiträume (2020-2049, 2045-2074, 2070-2099).

In der vorliegenden Arbeit wurde der Prognosezeitraum 2020-2049 verwendet, da dieser einem realistischen Planungszeitraum für Bewässerungsprojekte entspricht. Das Bodenwasserhaushaltsmodell, das Niederschlags-/Abflussmodell und das Grundwassermodell wurden jeweils über den Zeitraum von 1981 bis 2049 durchgerechnet. In der Auswertung wurde der Prognosezeitraum 2020-2049 mit dem Referenzzeitraum 1981-2010 verglichen. Die dazwischen liegenden Jahre werden benötigt, um den Ausgangszustand für das Jahr 2020 zu ermitteln. Im Westen des Modells wurden die Klimadaten der Station Hallau, im Osten jene der Station Schaffhausen verwendet.

Die modernen Klimamodelle haben sich aus den Wettervorhersagemodellen entwickelt.

Über die Berücksichtigung diverser physikalischer Prozesse wird eine Zeitreihe von Wetersituationen erzeugt, welche die Mittelwerte und die Variabilität der vergangenen und zukünftig zu erwartenden Klimaparameter abbilden (Stocker 2008). Aus den definierten Zeitreihen dürfen deshalb nicht einzelne Jahre verglichen werden, sondern nur daraus abgeleitete statistische Grössen. Die für den Zeitraum 1981-2010 simulierte Zeitreihe entspricht auch nicht der in diesem Zeitraum gemessenen Zeitreihe.

6.2 Integration der Bewässerung in die Modelle

Der Bewässerungsbedarf wurde basierend auf den ausgewählten Klimamodellen im Bodenwasserhaushaltsmodell simuliert.

Grundlage dazu ist die Berücksichtigung

Kürzel	Szenario	Annahmen
Ohne	1. Keine Bewässerung	Bei länger dauernder Trockenheit sinkt der Bodenwassergehalt bis zum Welkepunkt, die Pflanze wird irreversibel geschädigt.
Min	2. Minimale Bewässerung	Die Bewässerungsschwelle wird, abhängig von der Kultur, so tief angesetzt, dass keine irreversiblen Schäden auftreten. In Trockenjahren muss mit bedeutenden Ertragsausfällen gerechnet werden.
Mod	3. Moderate Bewässerung	Die Bewässerungsschwelle wird so angesetzt, dass der Ertrag durch den Wasserstress nicht zu stark reduziert wird.
Max	4. Angepasster Kulturmix	Es findet eine moderate Bewässerung gemäss Szenario 3 statt. Der Kulturmix wird zugunsten von Kulturen mit höherem Bewässerungsbedarf umgestellt.

Tab. 1: Bewässerungsszenarien.

Kultur (Kategorie)	DMI-HIRHAM		DMI-HIRHAM		SMHI-RCA		SMHI-RCA	
	1981 - 2010		2020 - 2049		1981-2010		2020 - 2049	
	Min	Mod	Min	Mod	Min	Mod	Min	Mod
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Getreide	8	31	7	31	10	35	14	44
Mais und Sonnenblumen	16	51	18	56	28	71	45	105
Kartoffeln	34	127	35	132	45	143	67	187
Rüben	11	45	13	51	21	62	34	93
Reben	0	0	0	0	0	1	1	2
Oelfrüchte ohne Sonnenblumen	2	7	2	7	2	8	3	8
Körnerleguminosen	7	28	5	28	8	37	16	53
Obst/Gemüse/Beeren/Sträucher	20	82	17	81	26	98	38	119
Grünfläche intensiv (Kunstwiesen, Dauerwiesen, Weiden)	10	55	11	59	18	72	31	104

Tab. 2: Mittlerer Bewässerungsbedarf in Abhängigkeit des Klimamodells, des Zeitraums und der Kultur.

des Wasserstressfaktors gemäss Allen et al (2006). Der Füllgrad des Bodenspeichers wurde unter den vorgegebenen klimatischen Bedingungen für jeden Tag berechnet. Sobald der Füllgrad unter einen vorgegebenen Schwellwert absinkt, wird dem Boden im Modell so viel Wasser zugegeben, dass gerade der Schwellwert erreicht wird (Führer 2010). Das benötigte Wasser wird von der Grundwasserneubildung im Talgebiet abgezogen, da es durch Grundwasserentnahme aus dem Klettgauschotter bezogen würde. In Trockenzeiten können dabei negative Grundwasserneubildungsraten resultieren. Die Grundwasserentnahme für die Bewässerung erfolgt im Grundwassermodell also nicht in einzelnen Pumpbrunnen, sondern gleichmässig über die Landwirtschaftsfläche verteilt.

