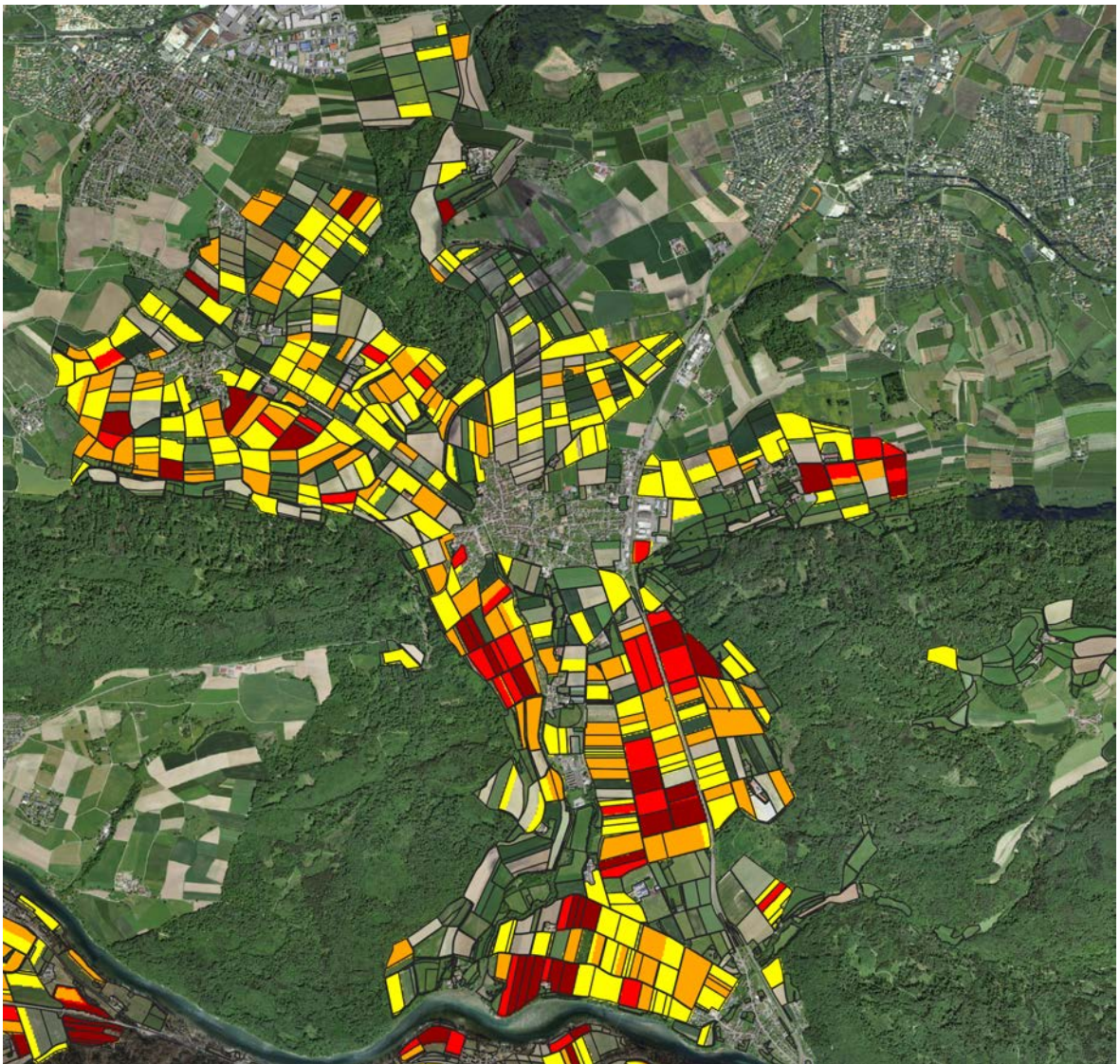


Satellitenfernerkundung zur Erfassung bewässerter Flächen und Bewässerungsmengen in der Schweiz

Validierung und methodische Weiterentwicklung am Beispiel des Bibertals im Kanton Schaffhausen

Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU – Dezember 2025



Impressum

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer:

hydrosolutions GmbH, Venusstrasse 29, CH-8050 Zürich

www.hydrosolutions.ch, E-Mail: hs@hydrosolutions.ch, Telefon: +41 43 535 05 80

Autoren:

Dr. Silvan Ragetti

Dr. Beatrice Marti

Dr. Tobias Siegfried

Begleitung BAFU:

P. Schmocker-Fackel, F. Hüsler

Hinweis:

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) ausgeführt. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitiervorschlag: Ragetti S., Marti B., Siegfried T. (2025). Satellitenfernerkundung zur Erfassung bewässerter Flächen und Bewässerungsmengen in der Schweiz – Validierung und methodische Weiterentwicklung am Beispiel des Bibertals im Kanton Schaffhausen. hydrosolutions GmbH, Zürich. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17788920>

Titelbild: Satellitenansicht des Bibertals, Kanton Schaffhausen, mit Bewässerungsklassifizierung (Hintergrundbild: swisstopo SWISSIMAGE).



Zusammenfassung

Bewässerung ist entscheidend für die landwirtschaftliche Sicherheit der Schweiz, doch die Datenlage ist unzureichend. In der Schweiz fehlen umfassende, flächendeckende Informationen über bewässerte Flächen und tatsächlich eingesetzte Wassermengen. Während kantonale Behörden über Bewilligungen und Konzessionen verfügen, sind die tatsächlich bewässerten Flächen und deren Wasserverbrauch in den meisten Kantonen nicht systematisch dokumentiert. Satellitenfernerkundung bietet den Vorteil, grossflächig und objektiv Informationen zu Landnutzung und Wasserverbrauch zu erfassen.

Diese Studie entwickelt und validiert eine satellitenbasierte Methode zur Erfassung bewässerter Flächen in der Schweiz. Am Beispiel des Bibertals im Kanton Schaffhausen wurde eine auf Satellitenfernerkundung basierende Methode zur Identifikation bewässerter Flächen und zur Quantifizierung des Bewässerungswasserverbrauchs entwickelt und validiert. Die Methode nutzt Evapotranspirationsdaten aus Satellitenprodukten und kombiniert diese mit maschinellem Lernen, um zwischen niederschlagsbedingter (ETgreen) und bewässerungsbedingter Verdunstung (ETblue) zu unterscheiden.

Die Validierung im Bibertal zeigt eine starke Korrelation zwischen modellierten und gemessenen Wassermengen. Der satellitenbasiert ermittelte Bewässerungswasserverbrauch korreliert stark mit den gemeldeten Wasserbezugsdaten aus Rhein und Biber ($R^2 = 0,77$). Die Methode bildet sowohl jährliche als auch monatliche Schwankungen konsistent ab und identifiziert bekannte Bewässerungsgebiete zuverlässig. Im Durchschnitt wurden im Bibertal pro Jahr rund 135 Hektar als bewässert klassifiziert, wobei 69% innerhalb der konzessionierten Bewässerungsflächen lagen.

Die Methode unterschätzt den absoluten Wasserverbrauch systematisch, bildet aber zeitliche Muster zuverlässig ab. Der satellitenbasiert ermittelte Bewässerungswasserverbrauch (ETblue) liegt durchschnittlich bei 22,6 % des ausgebrachten Wassers. Ein Teil dieser Differenz ist auf reale Verluste durch Versickerung, Oberflächenabfluss und Verdunstung zurückzuführen. Der tiefe Wert spiegelt jedoch vor allem methodische Limitationen der Fernerkundung wider: Datenlücken durch Bewölkung, begrenzte Sensitivität bei hohem Regenwasseranteil und fehlende Erfassung der Bewässerung in der frühen Anwachsphase führen zu einer systematischen Unterschätzung. Dennoch identifiziert die Methode die zeitlichen Perioden mit erhöhtem Bewässerungsbedarf zuverlässig.

Die Anwendung auf die Kantone Zürich, Thurgau und Schaffhausen zeigt die räumliche Übertragbarkeit der Methode. Bekannte Bewässerungsgebiete wie das Thurtal und das Furttal werden korrekt identifiziert. Die Gemeinden mit den höchsten Bewässerungsanteilen liegen im Bibertal und Umgebung (Diessenhofen 50,5%, Buch 49,9%, Ramsen 43,3 %). Der Vergleich mit Modellschätzungen von Agroscope und kantonalen Angaben

zeigt teilweise signifikante Abweichungen, die auf unterschiedliche methodische Ansätze zurückzuführen sind.

Die Methode eignet sich für regionales Monitoring, nicht für punktgenaue Kontrollen einzelner Betriebe. Die Studie zeigt, dass Satellitendaten grundsätzlich geeignet sind, Bewässerungsaktivitäten zu erfassen und zeitlich-räumliche Muster abzubilden. Allerdings bestehen Limitationen bei der punktgenauen Bestimmung auf Feldebene. Mögliche zukünftige Anwendungen der Methode sollten daher auf Gemeindeebene oder grössere räumliche Einheiten fokussieren, und als Ergänzung zu bestehenden Ansätzen wie Messungen im Feld, Modellierungen und kantonalen Erhebungen verstanden werden.

Für eine schweizweite Anwendung sind weitere Validierungsstudien erforderlich. Die vorliegende Studie schafft eine methodische Grundlage und zeigt das Potenzial auf, dass Daten zur Wassernutzung mit verhältnismässig geringem Aufwand über Satellit schweizweit erhoben werden können. Für die Anwendbarkeit in der ganzen Schweiz ist jedoch eine gute geografische Abdeckung von Validierungsstudien nötig. Insbesondere sollten ähnliche Studien in Regionen mit den höchsten Wassermengen wie dem Wallis oder dem Seeland durchgeführt werden, mit Fokus auf Kulturen, die im Bibertal nicht von zentraler Bedeutung sind (z.B. Wiesenbewässerung, Obstkulturen, Reben). Idealerweise sollten diese Studien mit georeferenzierten Validierungsdaten durchgeführt werden, um die Modellparameter systematisch zu optimieren.

Die erforderlichen Datensätze sind schweizweit verfügbar, könnten aber gezielt verbessert werden. Die in dieser Studie verwendeten grundlegenden Datensätze – Satellitendaten, Nutzungsflächen, digitales Höhenmodell, Bodenhinweiskarte, Niederschlagsdaten – sind schweizweit mit ausreichender räumlicher Auflösung verfügbar. Durch gezielte Ergänzungen könnte die Methode jedoch weiter verbessert werden. Insbesondere wird eine Integration von kantonalen Daten zu Bewässerungskonzessionen als Attribute in den Nutzungsflächen empfohlen.