Bei den vorliegenden Berechnungen wird immer von einer idealen Bewässerung ausgegangen, d.h. es wird zum richtigen Zeitpunkt die richtige Bewässerungsmenge so ausgebracht, dass das Wasser für die Pflanzen verfügbar ist.

6.3 Untersuchte Bewässerungs- und Entnahmeszenarien

Es wurden vier Bewässerungsszenarien untersucht (Tab.1). Dazu wurden für jedes Szenario und jede Kultur jeweils auf den Wasserbedarf und die Wachstumsphasen abgestimmte Bewässerungsschwellen vorgegeben. Alle Szenarien gehen von einem begrenzt verfügbaren Grundwasserdargebot aus. Bewässerung soll im Klettgau in erster Linie zur Erhaltung der heutigen, vorwiegend auf Ackerbau basierenden, Landwirtschaft eingesetzt werden. Die Bewässerungsschwellen werden deshalb nicht auf die Erzielung eines maximalen Ertrages ausgerichtet, sondern auf die Vermeidung von grossen Ertragsausfällen (Butz 2018, Führer & Smith 2015, Zorn & Lips 2016).

Die in den Bodenwasserhaushaltsmodellen für die Klimamodelle DMI-HIRHAM und

SMHI-RCA berechneten mittleren jährlichen Bewässerungsmengen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Es ist zu beachten, dass der Bewässerungsbedarf in einzelnen Jahren abhängig von den klimatischen Verhältnissen deutlich geringer oder deutlich höher ausfallen kann. Dies wäre bei der Auslegung der Bewässerungsinfrastruktur zu beachten.

6.4 Resultierende Auswirkungen

Bewässerung wirkt sich in der Wasserbilanz praktisch nur durch eine Erhöhung der Evapotranspiration aus. Dadurch, dass dem Boden bei Trockenheit Wasser zugeführt wird, werden der Trockenstress für die Pflanzen verringert und das Wachstum sowie die Verdunstung über die Pflanze gefördert. Zu einem kleinen Teil erhöht die Bewässerung zudem die Grundwasserneubildung, da der Bodenspeicher feucht gehalten und beim nächsten Niederschlag schneller gesättigt wird.

Zur Darstellung der Auswirkungen auf die Grundwasserstände wurde für jedes Bewässerungsszenario der Prognosezeitraum 2020-2049 mit dem Zustand ohne Bewässerung im Referenzzeitraum 1981-2010 verglichen. Relevant für die Verhältnisse im Grundwasserleiter ist der minimale Grundwasserstand, da dieser zur Bestimmung von kritischen Zuständen bezüglich der Trinkwassergewinnung, herangezogen werden müsste. Die Figuren 9 und 10 zeigen für das Modellgebiet jeweils die Differenz der im Zeitraum erreichten minimalen Grundwasserstände im Bewässerungsszenario 3 zur Referenz ohne Bewässerung.

Die Grundwasserentnahme zur Bewässerung wirkt sich in einer Absenkung des Grundwasserstandes aus. Für die Aufrechterhaltung der Trinkwasserversorgung kann dies insbesondere dann kritisch werden, wenn der Grundwasserstand klimatisch bedingt bereits niedrig ist. Für jedes Bewässerungsszenario wurde deshalb der im