Mit den geplanten Starts von weiteren Satellitenmissionen in den kommenden Jahren werden künftig täglich hochaufgelöste Landoberflächentemperaturen verfügbar sein. Dies wird gegenüber der heutigen Situation eine erhebliche Verbesserung darstellen und ein operatives, schweizweites Bewässerungsmonitoring mit laufender Datenerhebung ermöglichen. *Operativ* bedeutet in diesem Zusammenhang ein regelmässiges, zuverlässiges und institutionell verankertes Monitoring, das dauerhaft betrieben und für Entscheidungsprozesse genutzt werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abkürzungsverzeichnis	4
1 Hintergrund	5
2 Ziele	7
3 Studiengebiet	8
3.1 Datenlage und Wasserentnahmen	9
3.2 Landwirtschaftliche Nutzung.....	9
4 Vorgehensweise und Datengrundlage	12
4.1 Methode der Pilotstudie Thurgau	12
4.2 Weiterentwicklung der Methode mit maschinellem Lernen.....	13
4.3 Satellitendaten	17
4.4 Landnutzungsflächen	19
4.5 Eingabedaten für das maschinelle Lernmodell.....	20
4.6 Parametrisierung und Annahmen für die Anwendung im Bibertal	22
5 Resultate.....	24
5.1 Bewässerungsflächen Bibertal	25
5.2 Vergleich mit Wasserbezugsdaten Bibertal	27
5.3 Vergleich der Bewässerungsanteile nach Kultur	29
5.4 Anwendung auf Kantone Schaffhausen, Zürich und Thurgau	30
6 Diskussion und Schlussfolgerungen	35
6.1 Eignung von Satellitendaten und Limitationen.....	35
6.2 Anforderungen an ergänzende Datenquellen	36
6.3 Empfehlungen für die schweizweite Anwendung	38
7 Danksagung	40
8 Verfügbarkeit der Codes.....	40
9 Literaturverzeichnis	41
Anhang 1: Technische Details zur Implementierung des Ansatzes des maschinellen Lernens	43
Anhang 2: Ergänzende Abbildungen.....	45

Abkürzungsverzeichnis

DHM – Digitales Höhenmodell

ET – Evapotranspiration

ETa – Aktuelle Evapotranspiration

ETblue – Bewässerungsbedingte Evapotranspiration

ETc – Potenzielle Evapotranspiration

ETgreen – Niederschlagsbedingte Evapotranspiration

ESA – Europäische Weltraumorganisation

FAO – Food and Agriculture Organization

HSOL – hydrosolutions GmbH

Kc – Crop-Koeffizient

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

USGS – United States Geological Survey

WaPOR – Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data

1 Hintergrund

In der Schweiz stellt die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasserressourcen eine zentrale Herausforderung in der modernen Landwirtschaft dar, vor allem unter den Bedingungen des Klimawandels, die zunehmend Trockenperioden mit sich bringen. In landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen des Mittellandes ist Bewässerung bereits heute ein zentrales Element der Ertragssicherung, insbesondere bei wasserintensiven Kulturen wie Gemüse, Kartoffeln, Obst, Beeren und Reben, die in Trockenperioden besonders auf eine ergänzende Wasserversorgung angewiesen sind.

Um die zukünftige Planung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen auf eine solide Datengrundlage zu stellen, hat der Bundesrat im Mai 2022 in Erfüllung des Postulats Rieder ([18.3610](#)) den Bericht Wasserversorgungssicherheit und Wassermanagement – Grundlagenbericht verabschiedet (Bundesrat 2021). Darin wurde das Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, abzuklären, welche Daten zur Wassernutzung mit verhältnismässig geringem Aufwand schweizweit erhoben werden können. Zudem sieht der Grundlagenbericht vor, dass das BAFU Wissensgrundlagen und Konzepte bereitstellt, um den Kantonen eine einheitliche und standardisierte Erhebung von Wassernutzungsdaten zu ermöglichen. Bis Ende 2026 soll das BAFU dem Bundesrat Vorschläge unterbreiten, wie Wassernutzungsdaten in der Schweiz künftig systematisch erfasst werden könnten. Die landwirtschaftliche Bewässerung spielt dabei eine Schlüsselrolle, da sie in Trockenperioden zu den grössten Entnahmeanteilen gehört und regional erhebliche Auswirkungen auf die Wasserbilanz haben kann.

Bisher fehlen jedoch umfassende, flächendeckende Informationen über die bewässerten Flächen und die tatsächlich eingesetzten Wassermengen. Während kantonale Behörden über Bewilligungen und Konzessionen verfügen, sind die tatsächlich bewässerten Flächen und deren Wasserverbrauch in den meisten Kantonen nicht systematisch dokumentiert. Die bisher verfügbaren Schätzungen beruhen auf Umfragen, kantonalen Angaben oder Modellierungen (Agroscope 2025), deren Genauigkeit und räumliche Auflösung begrenzt sind (HAFL 2023). Auch der Leitfaden Bewässerung des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW 2024) betont, dass die Grundlagen zur Erhebung und Beurteilung des landwirtschaftlichen Wasserverbrauchs weiter verbessert werden müssen, insbesondere im Hinblick auf eine präzise Dimensionierung von Bewässerungsprojekten und die Beurteilung der Bewässerungswürdigkeit von Kulturen.

hydrosolutions GmbH (HSOL) ist spezialisiert auf die Fernerkundung von landwirtschaftlichen Wassernutzungen und hat in mehreren internationalen Studien (Ragettli et al. 2018, 2024; Rosa et al. 2024) Methoden zur satellitenbasierten Erfassung und Analyse von Bewässerungssystemen entwickelt und angewendet. Satellitenfernerkundung bietet den entscheidenden Vorteil, grossflächig und objektiv Informationen zu Landnutzung, Vegetationsentwicklung und Wasserverbrauch zu erfassen. Sie ermöglicht eine wiederholte, flächendeckende Beobachtung landwirtschaftlicher Flächen mit hoher zeitlicher Auflösung und ohne aufwändige Geländeerhebungen. Durch die Kombination optischer

und thermaler Satellitendaten lassen sich Bewässerungsereignisse und Wasserverbrauch identifizieren und quantifizieren, was insbesondere für die Überwachung und Planung der landwirtschaftlichen Wassernutzung wertvolle Erkenntnisse liefert. Allerdings existiert für die Schweiz bislang keine etablierte, standardisierte Methode zur satellitenbasierten Erfassung bewässerter Flächen. Internationale Anwendungen konzentrieren sich bislang vorwiegend auf aride und semi-aride Gebiete, in denen Bewässerung grossflächig und klar abgrenzbar ist, während die kleinteilige Bewässerungsstruktur der Schweiz zusätzliche methodische Herausforderungen mit sich bringt.

In Zusammenarbeit mit dem Kanton Thurgau hat HSOL deshalb eine auf die Schweiz angepasste Methode entwickelt, um bewässerte Flächen und den Wasserverbrauch mithilfe von Satellitenfernerkundung abzuschätzen (hydrosolutions GmbH 2024). Um die Methode weiterzuentwickeln und ihre Übertragbarkeit zu testen, hat das BAFU HSOL beauftragt, bewässerte Flächen und den mehrjährigen Wasserverbrauch für Bewässerung im Bibertal im Kanton Schaffhausen zu bestimmen. Das Bibertal im Kanton Schaffhausen dient als Pilotgebiet für diese Validierung und wurde gewählt, weil hier sowohl detaillierte Entnahmedaten aus Rhein und Biber als auch Abgrenzungen der bewilligten Bewässerungsflächen vorliegen und damit gute Voraussetzungen für eine Verknüpfung von Satellitenbeobachtungen und gemessenen Wasserbezugsmengen bestehen. Damit soll geklärt werden, unter welchen Bedingungen und mit welchen ergänzenden Datengrundlagen satellitenbasierte Methoden einen Beitrag zur Erhebung von Wassernutzungsdaten leisten können.

Aufbauend auf der im Bibertal angewandten Methode wird im vorliegenden Bericht untersucht, inwieweit Satellitendaten eine verlässliche Grundlage zur Erfassung bewässerter Flächen und Wassermengen in der Schweiz bieten können. Die Anwendung wird dabei auf die gesamte Kantonsfläche von Schaffhausen, Thurgau und Zürich ausgeweitet.

Langfristig soll das Projekt zudem einen Beitrag zur nationalen Strategie leisten: Die gewonnenen Erkenntnisse zur Datenverfügbarkeit, Genauigkeit und Skalierbarkeit der Methode können eine Grundlage bilden für die Entwicklung eines schweizweiten Systems zur Erfassung des landwirtschaftlichen Wasserbezugs. Dabei soll geklärt werden, unter welchen Bedingungen und mit welchen ergänzenden Datengrundlagen satellitenbasierte Methoden einen Beitrag zur nationalen Erhebung von Wassernutzungsdaten leisten können.

2 Ziele

Das Projekt «Satellitenfernerkundung zur Erfassung bewässerter Flächen und Bewässerungsmengen in der Schweiz» verfolgt das Ziel, bestehende Fernerkundungsansätze zu validieren, methodisch zu verbessern und ihre Anwendbarkeit über das Pilotgebiet im Kanton Schaffhausen hinaus zu prüfen.

Konkret sollen die folgenden **vier Hauptziele** erreicht werden:

1. **Abschätzung der bewässerten Flächen und Bewässerungsmengen im Biber-tal (Kanton Schaffhausen)** über mehrere Jahre, basierend auf Satellitendaten und der Validierung mit kantonalen Daten zum Wasserbezug.
2. **Beurteilung der Eignung von Satellitendaten** zur Erfassung des landwirtschaftlichen Wasserbezugs in der Schweiz und Identifikation der Limitationen, insbesondere hinsichtlich der Erfassbarkeit verschiedener Kulturen, der Datenlücken infolge von Wolkenabdeckung sowie der begrenzten Genauigkeit bei kleinräumig strukturierten landwirtschaftlichen Flächen.
3. **Herausarbeitung von Anforderungen an ergänzende Datenquellen**, insbesondere zu Böden, Landnutzung, Bewässerungspraxis und Grundwasser, um die Methode schweizweit anwendbar zu machen.
4. **Formulierung von Empfehlungen**, wie der Ansatz auf weitere Kantone übertragen und in ein gesamtheitliches Konzept zur Erfassung des landwirtschaftlichen Wasserbezugs für alle landwirtschaftlichen Kulturen integriert werden könnte.

Das Projekt baut auf den Ergebnissen des Thurgau-Pilotprojekts (hydrosolutions GmbH, 2024) auf, erweitert dessen methodischen Rahmen und dient zugleich als Validierungsfall für die im *SwissIrrigationInfo*-Projekt (Agroscope 2025) modellierten Bewässerungsmengen. Die Kombination von satellitenbasierten Beobachtungen, kantonalen Entnahmedaten und Modellresultaten soll eine vernetzte Datengrundlage schaffen, auf deren Basis das BAFU die Eignung verschiedener Ansätze für eine nationale Umsetzung bewerten kann.

3 Studiengebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Gemeinden Hemishofen, Buch und Ramsen im Kanton Schaffhausen. Der als Perimeter Bibertal bezeichnete Raum umfasst rund 1'394 ha (Abbildung 1). Innerhalb dieses Perimeters liegen alle Flächen, die potenziell aus der Biber oder dem Rhein bewässert werden können. Rund 68,5 % der Gesamtfläche (etwa 955 ha) sind landwirtschaftliche Kulturf Flächen. Gemäss kantonaler Gesetzgebung sind Wasserentnahmen ausschliesslich aus Gewässern 1. Klasse zulässig – im Untersuchungsgebiet also aus der Biber und dem Rhein. Bewässerungen aus anderen Quellen (z. B. Trinkwasser) können nicht ausgeschlossen werden, sind gemäss Tiefbau Schaffhausen jedoch von geringer Bedeutung und erfolgen nur in ausserordentlich trockenen Jahren.

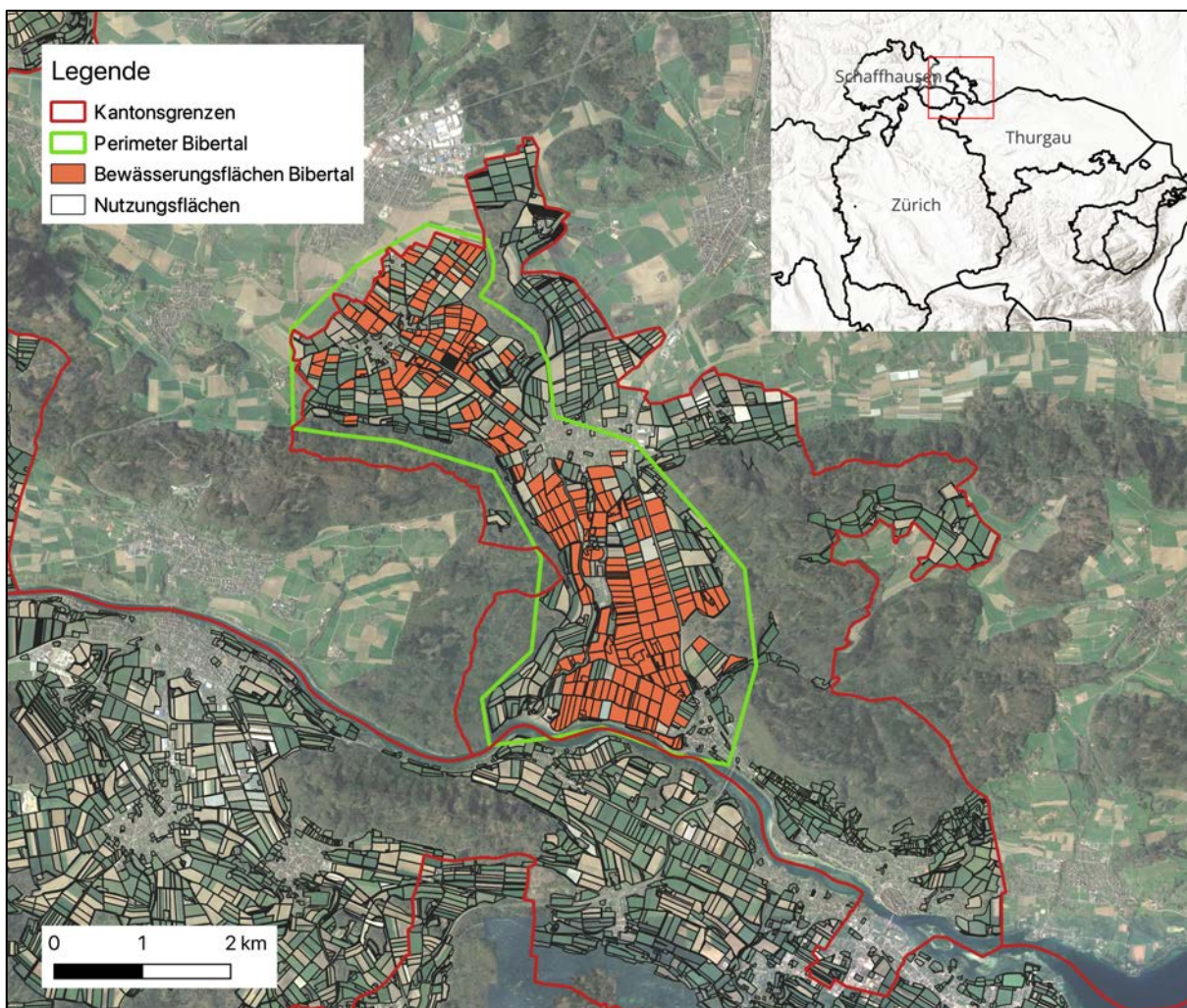


Abbildung 1. Das Bibertal im Kanton Schaffhausen. Der grün umrandete Perimeter zeigt das Gebiet, innerhalb dessen Kulturf lächen potenziell aus der Biber oder dem Rhein bewässert werden können. Die orange markierten Flächen („Bewässerungsflächen“) verfügen über eine Konzession zur Wasserentnahme aus der Biber oder dem Rhein. Hintergrund: Google Satellite.

3.1 Datenlage und Wasserentnahmen

Tiefbau Schaffhausen stellt mehrere Datengrundlagen bereit:

- Konzessionsflächen: Parzellen mit Konzession zur Wasserentnahme aus der Biber oder dem Rhein zur Bewässerung (vgl. Abbildung 1). Diese machen 45 % der Kulturläche innerhalb des Perimeters aus.
- Zeitreihen zum jährlichen Wasserbezug (2015–2024): Entnommene Wassermengen aus Biber und Rhein, getrennt nach Bewässerung und Frostschutz (Letztere betrifft grösstenteils Kartoffelkulturen mit Wasserentnahme aus Biber).
- Meldungen bei Unterschreitung der Restwassermenge in der Biber, mit Angaben zu Notbewässerung oder Entnahmestopp (gemäss Art. 32d Gewässerschutzgesetz; GSchG).

Im Bibertal werden regelmässig Wasserentnahmeeinschränkungen oder -stopps angeordnet – im Durchschnitt mindestens jedes zweite Jahr. In der Praxis ist die Korrelation zwischen den Entnahmebeschränkungen und dem tatsächlichen Bewässerungsbedarf jedoch komplex. So werden gemäss Tiefbau Schaffhausen bei Einschränkungen häufig Ausnahmegewilligungen für eine reduzierte Entnahme aus der Biber oder für zusätzliche Entnahmen aus dem Rhein erteilt. Ein vollständiger Bewässerungsstopp ist äusserst selten. Zudem können erhöhte Wassertemperaturen im Rhein – etwa zum Schutz der Äsche – zu temporären Einschränkungen führen. Entsprechend spiegelt der gemessene Wasserverbrauch nicht immer den effektiven Bewässerungsbedarf in Trockenjahren wider.

Tiefbau Schaffhausen bestätigt, dass im Bibertal sowohl **Rhein-** als auch **Biberwasser** für Bewässerung genutzt werden, jedoch keine kleinräumig aufgeschlüsselten Daten vorliegen. Offizielle Angaben zu den bewässerten Kulturen fehlen.

3.2 Landwirtschaftliche Nutzung

Die Flächennutzung basiert auf kantonalen Angaben zu den Nutzungsflächen, die im Rahmen der Landwirtschaftlichen Begriffsverordnung (LBV) und der Direktzahlungsverordnung (DZV) erhoben werden. Erfasst werden jeweils die Hauptkulturen, während Zweitkulturen (z. B. nach Winterweizen oder Winterraps) statistisch nicht ausgewiesen werden.

Gemäss kantonomer Statistik 2024 beträgt der Anteil der Gemüsebauflächen im Perimeter Bibertal 8,8 % der Kulturläche (etwa 84 ha), gefolgt von Kartoffeln (5,2 %). Weitere relevante Ackerkulturen sind Zuckerrüben (9,3 %) und Mais (13,0 %). Kunstwiesen machen 4,7 % aus, Spezialkulturen wie Beeren, Obst oder Reben lediglich 0,4 % (Tabelle 1, Abbildung 2).

Ergänzend wurden mithilfe multi-temporalen Satellitendaten (Sentinel-2 NDVI-Zeitreihen; siehe Kapitel 4.4) Zweitkulturen identifiziert, die im Juli oder August auf

Winter-Hauptkulturen folgen. Diese Analysen zeigen, dass im Jahr 2024 rund 17 % der Kulturläche innerhalb des Perimeters als Zweitkulturlächen genutzt wurden.

In der Tabelle 1 sind die im Bibertal häufig vorkommenden Kulturen nach ihrer Bewässerungswürdigkeit gemäss Leitfaden Bewässerung (BLW 2024) aufgelistet. Kulturen gelten als *bewässerungswürdig*, wenn die vermeidbaren Ertragsausfälle durch Bewässerung die Bewässerungskosten übersteigen. Die Beurteilung erfolgt kultur- und standortabhängig. Im Leitfaden werden bewässerungswürdige Freilandkulturen in zwei Kategorien unterteilt, die für die Dimensionierung von Bewässerungsanlagen relevant sind:

- **Kategorie I:** Kulturen, die grundsätzlich bei der Dimensionierung einer Bewässerungsanlage berücksichtigt werden (z. B. Gemüse, Kartoffeln, Beeren, Obst).
- **Kategorie II:** Kulturen, die nur dann berücksichtigt werden, wenn ein nachvollziehbarer Nachweis ihrer Bewässerungswürdigkeit vorliegt, etwa durch standortspezifische Ertragsanalysen (z. B. Mais, Zuckerrüben, Wiesen).

Tabelle 1: Nutzungsflächen im Perimeter Bibertal 2024 nach Bewässerungswürdigkeit gemäss BLW (2024) und kantonaler Flächenerhebung. Der Anteil an der Gesamtfläche bezieht sich auf die gesamte Kulturläche innerhalb des Perimeters Bibertal im Jahr 2024 (955 ha).

Kategorie I gemäss Leitfaden Bewässerung	Kategorie I gemäss Nutzungsflächen im Bibertal	Fläche (2024)	Anteil an Gesamtfläche
Gemüse	Einjährige Freilandgemüse; Freiland-Konservegemüse; Spargel	84 ha	8,8 %
Kartoffeln	Kartoffeln	49 ha	5,2 %
Zweitkulturen	Folgen auf Winterraps; Winterweizen; Wintergerste	163 ha	17,0 %
Sonstige	Mehrfährige Beeren; Obstanlagen (Äpfel, Steinobst); Reben	4 ha	0,4 %
Kategorie II gemäss Leitfaden Bewässerung	Kategorie II gemäss Nutzungsflächen		
Zuckerrüben	Zuckerrüben	89 ha	9,3 %
Mais	Körnermais, Silo- und Grünmais	124 ha	13,0 %
Wiese / Grassland	Kunstpiesen	45 ha	4,7 %
Sonstige	Soja	9 ha	0,9 %

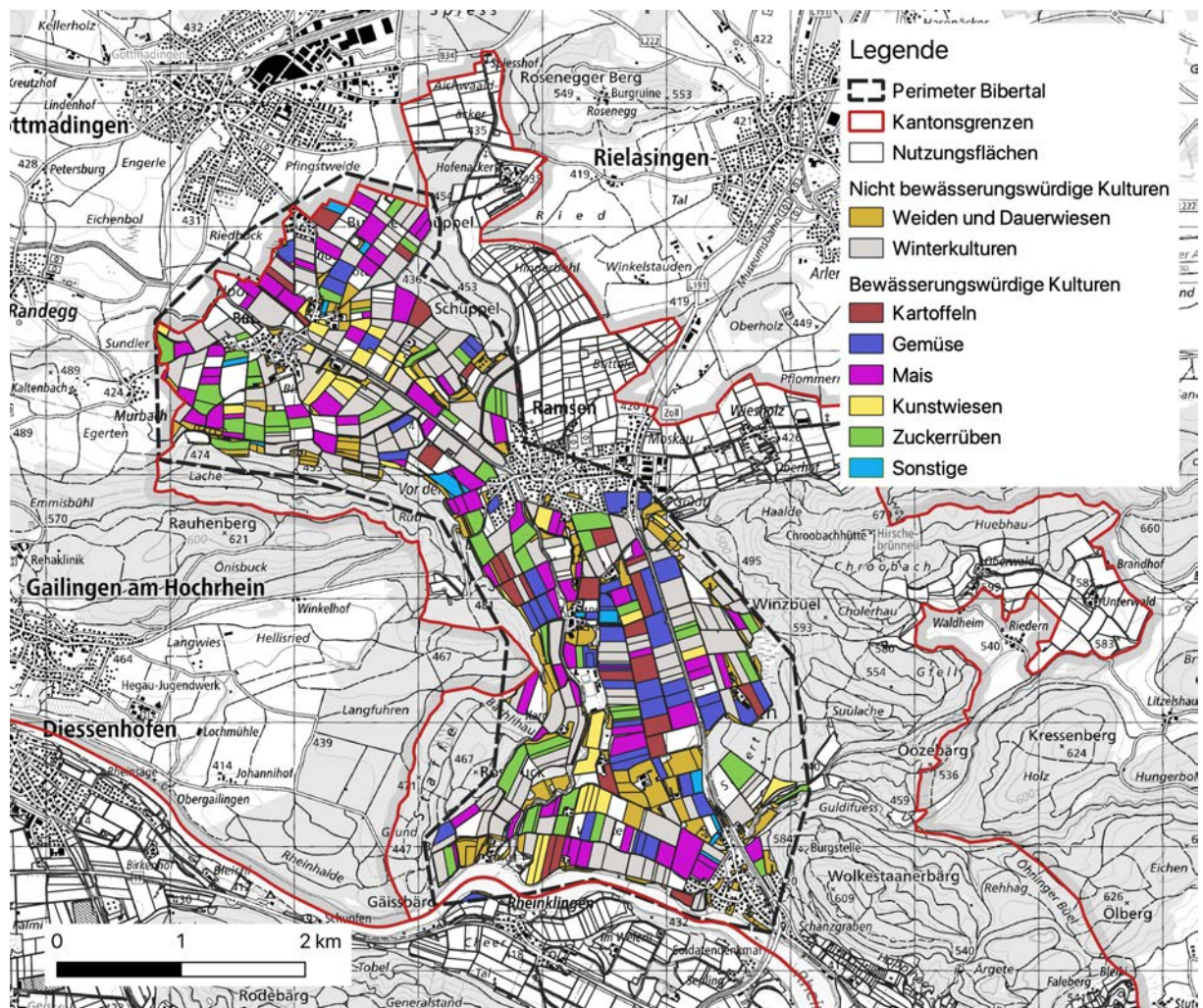


Abbildung 2. Kulturlächen bewässerungswürdiger sowie der wichtigsten nicht-bewässerungswürdigen Kulturen innerhalb des Perimeters Bibertal. Dargestellt sind die Hauptkulturen gemäss den Nutzungsflächen 2024. Basiskarte: swisstopo.