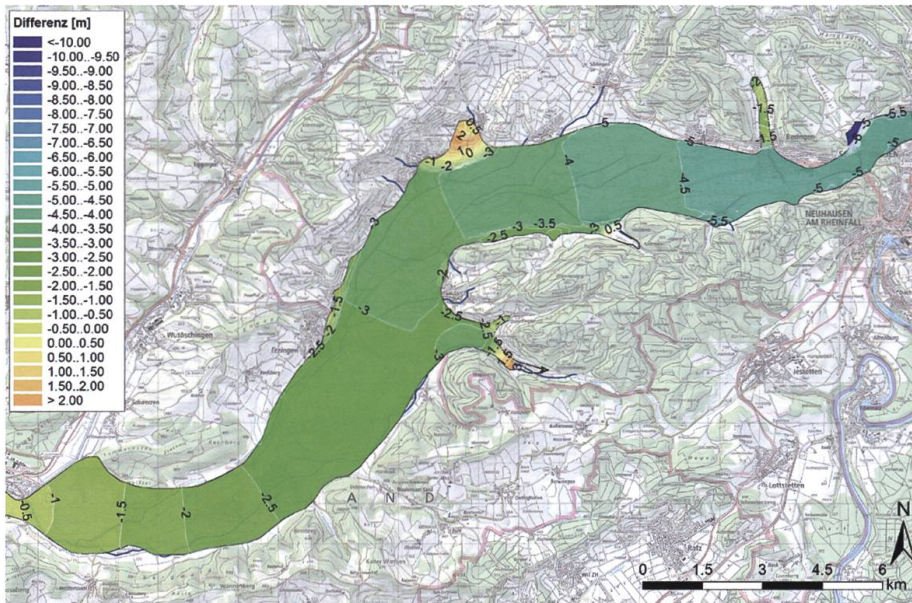


Fig. 9: Differenz der minimalen Grundwasserstände zwischen dem Szenario 1 im Zeitraum 2020-2049 mit der Referenz ohne Bewässerung im Zeitraum 1981-2010. Klimamodell DMI-HIRHAM-RCP26.

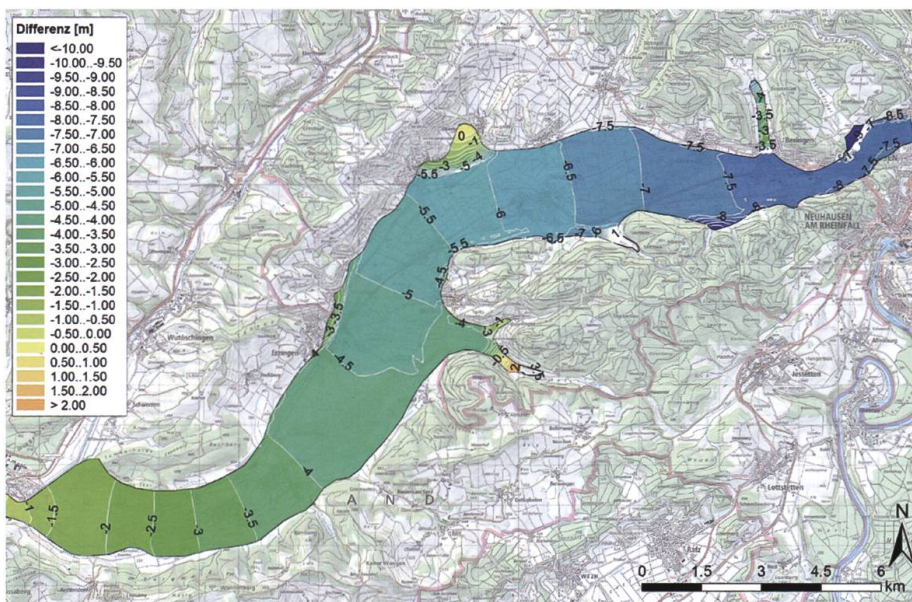


Fig. 10: Differenz der minimalen Grundwasserstände zwischen dem Szenario 3 im Zeitraum 2020-2049 mit der Referenz ohne Bewässerung im Zeitraum 1981-2010. Klimamodell DMI-HIRHAM-RCP26.

Prognosezeitraum 2020-2049 erreichte minimale Grundwasserstand mit dem minimalen Grundwasserstand im Zeitraum 1981-2010 (ohne Bewässerung) verglichen. In den Figuren 9 und 10 sind ausgewählte Szenarien dargestellt. Figur 9 zeigt die Differenz der jeweils im Zeitraum erreichten minimalen Grundwasserstände, wenn in beiden Zeiträumen nicht bewässert wird. Die dargestellte Absenkung ist also rein klimatisch bedingt. Figur 10 zeigt die Absenkung beim Bewässerungsszenario 3 gegenüber der Referenz ohne Bewässerung im Zeitraum 1981-2010. Aus dem Unterschied der beiden Figuren

ergibt sich der Einfluss einer Bewässerung gemäss Szenario 3.

Zeichnet man die modellierten Grundwasserstände in einem Punkt, z.B. bei der Messstelle K12 im Ostteil des Klettgaus, auf, so lässt sich die zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes ablesen (Fig. 11). Bei beiden Klimamodellen wechseln sich Trockenperioden mit Nassperioden ab, was zu beträchtlichen Schwankungen des Grundwasserstandes führt. Der Einfluss der Bewässerung ist im Vergleich dazu untergeordnet und beträgt etwa 3 m. Die Entnahme für Bewässerungs-