4 Vorgehensweise und Datengrundlage

4.1 Methode der Pilotstudie Thurgau

Die für den Kanton Thurgau entwickelte Methode zur Erfassung bewässerter Flächen (hydrosolutions GmbH 2024) basiert auf der Analyse **satellitenbasierter Evapotranspirationsdaten** (Abbildung 3; siehe Kapitel 4.3) in Kombination mit **Landnutzungsinformationen** (Kapitel 4.4). Die Evapotranspiration (ET) ist die Menge an Wasser, die durch Verdunstung und Transpiration von einer Oberfläche entfernt wird. Der Wasserverbrauch der Pflanzen wird durch die Analyse der räumlichen Verteilung von ET in einen Bewässerungsanteil (ET_{blue}) und einen Regenwasseranteil (ET_{green}) getrennt (Karimi et al. 2019).

Über nicht-bewässerten Flächen ist ET gleichbedeutend mit ET_{green}. Die Annahme ist, dass sich der ET_{green}-Wert für verschiedene Kulturen in derselben Umgebung unter wasserlimitierten Bedingungen nicht grundlegend unterscheidet, da diesen Kulturen die gleiche Menge an Regenwasser zur Verfügung steht. Über bewässerten Flächen ist der ET-Wert jedoch höher, da ET zusätzlich einen Anteil an ET_{blue} umfasst. Durch die Analyse der räumlichen Verteilung von ET wird eine einfache Wasserbilanz entschlüsselt:

$$ET_{blue} = ET - ET_{green}$$

Felder mit einem ET_{blue} Wert grösser als Null weisen demnach auf bewässerte Flächen hin.

Für die Abschätzung von ET_{green} werden nicht bewässerungswürdige Dauerkulturen, beispielsweise Weiden, gemäss jährlichen Nutzungsflächen herangezogen. Die Berechnung von ET_{green} erfolgt in **dekadalen (10-Tage) Intervallen** während der Vegetationsperiode von Mai bis September. Anschliessend wird auf Pixelebene die Differenz zwischen ET und ET_{green} berechnet, um die zusätzliche Verdunstung infolge der Bewässerung (ET_{blue}) zu bestimmen. Die resultierenden Werte werden auf Feldebene aggregiert, indem für jedes Nutzungsflächenpolygon der Medianwert der enthaltenen 30-m-Pixel pro Dekade berechnet wird. Nur Freilandkulturen, die gemäss dem Leitfaden Bewässerung (BLW, 2024) als bewässerungswürdig gelten, werden bei der Kartierung berücksichtigt. Zur Klassifikation der bewässerten Flächen wurde ein monatlicher Schwellenwert auf die Differenz ET – ET_{green} angewendet, um zwischen Störsignalen (Lärm) und tatsächlichen Signalen zu unterscheiden und so bewässerte Flächen zu identifizieren.

Die Validierung der Methode erfolgte durch den Vergleich mit Bodenmessungen aus den Jahren 2018-2021 in der Region Broye (Kantone Freiburg und Wadt), wobei präzise Bewässerungsdaten von Kartoffelfeldern aus dem Messnetz der Gruppe Ackerbau und Pflanzenzüchtung der [HAFL Zollikofen](#) vorlagen. Diese Daten, die im Rahmen des Projekts [Bewässerungsnetz](#) erfasst wurden, dienten dazu, die Genauigkeit der Satellitenschätzungen zu überprüfen. Die Analyse ergab, dass die mittlere jährliche Abweichung der geschätzten von der tatsächlich bewässerten Gesamtfläche lediglich zwischen 7,6 % und

20,1 % betrug. Die Satellitenprodukte konnten die tatsächlichen Bewässerungsflächen jedoch nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 57 – 64 % identifizieren. Die Resultate ergaben demnach, dass die Methode zur punktgenauen Identifizierung einzelner bewässerter Flächen noch nicht geeignet ist. Die Verwendung von ETblue-Werten aus den Satellitendaten ermöglichte dennoch eine plausible Schätzung der Gesamtbewässerungsflächen, da die regionalen ETblue-Werte mit den vorherrschenden Trockenheitsbedingungen korrelierten.

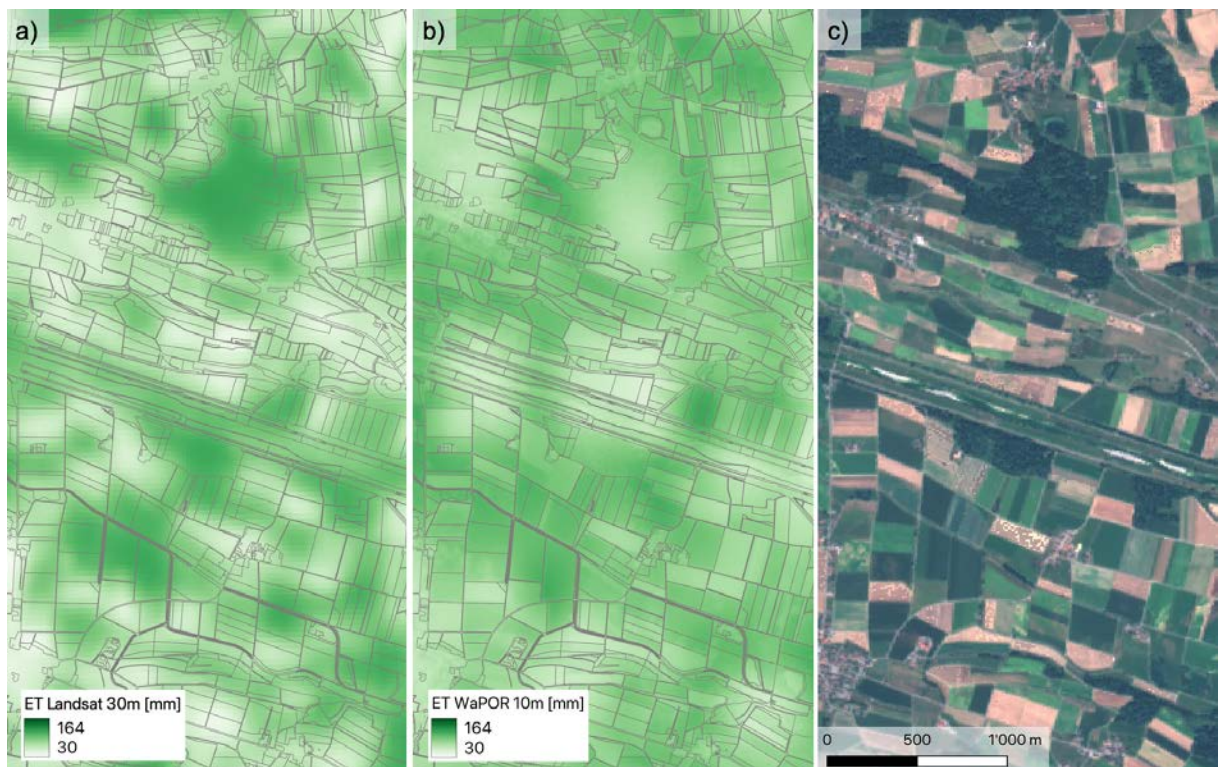


Abbildung 3: Vergleich der modellierten Evapotranspiration im August 2022 in der Region Frauenfeld. a) Monatliche Summe der Evapotranspiration gemäss dem Landsat-Produkt. b) Monatliche Evapotranspiration gemäss dem WaPOR-Produkt. In beiden Karten sind die Grenzen der landwirtschaftlichen Nutzungsflächen in Grau dargestellt. c) Optisches Satellitenbild (Sentinel-2 RGB, 1. August 2022) desselben Gebiets.

4.2 Weiterentwicklung der Methode mit maschinellem Lernen

In der für den Kanton Thurgau entwickelten und bisher angewandten Methode wurden die Referenzflächen zwar für jede Gemeinde im Kanton auf Basis der jeweiligen lokalen Nutzungsflächen separat bestimmt, innerhalb der Gemeinden jedoch räumlich konstante ETgreen-Werte angenommen. Die Methode weist Einschränkungen bei der Erkennung von Bewässerungsflächen in heterogenen landwirtschaftlichen Gebieten auf, insbesondere in kleinräumigen Strukturen, wie sie in der Schweiz typisch sind.

Als Weiterentwicklung der Methode wird in der vorliegenden Studie zur Modellierung von ETgreen (Abbildung 4) ein Ansatz des maschinellen Lernens mit dem Algorithmus **Random Forest** verwendet. Dieser Ansatz ermöglicht es, räumliche und biophysikalische

Zusammenhänge zwischen Umweltfaktoren und der Verdunstung über unbeeinflussten Flächen zu erfassen und so ETgreen präziser abzuschätzen.

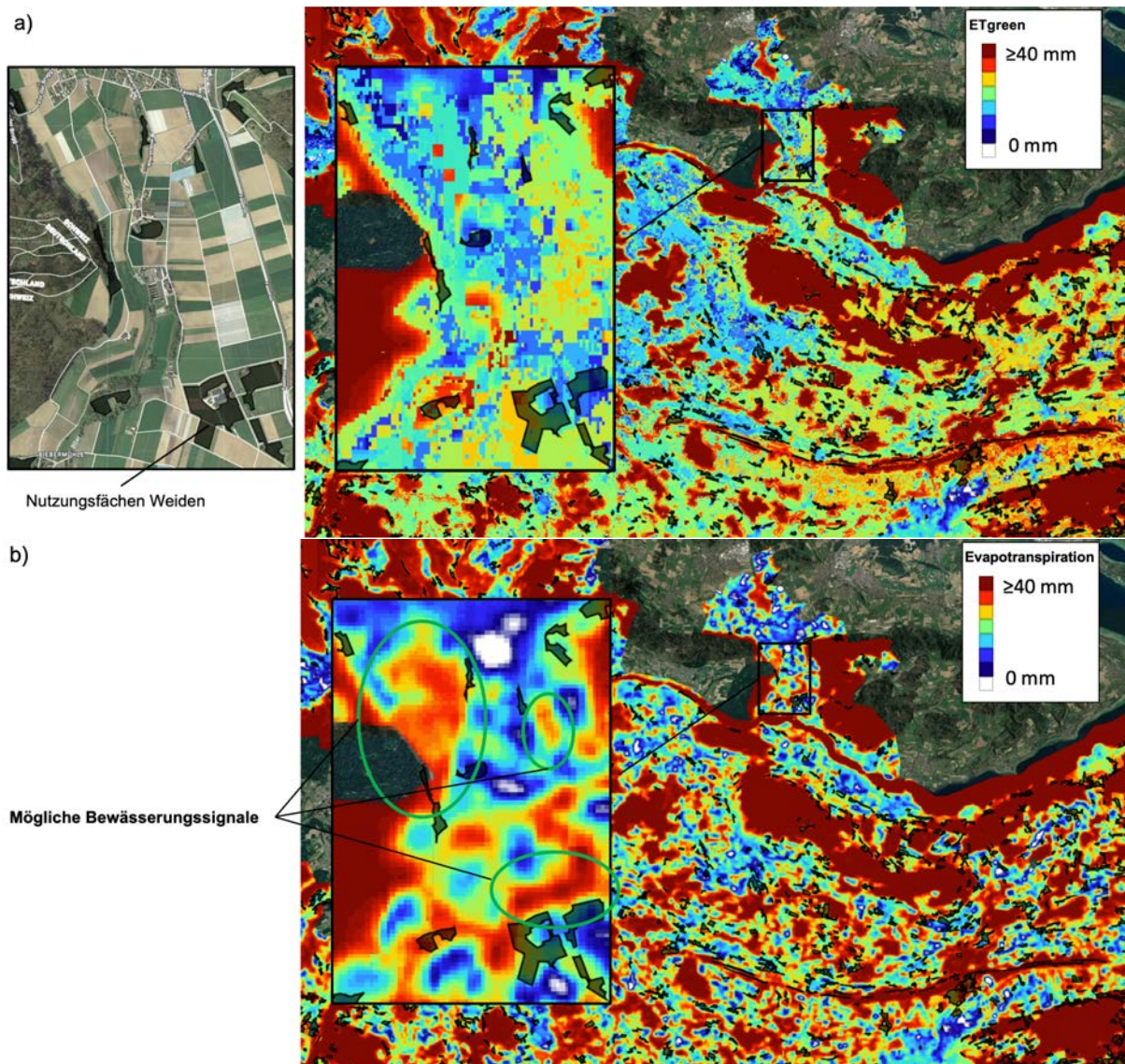


Abbildung 4. Beispiel: Vergleich der modellierten ETgreen- (a) und ET- (b) Werte für die dritte Augustdekade 2023 (21.–31. August) im Raum Bibertal. Die vergrößerten Kartenausschnitte verdeutlichen den Vergleich zwischen der tatsächlichen Evapotranspiration (ET), welche den gesamten Wasserverbrauch der Kulturen widerspiegelt, und der modellierten, ausschliesslich niederschlagsgetriebenen Verdunstung (ETgreen). Bereiche, in denen ET deutlich höher ist als ETgreen, können als mögliche Bewässerungssignale interpretiert werden. Basiskarte: Google Satellite.

Für die Modellierung von ETgreen wurden unter anderem folgende Datensätze verwendet, um die relevanten Umweltfaktoren abzubilden:

- **Digitales Höhenmodell (DHM):** Hangneigung, Exposition und Höhe
- **Räumliche Autokorrelation:** X- und Y-Koordinaten als räumliche Prädiktoren
- **Bodenhinweiskarte:** Ton-, Schluff- und Sandanteil, organischer Kohlenstoff (SOC), Kationenaustauschkapazität (CECpot) in 0–30 cm Tiefe
- **Niederschlagsdaten:** laufende Summe von täglichen Niederschlagsdaten zur Beschreibung der aktuellen Feuchtigkeitsbedingungen

Diese Datensätze stehen für die ganze Schweiz mit einer räumlichen Auflösung von mindestens 90 Metern (Ausnahme: Niederschlagsdaten mit 1000 Metern) zur Verfügung. Eine genaue Vorstellung der einzelnen Datensätze erfolgt in Kapitel 4.5. Das trainierte Modell nutzt diese räumlichen Daten, um für jedes Pixel den zu erwartenden ETgreen-Wert unter nicht-bewässerten Bedingungen zu bestimmen. Diese modellierten Werte bilden die Referenz für die Ableitung von ETblue.

Die Methode wird nicht nur auf das Bibertal, sondern von Anfang an auch auf die drei Kantone Schaffhausen, Zürich und Thurgau angewendet. Das Bibertal liegt im Grenzgebiet dieser drei Kantone (Abbildung 1). Durch die Ausweitung der Trainingsdaten auf das gesamte Kantonsgebiet der drei Kantone stehen jährlich zwischen 5000 und 6500 nicht bewässerungswürdige Dauerkulturen – Dauerwiesen und Weiden gemäss Landnutzungsflächen – als Referenzflächen zur Verfügung (Abbildung 5), um für das maschinelle Lernen auf eine robuste und vielfältige Datenbasis zugreifen zu können.

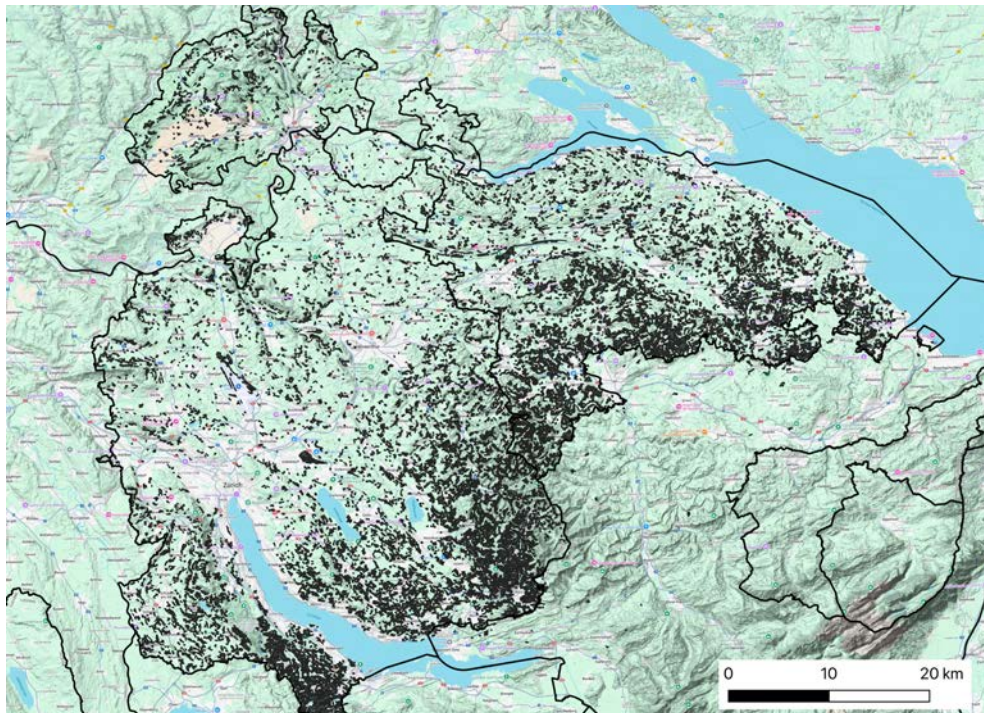


Abbildung 5. Verteilung der als Referenzflächen genutzten Weiden und Dauerwiesen in den Kantonen Schaffhausen, Zürich und Thurgau, Jahr 2024. Diese nicht-bewässerungswürdigen Dauerkulturen dienen als Trainingsdaten zur Modellierung der ETgreen-Werte im Rahmen des maschinellen Lernens. Für das Sampling im Random-Forest-Algorithmus werden die Trainingsdaten (30-m-Pixelwerte) zufällig innerhalb der jeweiligen Referenz-Polygone ausgewählt. Insgesamt werden 10000 Stichproben berücksichtigt, gleichmässig über ein 10×10 km-Raster verteilt, um eine räumlich ausgewogene Repräsentation der Trainingsdaten zu gewährleisten und eine Übergewichtung von Regionen mit vielen Referenzflächen (z. B. im Zürcher Oberland) zu vermeiden. Mehr Informationen dazu im Anhang 1. Basiskarte: Google Terrain.

Als methodische Weiterentwicklung werden die vom Bundesamt für Statistik (BFS) für das Jahr 2023 publizierten Hochrechnungen zu den bewässerten Flächenanteilen einzelner Kulturen in der Schweiz berücksichtigt (BFS 2024). Gemäss diesen Angaben werden von Zuckerrüben rund 4 %, von Kunstwiesen 1 % und von Mais 1 % der bewirtschafteten Fläche bewässert. Für den überwiegenden Teil dieser Kulturen – insbesondere in den Kantonen Schaffhausen, Zürich und Thurgau – kann daher davon ausgegangen werden,

dass die tatsächliche Evapotranspiration (ET) den nicht-bewässerten Bedingungen (ETgreen) entspricht. Einzelne bewässerte Parzellen innerhalb dieser Kulturgruppen zeigen in den satellitenbasierten ET-Daten erhöhte Werte, die als Ausreisser gelten und das Modelltraining verzerren könnten. Um deren Einfluss zu reduzieren, werden die obersten 2 % der ET-Werte vor dem Training ausgeschlossen. Der Random-Forest-Algorithmus gewährleistet eine robuste Schätzung gegenüber verbleibenden Ausreissern. Anschließend werden die ETgreen-Werte für jede Dekade jeweils viermal separat modelliert, wobei jeweils Zuckerrüben, Kunstwiesen, Mais oder Weiden als Referenzflächen verwendet werden. Für Kulturen mit einem gemäss BFS hohen Bewässerungsanteil – insbesondere Beeren (67 %), Gemüse (64 %) und Kartoffeln (44 %) – werden weiterhin ausschliesslich Weiden als Referenzflächen eingesetzt.

ETgreen von tiefwurzelnden Kulturen wie Obstanlagen (56 % bewässert gemäss BFS) und Rebanlagen (19 %) wird in der vorliegenden Studie nicht modelliert, da keine geeigneten nicht-bewässerten Referenzflächen verfügbar sind. Diese Kulturen kommen im Bibertal jedoch praktisch nicht vor und demnach konnte die vorliegende Methode auch nicht dahingehend weiterentwickelt werden. Wir empfehlen, separate Studien zur Entwicklung der Abschätzung der Bewässerungsmengen mit dafür geeigneten Daten durchzuführen oder in Zusammenarbeit mit Wein-, Obst- und Beerenproduzenten.

Um den Einfluss der Bewässerung von natürlichen Schwankungen der Vegetationsentwicklung zu unterscheiden, werden zusätzlich für jeden Zeitpunkt und jedes Pixel **ETa/ETc-Verhältnisse** berechnet. Das Verhältnis ETa/ETc beschreibt den Anteil der tatsächlich gemessenen Evapotranspiration (ETa) zur potenziellen Referenzverdunstung (ETc). Werte nahe 1 deuten auf optimale, nicht wasserlimitierte Bedingungen hin, während deutlich tiefere Werte auf Wasserstress hinweisen. Da satellitenbasierte ET-Produkte zwar Daten zum ETa/ETc-Verhältnis liefern (Kapitel 3.3), diese aber sowohl bewässerte als auch unbewässerte Flächen enthalten, wird wiederum ein Modell benutzt, das den typischen Trockenstress unter nicht-bewässerten Bedingungen beschreibt. Zu diesem Zweck wird der Random-Forest-Algorithmus mit ETa/ETc-Verhältnissen auf Referenzflächen trainiert, die sicher nicht bewässert werden (z.B., Weiden). Das trainierte Modell erfasst die biophysikalischen Zusammenhänge zwischen Umweltfaktoren und Trockenheit und wird anschliessend verwendet, um die ETa/ETc-Verhältnisse für alle übrigen, potenziell bewässerten Kulturflächen zu modellieren. So kann für jedes Pixel und jeden Zeitpunkt abgeschätzt werden, ob sich eine Fläche unter Trockenstress befindet oder über ausreichende Wasserverfügbarkeit verfügt. In der weiterentwickelten Methode wird ein ETa/ETc-Schwellenwert angewendet: Pixel mit modellierten Werten über diesem Schwellenwert gelten als nicht wasserlimitiert und werden bei der Identifizierung bewässerter Flächen ausgeschlossen.

Weitere technische Details zur Implementierung und zu den Modellparametern sind in Anhang 1 erläutert. Eine schematische Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte der Methode ist in Abbildung 6 dargestellt.