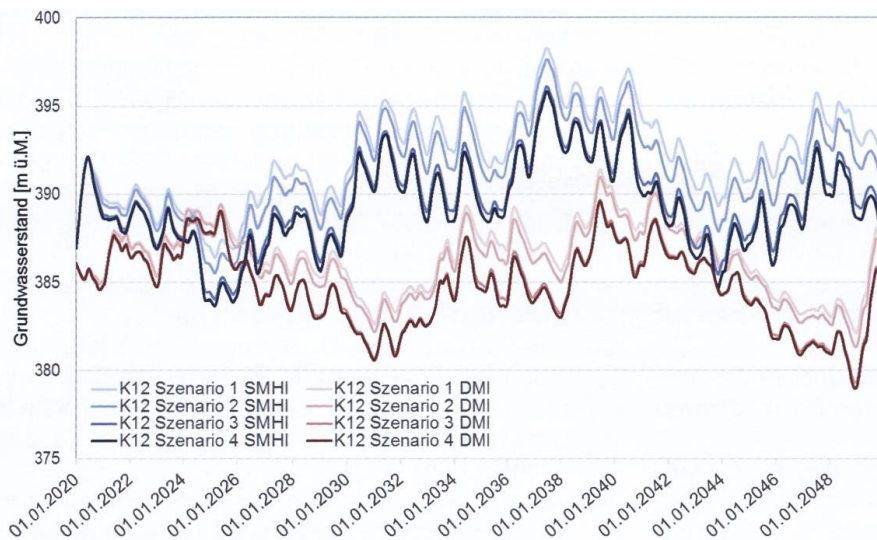


Fig. 11: Zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes bei allen 8 Kombinationen von Bewässerungsszenario und Klimaszenario für den Zeitraum 2020 – 2049.

zwecke wird nach einigen Jahren durch den reduzierten Abfluss nach Westen kompensiert, weshalb die Kurven für die Szenarien mit und ohne Bewässerung nach etwa 10 Jahren parallel verlaufen.

Der minimale Grundwasserstand wird beim Klimamodell SMHI-RCA im Jahr 2025, beim Klimamodell DMI-HIRHAM im Jahr 2048, nach einer mehrjährigen Trockenperiode, erreicht. Es zeigt sich, dass die grösseren Auswirkungen beim Klimamodell DMI-HIRHAM auftreten, da in diesem Modell die für die Grundwasserneubildung relevanten Winterniederschläge im Zeitraum 2020-2049 abnehmen. Beim Klimamodell SMHI-RCA hingegen sind die Winterniederschläge im Zeitraum 2020-2049 höher als im Referenzzeitraum; die Absenkung des minimalen Grundwasserstandes ist deshalb vor allem auf die in den trockeneren Sommern erforderliche Bewässerung zurückzuführen.

7 Fazit

Die neuesten Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels zeigen, dass die Grundwasserneubildung insgesamt gesehen etwa gleichbleibt, jedoch im Sommer tendenziell ab- und im Winter zunehmen wird (BAFU 2021). Dies zeigt sich auch bei der lo-

kalen Betrachtung der Situation im Klettgau. Im Unterschied zu anderen, eher oberflächennahen Grundwasservorkommen bewirken im Klettgau jedoch die zu erwartenden – auch über mehrere Jahre dauernden – Trockenphasen eine kumulierte Grundwasserabsenkung. Die Grundwasserstände können dann bis zu 5 m unter denen der Referenzperiode liegen.

Die Landwirtschaft muss mit dem Klimawandel aufgrund der höheren Temperaturen und der abnehmenden Sommerniederschläge mit einer grösseren Trockenheit und damit einem höheren Bewässerungsbedarf rechnen. Beim ungünstigsten der betrachteten Szenarien wird durch die Bewässerung eine Absenkung der Grundwasserstände um weitere 3 m prognostiziert. Diese Absenkung entspricht etwa 10% des gesamten Grundwasservolumens von 70 Mio. m³. Über das grosse Grundwasservolumen könnten Bedarfsspitzen gepuffert werden.

Insofern erscheint ein Bezug von Grundwasser zu Bewässerungszwecken – unter Priorisierung der Trinkwasserversorgung – denkbar. Ob dies auch hinsichtlich wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und ökologischer Aspekte sinnvoll ist, wird momentan in einem zweiten Teil des Projekts untersucht.