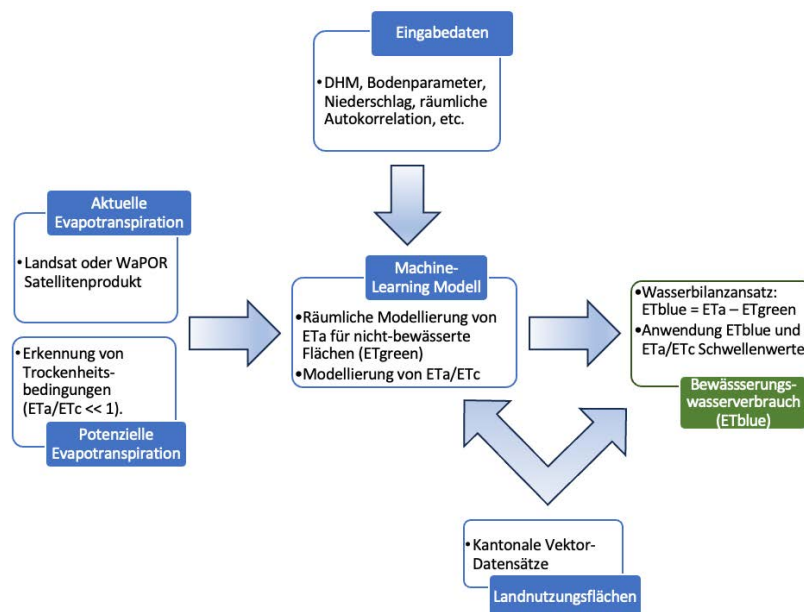


Abbildung 6. Schematische Darstellung der methodischen Arbeitsschritte zur Bestimmung des Bewässerungswasserverbrauchs (ETblue). Das Diagramm zeigt die Abfolge von der Erfassung der Landnutzungsflächen über die Berechnung der aktuellen und potenziellen Evapotranspiration bis zur Modellierung mittels maschinellen Lernens und der Ableitung von ETblue.

4.3 Satellitendaten

Unsere Methodik basiert auf der Auswertung von satellitenbasierten Evapotranspirationsdaten. In der Thurgau-Studie wurden zwei globale ET-Produkte verwendet:

- **Landsat Provisional Actual Evapotranspiration Science Product (USGS)**¹: 30 Meter räumliche und 8-tägige zeitliche Auflösung.
- **FAO WaPOR**² **Version 3.01**: 300 Meter Auflösung, dekadische Zeitauflösung, auf 10 Meter skaliert mit optischen Sentinel-2-Daten.

Beide Produkte nutzen multispektrale und thermische Satellitendaten, um die Evapotranspiration (ET) zu quantifizieren. Die Analyse der thermalen Infrarotstrahlung erlaubt Rückschlüsse auf den Energiehaushalt der Oberfläche, da Verdunstung die Oberflächentemperatur abkühlt. Unterschiede in den Modelltypen sowie in der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Datensätze (Tabelle 2) können zu signifikanten Abweichungen zwischen den Produkten führen (Abbildung 3). Unterschiede zwischen den Produkten sind auch auf der Handhabung von Datenlücken zurückzuführen. Das WaPOR-Produkt schliesst Datenlücken durch eine Kombination aus zeitlicher und räumlicher Interpolation. Fehlende Beobachtungen infolge von Wolken oder Sensorlücken werden mithilfe von Glättungsverfahren und der Nutzung benachbarter Pixel und Zeitstufen rekonstruiert. In dem Landsat Produkt hingegen sind Datenlücken nicht geschlossen. Bei bewölkten Bedingungen sind keine Daten verfügbar.

Aufgrund der grösseren Wellenlänge im Infrarotbereich und der technischen Limitationen der Sensoren, ist die räumliche Auflösung von Datenprodukten aus dem

¹ <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-provisional-actual-evapotranspiration-science-product>

² <https://data.apps.fao.org/wapor>

Infrarotbereich niedriger als aus dem optischen Bereich (Tabelle 2). Bei Landsat beträgt die Auflösung im Infrarotbereich typischerweise 100 Meter, verglichen mit 30 Metern in den optischen Bandbreiten. Für das Landsat-ET-Produkt werden zusätzlich zu den Infrarotdaten auch optische Daten zur Aufbereitung und Interpolation herangezogen, was eine Harmonisierung der Daten auf 30 Meter ermöglicht. Das WaPOR-Produkt weist hingegen eine geringere native Auflösung von 300 Metern auf. In der Thurgau-Studie wurde dieses Produkt daher mittels optischer Sentinel-2-Daten auf 10 Meter runter skaliert, um eine feinere räumliche Differenzierung zu ermöglichen (Onačillová et al. 2022).

Aus dem Landsat-Produkt wurden **dekadische (10-Tage) Composites** gebildet, da die Auswertung in dieser Studie mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Tagen erfolgt. Dabei wird der Durchschnitt aller verfügbaren ETa-Werte pro 10-Tages-Periode gebildet. Dies reduziert den Einfluss einzelner bewölkter Szenen und führt zu einer möglichst gleichmässigen zeitlichen Abdeckung.

Tabelle 2. Eigenschaften der verfügbaren multi-temporalen ET Produkte.

Eigenschaft	Landsat Collection 2 (C2) Provisional Actual ET (USGS)	FAO WaPOR Version 3.01
Räumliche Auflösung	30 Meter	300 Meter (skaliert auf 10 Meter mit Sentinel-2)
Zeitliche Auflösung	4-8 Tage	10 Tage (dekadisch)
Modelltyp	Energiebilanzmodell (SSEBop)	FAO-ETLook Modell
Primäre Satellitenquellen	Landsat 7, 8, 9	MODIS, PROBA-V, Sentinel-2
Räumliche Auflösung des Thermal IR Sensors	60 Meter (Landsat 7 ETM+); 100 Meter (Landsat 8-9 TIRS)	1000 Meter (MODIS, PROBA-V)
Datenlücken-Behandlung	Keine Interpolation, Wolken führen zu fehlenden Werten	Kombination aus zeitlicher und räumlicher Interpolation (Whittaker-Smoother)
Potentielle Evapotranspiration (ETc)	Band zu ETa/ET ₀ für Referenzgras (reference grass)	Band zu Referenz-Evapotranspiration
Vorteile	Hohe räumliche Detailgenauigkeit	Vollständige Zeitreihe, robuste Abdeckung auch bei Wolken
Limitationen	Empfindlich gegenüber Wolken	Geringere räumliche Auflösung, Unsicherheiten bei der Schliessung von Datenlücken

Die Validierung der beiden Produkte erfolgte mithilfe von Lysimeter-Messungen in Rietholzbach, Kanton Sankt Gallen (Hirschi et al. 2017) und FluxNet-Daten aus Oensingen, Solothurn (Warm Winter 2020 Team and ICOS Ecosystem Thematic Centre 2022), wie sie im Thurgau-Bericht detailliert beschrieben sind. Die Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessener und modellierter Evapotranspiration, wobei WaPOR tendenziell leicht höhere Werte liefert. Insgesamt bestätigen die Vergleiche, dass beide Produkte für die Identifizierung von Bewässerung geeignet sind, wobei WaPOR eine

höhere zeitliche Konsistenz, das Landsat-Produkt jedoch eine höhere räumliche Präzision bietet. Eine grafische Darstellung der Validierungsergebnisse ist in Anhang 2 enthalten.

Die potenzielle Evapotranspiration (ET_c) dient als Referenzgrösse zur Berechnung der ET_a/ET_c-Verhältnisse. Das vom Landsat-Produkt verwendete Energiebilanzmodell stellt für jedes Satellitenbild und jedes Pixel ein Band mit dem ET_a/ET_c-Verhältnis bereit (Referenz Alfalfa-Gras; mehr Informationen dazu in Anhang 1). Auch im WaPOR-Datensatz steht die Referenz-Evapotranspiration (ET_o) zur Verfügung, sodass ET_c und ET_a/ET_c für jedes Pixel und jede 10-Tages-Periode berechnet werden können.

4.4 Landnutzungsflächen

Aktuelle Nutzungsflächen aus dem Jahr 2024 können über geodienste.ch heruntergeladen werden. Unter geodienste.ch bieten die Kantone Geobasisdaten an. Das Angebot umfasst schweizweite, strukturell harmonisierte und aggregierte Geodaten. Die Nutzungsflächen früherer Jahre konnten über die zuständigen Anlaufstellen der Kantone Zürich, Schaffhausen und Thurgau bestellt werden (Schaffhausen: Amt für Geoinformation, Zürich: Amt für Landschaft und Natur - Abteilung Landwirtschaft; Thurgau: ThurGIS Geodaten Shop). Allerdings wurden die Nutzungsflächen von 2017 und früheren Jahren von den Kantonen nur unzureichend geometrisch erfasst. Obwohl im Bibertal Wasserbezugsdaten aus den Jahren 2015 bis 2017 vorliegen, kann unsere Methode somit nur auf die **Jahre 2018 bis 2024** angewendet werden.

Die Nutzungsflächen wurden mit den Informationen zur Nutzungsart verknüpft, sodass für jedes Feld die Hauptnutzung des jeweiligen Jahres bekannt ist. Felder der in Tabelle 3 aufgeführten Kategorien wurden als nicht bewässert betrachtet und bilden die Referenzkultur Weiden. Für die Kartierung der bewässerten Flächen werden die Nutzungskategorien Gemüse, Kartoffeln, Mais, Zuckerrüben, Grünland und Sonstige berücksichtigt. Als Sonstige gelten weitere Freilandkulturen, die gemäss dem Leitfaden Bewässerung (BLW 2024) als bewässerungswürdig gelten (Beeren, Soja und Tabak). Die Referenzkultur Weiden dient der Berechnung des Regenwasserverbrauchs von Gemüse, Kartoffeln und Sonstige (Tabelle 4). Für die weiteren Nutzungskategorien (Grünland, Mais und Zuckerrüben) wird der Regenwasserverbrauch direkt auf Basis der ET-Werte über den jeweiligen Nutzungsflächen modelliert (siehe Kapitel 3.2).

Tabelle 3: Kategorien der Nutzungsflächen, die als nicht bewässerte Referenzkulturen verwendet werden.

Nicht-bewässerte Referenzkulturen

Extensiv genutzte Weiden
Weiden (Heimweiden, übrige Weiden ohne Sömmerungsweiden)
Übrige Dauerwiesen
Extensiv genutzte Wiesen
Übrige Grünfläche (Dauergrünfläche)

Gemüse wird häufig als Zweitkultur angebaut. Die Nutzungsflächen enthalten jedoch nur Informationen zur jeweiligen Hauptkultur. Daher wird die Analyse der Nutzungsflächen

durch eine Untersuchung der Vegetationsperiode ergänzt, die auf dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) basiert. Dieser Index wird aus Sentinel-2-Satellitenbildern mit einer räumlichen Auflösung von 10 Metern gewonnen. Der NDVI ermöglicht es, Veränderungen der Vegetation über die Zeit zu verfolgen, indem er alle fünf Tage erfasste spektrale Daten auswertet (Abbildung 20). Die Reflexionswerte aus dem nahen Infrarot und dem roten Band werden genutzt, um NDVI-Werte zu berechnen, die anschliessend mittels harmonischer Regression zu detaillierten NDVI-Profilen verarbeitet werden. Wenn ein Feld zwei Vegetationsperioden aufweist, die zwischen Juli und September beginnen, wird die zweite Vegetationsperiode bei der Kartierung bewässerter Flächen berücksichtigt, unabhängig davon, welche Hauptkultur für die jeweilige Nutzungsfläche angegeben wurde.

Tabelle 4. Zuteilung der Nutzungsarten gemäss kantonalen Nutzungsflächen zu den Nutzungskategorien und den jeweils verwendeten Referenzkulturen für die Modellierung von ETgreen. Die Tabelle fasst die agronomischen Kategorien zusammen, die in der Analyse berücksichtigt werden. "Weiden" als Referenzkultur umfasst die in Tabelle 3 aufgelisteten Nutzungskategorien.

Nutzungs-kategorie	Nutzungsarten gemäss Nutzungsflächen	Referenzkultur für die Modellierung von ETgreen
<i>Gemüse</i>	Einjährige Freilandgemüse (ohne Konservengemüse); Freiland-Konservengemüse; Spargel; Ölkürbisse; Rhabarber; Mehrjährige Gewürz- und Medizinalpflanzen; Einjährige gärtnerische Freilandkulturen; Mehrjährige gärtnerische Freilandkulturen (nicht im Gewächshaus); Zweitkulturen nach Wintergetreide	Weiden
<i>Kartoffeln</i>	Kartoffeln; Pflanzkartoffeln	Weiden
<i>Grünland</i>	Kunstwiesen (ohne Weiden)	Kunstwiesen (ohne Weiden)
<i>Zuckerrüben</i>	Zuckerrüben	Zuckerrüben
<i>Mais</i>	Silo- und Grünmais; Körnermais; Saatmais (Vertragsanbau)	Mais
<i>Sonstige</i>	Einjährige Beeren (z. B. Erdbeeren); Mehrjährige Beeren; Tabak, Soja	Weiden

4.5 Eingabedaten für das maschinelle Lernmodell

Für die Modellierung von ETgreen und den Trockenheitsbedingungen werden verschiedene Zusatzdatensätze verwendet, die räumliche, topographische, klimatische und bodenphysikalische Eigenschaften abbilden (Tabelle 5). Diese Informationen helfen, die räumliche Heterogenität der Verdunstung und die Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt präzise zu erfassen.

Digitales Höhenmodell (DHM)

Das digitale Höhenmodell Copernicus DEM GLO-30 liefert Informationen über Höhe, Hangneigung und Exposition. Diese Parameter beeinflussen die Strahlungsbilanz, die Lufttemperatur und den Abfluss, was sich direkt auf die Verdunstung und den

Wasserverbrauch der Vegetation auswirkt. Steilere oder südexponierte Hänge weisen häufig höhere potenzielle Verdunstungsraten auf.

Bodenhinweiskarte

Die Bodenparameter – Ton-, Schluff- und Sandanteil, organischer Kohlenstoff (SOC) und Kationenaustauschkapazität (CEC_{pot}) – bestimmen das Wasserhaltevermögen und die Durchlässigkeit des Bodens. Diese Faktoren beeinflussen, wie viel Wasser für Pflanzen verfügbar bleibt, und sind daher zentral für die Modellierung von ET_{green} sowie für die Einschätzung der Trockenheitsanfälligkeit.

Tabelle 5. Übersicht der im maschinellen Lernmodell verwendeten Zusatzdatensätze mit Quellenangaben, räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Datensatz	Quelle	Räumliche Auflösung	Auflösung	Zeitliche Auflösung / Jahr
<i>Digitales Höhenmodell</i>	Copernicus DEM GLO30	30 m		Statisch (Erscheinungsjahr 2019)
<i>Bodenhinweiskarte</i>	Kompetenzzentrum Boden	90 m		Statisch (Erscheinungsjahr 2023)
<i>RhiresD Niederschlagsdaten</i>	MeteoSchweiz	1000 m		Täglich
<i>Waldnähe</i>	Swisstopo (swiss-TLM3D, 2023)	identisch zu Rasterauflösung		Statisch (2023)
<i>Vegetationsperiode (NDVI)</i>	Sentinel-2 (ESA)	10 m		5 Tage (2018–2024)
<i>Räumliche Autokorrelation (X, Y-Koordinaten)</i>	Abgeleitet aus Pixel-Geometrie	identisch zu Rasterauflösung		Statisch

RhiresD Niederschlagsdaten

Die täglichen Niederschlagsdaten des Produkts *RhiresD* (MeteoSchweiz) werden zu dekadischen Summen aggregiert, um die Wasserzufuhr aus Niederschlag über jeweils zehn Tage darzustellen. Für die Modellierung ist dabei insbesondere das räumliche Muster der Niederschläge relevant: Wenn die räumliche Verteilung des Niederschlags mit den Mustern von ET_{green} korreliert, wird dieser Zusammenhang im Modell erfasst und trägt zur verbesserten Schätzung des Regenwasserverbrauchs bei.

Waldnähe

Der Abstand zu Waldflächen wird berücksichtigt, da in der Nähe von Waldrändern der sogenannte Mixed-Pixel-Effekt auftreten kann: Aufgrund der groben Auflösung der Thermalen-Infrarot-Sensoren wird die Oberflächentemperatur in Waldnähe tendenziell unterschätzt, was zu einer Überschätzung der Evapotranspiration führen kann. Die Waldnähe dient somit der Korrektur solcher Messverzerrungen.

Vegetationsperiode (NDVI-basierte Layer)

Aus NDVI-Zeitreihen wird der Beginn und das Ende der Vegetationsperiode für jedes Feld abgeleitet. Diese Informationen sind relevant, da der Wasserverbrauch stark von der Wachstumsphase abhängt. Früh oder spät gesäte Kulturen (z. B. Mais oder Zuckerrüben)

unterscheiden sich deutlich in ihrem saisonalen Wasserbedarf. Diese Layer helfen, die zeitliche Dynamik der Verdunstung präziser zu modellieren.

Räumliche Autokorrelation (X- und Y-Koordinaten)

Diese Variablen dienen als räumliche Prädiktoren, um die räumliche Struktur der Daten zu erfassen. Sie helfen, systematische räumliche Trends zu berücksichtigen, die durch topographische, geologische oder hydrologische Faktoren verursacht werden, die nicht vollständig durch andere Layer beschrieben werden. Damit wird sichergestellt, dass lokale Muster, wie etwa Unterschiede in der Grundwassertiefe oder im Mikroklima, im Modell reflektiert werden.

Die Kombination dieser Datensätze ermöglicht es dem Modell, die räumlichen und zeitlichen Muster des Regenwasserverbrauchs möglichst realitätsnah abzubilden (Abbildung 4a) und Bewässerungssignale in den Evapotranspirationsdaten differenziert zu erkennen (Abbildung 4b).

4.6 Parametrisierung und Annahmen für die Anwendung im Bibertal

Die nachfolgenden Resultate basieren auf Berechnungen mit dem Landsat-Satellitenprodukt sowie auf den in Tabelle 6 aufgeführten Schwellenwerten und Parametern, die sich in dieser Untersuchung als praktikabel erwiesen haben. Für die Anwendung wurde das Landsat-Produkt gewählt, da es über eine höhere räumliche Auflösung verfügt und im Vergleich zum WaPOR-Produkt geringere Unsicherheiten aufweist, die infolge der Interpolation zur Schliessung von Datenlücken entstehen. Weitere Angaben zu den in Tabelle 6 dargestellten Parameter finden sich in Anhang 1. Die Parameter wurden auf Grundlage der verfügbaren Vergleichsdaten und Erfahrungen so gewählt, dass sie für die vorliegende Untersuchung konsistente und praktikable Resultate liefern. Eine systematische Optimierung der Parameter war jedoch nicht möglich, da die verfügbaren Vergleichsdaten aufgrund fehlender punktgenauer Messungen dafür nicht geeignet sind.

Tabelle 6. Zusammenfassung der wichtigsten Schwellenwerte und Parameter in der Anwendung Bibertal

Parameter	Beschreibung	Wert
<i>Satellitenprodukt</i>	WaPOR Version 3.0 oder Landsat Collection 2 Provisional Actual Evapotranspiration Science Product	Landsat
<i>Eta/ETc Schwellenwert</i>	Grenzwert für das Verhältnis der tatsächlichen zur potenziellen Evapotranspiration (ETa/ETc) auf 10-Tages-Basis, oberhalb dessen kein Bewässerungsbedarf angenommen wird.	0,7
<i>ETblue Schwellenwert</i>	Mindestwert der monatlich aggregierten ETblue Werte (mm). Ein Feld wird nur dann als bewässert eingestuft, wenn es in mindestens einem Monat diesen Grenzwert überschreitet.	10

<i>Mindestfläche der Referenzflächen</i>	Mindestgrösse der Polygone für Sampling (ha)	1
<i>Stichprobengrösse</i>	Anzahl Pixel (30-m), welche als Trainingsdaten verwendet werden	10'000

5 Resultate

Dieses Kapitel beschreibt die Auswertung und Interpretation der Bewässerungsanalysen auf regionaler und kantonaler Ebene. In **Kapitel 5.1** wird der Vergleich zwischen den satellitengestützt als bewässert klassifizierten Flächen und den von Tiefbau Schaffhausen bereitgestellten Konzessionsflächen im Bibertal dargestellt. **Kapitel 5.2** vergleicht den modellierten Bewässerungswasserverbrauch (ETblue) mit den gemessenen Wasserbezügen im Bibertal und setzt die zeitlichen Muster in Beziehung zu den dokumentierten Entnahmebeschränkungen und -stopps. In **Kapitel 5.3** werden die Bewässerungsanteile nach Kulturgruppe ausgewertet und mit lokalen Experteneinschätzungen sowie nationalen Referenzwerten verglichen. **Kapitel 5.4** schliesslich überträgt die Resultate auf kantonaler Ebene (Schaffhausen, Zürich und Thurgau) und stellt sie den Modellschätzungen von Agroscope (2025) sowie den vorhandenen kantonalen Angaben gegenüber.

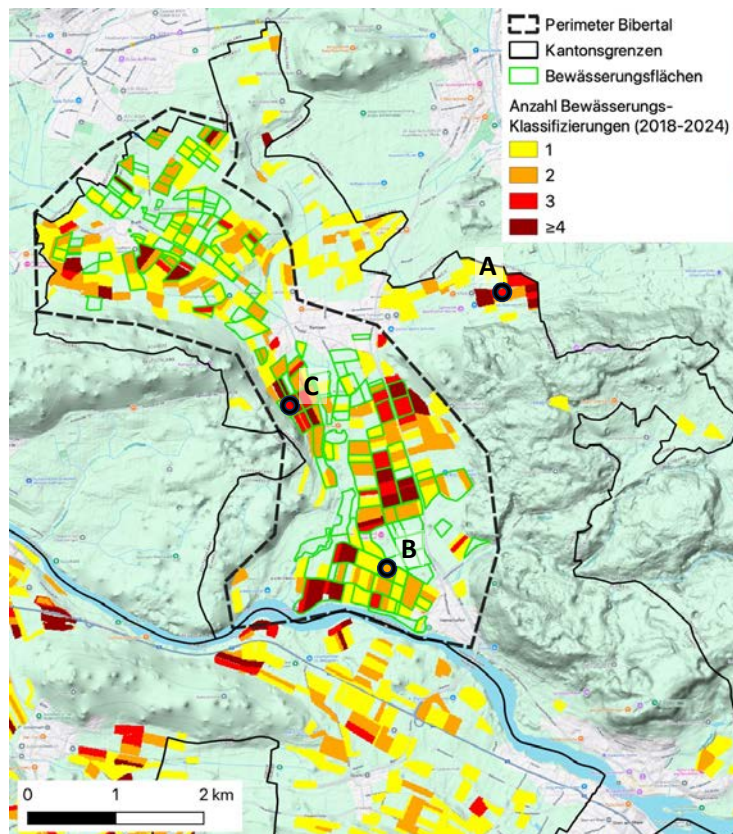


Abbildung 7. Häufigkeit der Klassifizierung als bewässert im Zeitraum 2018–2024. Dunklere Farben (rot) weisen auf wiederkehrende Bewässerung hin. Der Perimeter Bibertal ist gestrichelt dargestellt, die grün umrandeten Flächen zeigen die Konzessionsflächen mit Bewässerung aus Rhein oder Biber. Die Punkte A, B und C markieren Standorte, die in Abbildung 8 mit Fotos illustriert sind. Basiskarte: Google Terrain.