Literatur

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith M. 2006: Crop Evapotranspiration. - FAO Irrigation and Drainage Paper No 56.
- Amt für Wasserwirtschaft und Bodenschutz Waldshut (AWBW) 1993: Programmgebiet Klettgaaurinne, Landkreis Waldshut, länderübergreifendes Grundwassermodell. - Hydrag, Karlsruhe.
- Armbruster, V. 2002: Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. - Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 17.
- BAFU 2018: Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel Phase II. Bundesamt für Umwelt BAFU.
- BAFU (Hrsg.) 2021: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 140 S.
- Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft 2008: Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen. - LfL-Information, Freising.
- Bøssing Christensen, O., Drews, M., Hesselbjerg Christensen, J., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I. & Rinke, A. 2007: The HIRHAM Regional Climate Model. Version 5 (beta). - Danish Climate Centre, Danish Meteorological Institute. Denmark. Danish Meteorological Institute. Technical Report No. 06-17 <http://www.dmi.dk/dmi/tr06-17>.
- Bühl, H. & Tietje, O. 1999: Mathematisches Grundwassermodell Klettgaaurinne. - Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, Band 44 (1999).
- Butz, A. F. 2018: Einfluss von Bewässerung auf Ertrag und Ertragsstabilität bei Ackerbaukulturen. - Landinfo 4/2018.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A. & Ammann, C. 2011: Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie. - Agrarforschung Schweiz 2 (4): 176-183.
- Chaix, O. et al 2016: Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit, Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. - Hunziker Betatech AG im Auftrag des BAFU.
- Diersch, H-J. G. 2014: FEFLOW, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. - Springer Verlag
- Doherty, J. 2004: PEST – Model-Independent Parameter Estimation. - Watermark Numerical Computing.
- Döll, P. & Fiedler, K. 2008: Global-scale modeling of groundwater recharge. - Hydrol. Earth Syst. Sci., 12, 863-885, 2008.
- Eidg. Forschungsanstalt für landw. Pflanzenbau 1989: Bodenkarte / Wasserhaushalt des Bodens, Oberklettgau.
- Fuhrer, J. & Smith, P. 2015: Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel Landschaft. - Agroscope.
- Graf, H.R. 2009: Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz. - Beitr. Geol. K. Schweiz, N.F. 68, Swisstopo, Bern.
- Knoblauch, S. 2019: Einfluss unterschiedlicher Formen der Bewirtschaftung der Brache auf die Verdunstung ackerbaulich genutzter Böden im mitteldeutschen Trockengebiet. - 18. Gumpensteiner Lysimetertagung, 59-66.
- Loiskandl, W. 2017: Vorlesung Bodenwasserwirtschaft. - BOKU, Download am 28.10.2019 von <https://docplayer.org/46660902-Bodenwasserwirtschaft-willibald-loiskandl.html>.
- Lüttger, A., Dittmann, B. & Sourell, H. 2005: Leitfaden zur Berechnung landwirtschaftlicher Kulturen. - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV).
- Mockus, V. 1972: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. - National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10.
- NCCS 2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Technical Report - National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- Oberholzer, S., Hund, A. & Prahuhn, V. 2017: Auswertung von Lysimeterdaten über sieben Jahre zur Bestimmung von Evapotranspiration, Wassernutzungseffizienz und Pflanzenkoeffizienten. - 17. Gumpensteiner Lysimetertagung, 201-204.
- Rummukainen, M., Räisänen, J., Ullerstig, A., Bringfelt, B., Hansson, U., Graham, P. & Willén, U. 1998: RCA - Rossby Centre regional Atmospheric climate model: model description and results from the first multi-year simulation. - SMHI Reports Meteorology and Climatology, No. 83, Nov 1998.
- Rüsch, A. 2016: Grundlagen zur Bewässerung. - Strickhof, Vorlesung.
- Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C., Lange, S., Röttcher, K. & Bittner, F. 2017: Bewässerung in der Landwirtschaft. - Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Thünen Working Paper 85.
- Stocker, T. 2008: Einführung in die Klimamodellierung, Universität Bern.
- Stössel-Sittig, I. 2020: Geologie der Region Schaffhausen. - Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, Nr. 72/2020, 105 S.
- Verma, S., Singh, A., Singh, P.K., Kumar, R. & Kumar, S. 2017: Efficacy of Slope-adjusted Curve Number models with varying abstraction coefficient for Runoff Estimation. - International Journal of hydrology Science and Technology, DOI: 10.1504/IJHST.2018.10016471.
- Zenker, T. 2003: Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung. - Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Zimmermann, L. et al 2018: Wasserverbrauch von Wäldern. - LWF aktuell, 66/2018.
- Zorn, A. & Lips, M. 2016: Wirtschaftlichkeit der Bewässerung ausgewählter Kulturen im Kanton Basel Landschaft. - Agroscope, Projekt im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel.

**BAUGRUND-
VERSTÄRKUNG**

**GEBÄUDE-
AUFSTOCKUNG**

**FUNDAMENT-
STABILISIERUNG**

**GEBÄUDE-
HEBUNG**

**RISSE?
SENKUNGEN?**

URETEK

Injektionen schnell und einfach!



Kostenlose Angebote:

URETEK Schweiz AG

6052 Hergiswil

Tel. 041 676 00 80

www.uretek.ch - uretek@uretek.ch

URETEK®