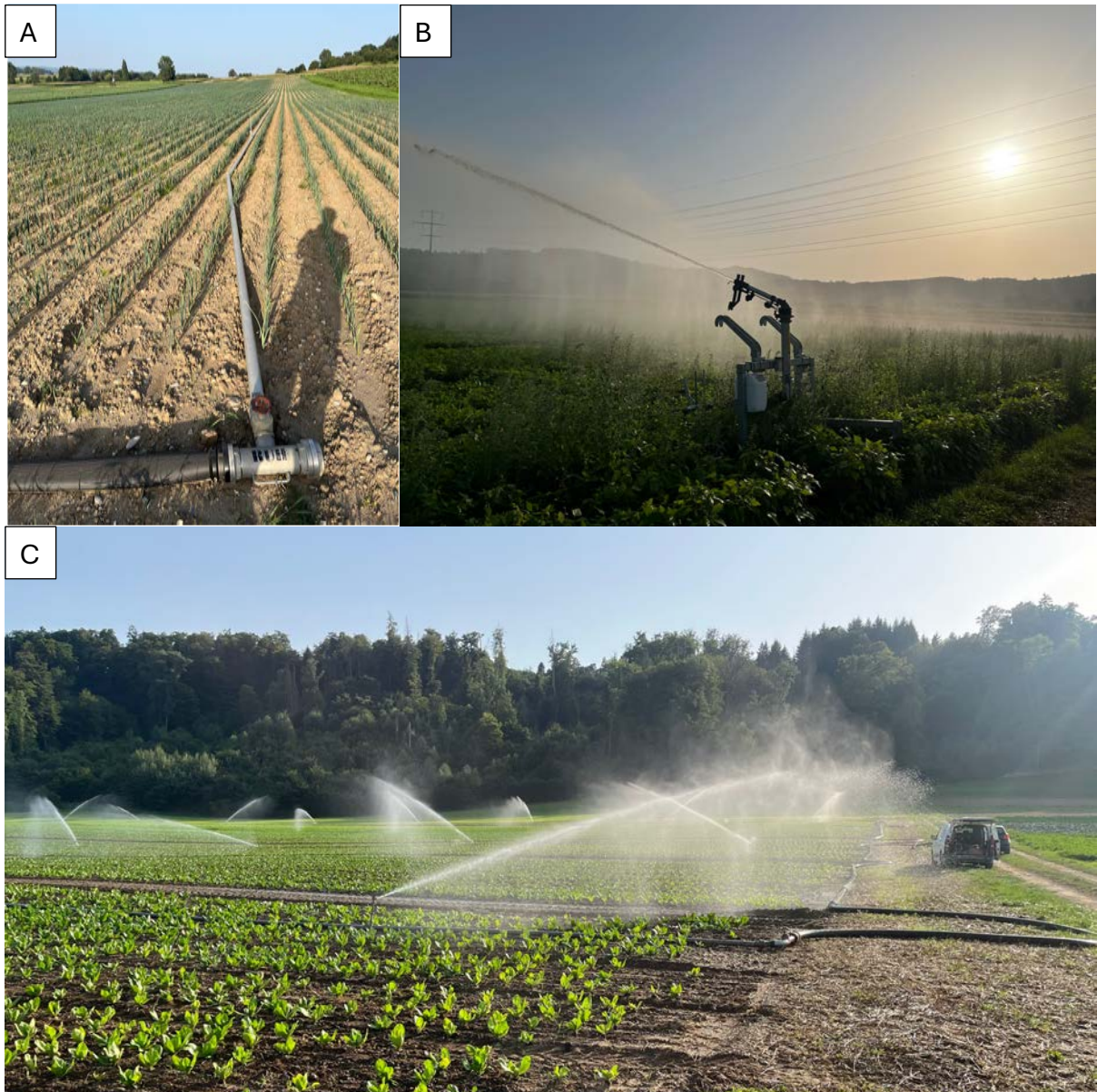


Abbildung 8. Feldbegehung Bibertal, 13. August 2025 (Fotos: S. Ragetti). Die Standorte A, B und C sind in Abbildung 7 markiert.

5.1 Bewässerungsflächen Bibertal

Die Anzahl der Bewässerungsklassifizierungen pro Feld über den Zeitraum 2018-2024 ist in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigen sich deutliche räumliche Muster mit Standorten, an denen Bewässerung wiederholt auftritt. Innerhalb des Perimeters Bibertal wurden im Durchschnitt pro Jahr rund 135 ha Nutzungsfläche als bewässert klassifiziert. Davon befanden sich 69 % innerhalb der konzessionierten Bewässerungsflächen. Innerhalb dieser Bewässerungsflächen wurden im Mittel 18,2 % der Nutzungsfläche als bewässert

klassifiziert, ausserhalb 9,7 %. Zwischen den Jahren zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede (Abbildung 9a).

Die höchsten Anteile bewässerter Fläche innerhalb der Konzessionsflächen traten in den Jahren 2018 (26 %) und 2023 (25 %) auf. Im ausgesprochen niederschlagsreichen Jahr 2021 wurden hingegen nur 6 % der Fläche als bewässert klassifiziert – ein Jahr, das durch überdurchschnittliche Niederschläge in den Monaten Mai bis Juli geprägt war (Abbildung 10). Ausserhalb der Konzessionsflächen schwankten die Bewässerungsanteile zwischen 1 % (2021) und 13 % (2023).

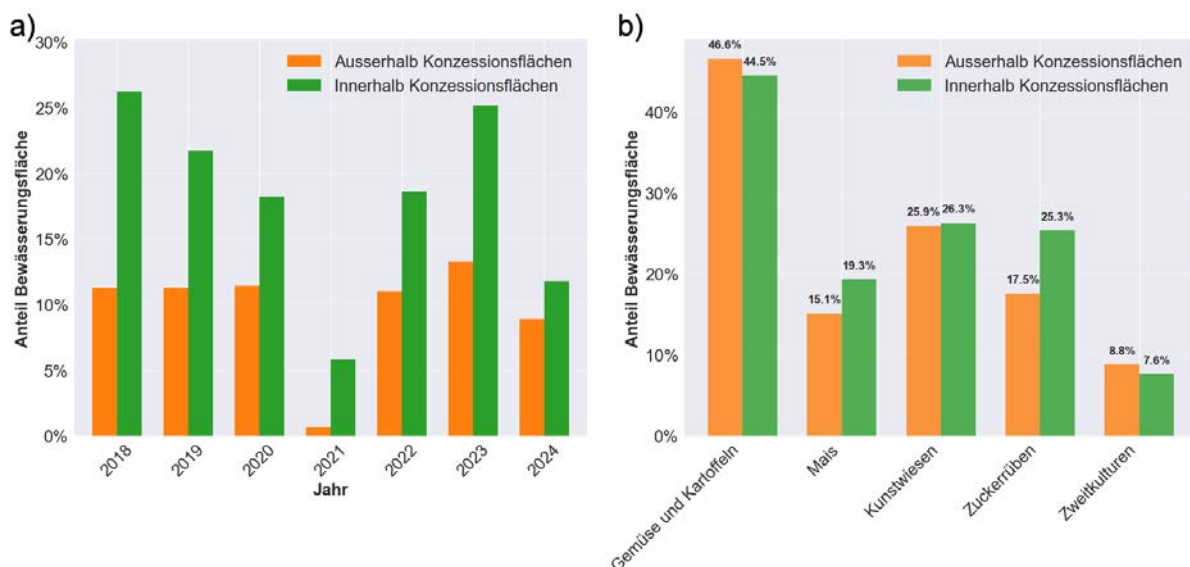


Abbildung 9. Anteil bewässerter Flächen innerhalb und ausserhalb der Konzessionsflächen für die Bewässerung aus Rhein oder Biber im Perimeter Bibertal. a) Zeitliche Entwicklung des Anteils bewässerter Fläche an der gesamten Kulturlfläche (2018–2024). b) Durchschnittlicher Anteil bewässerter Fläche pro Nutzungsklasse im Zeitraum 2018–2024.

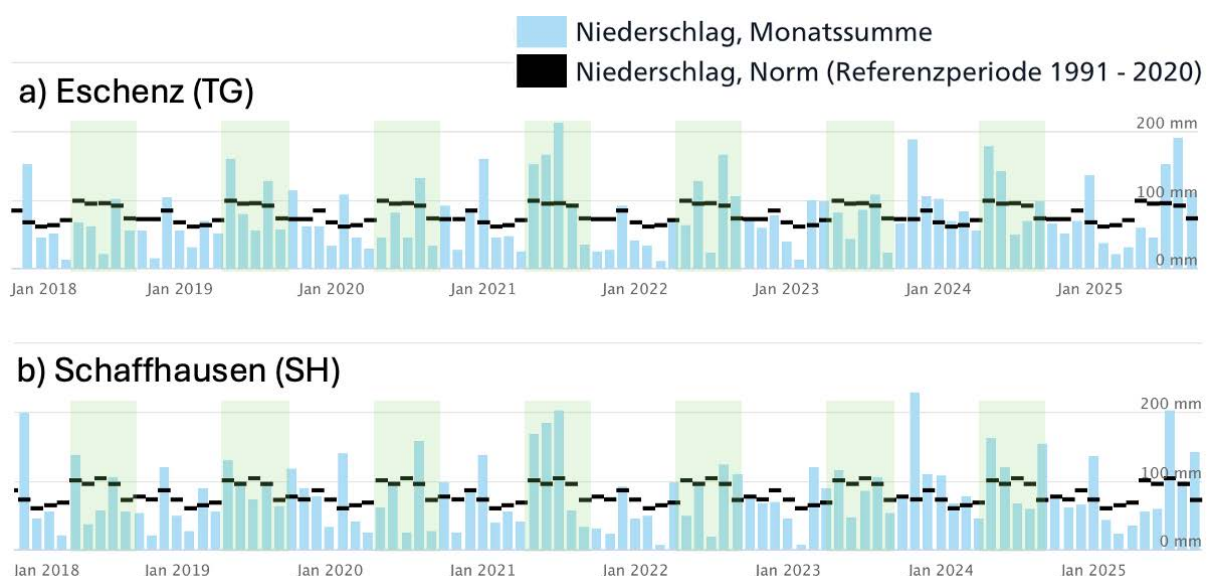


Abbildung 10. Monatliche Niederschlagsmenge 2018–2025, gemessen an zwei Meteo-Schweiz Messstationen nahe Bibertal. Die grünen Flächen markieren die Vegetationsperioden (Mai bis September) der Studienjahre 2018 bis 2024. Die schwarzen Balken repräsentieren den Durchschnitt der Periode von 1991–2020. Quelle: Meteo Schweiz.

Auch wenn innerhalb der Konzessionsflächen anteilmässig fast doppelt so häufig Bewässerung festgestellt wurde, unterscheiden sich die detektierten Bewässerungsanteile einzelner Nutzungskategorien innerhalb und ausserhalb der Konzessionsflächen nur geringfügig (Abbildung 9b). Sowohl innerhalb als auch ausserhalb der Konzessionsflächen wurden Gemüse- und Kartoffelflächen im mehrjährigen Mittel zu etwa 45% als bewässert klassifiziert. Nur bei Mais und Zuckerrüben lagen die Bewässerungsanteile ausserhalb der Konzessionsflächen etwas tiefer (15 % vs. 19 % bei Mais, 17 % vs. 25 % bei Zuckerrüben).

Da sich die Bewässerungsanteile nach Kultur nicht signifikant unterscheiden, ist der geringere Bewässerungsanteil ausserhalb der Konzessionsflächen in erster Linie darauf zurückzuführen, dass dort seltener bewässerungswürdige Kulturen angebaut werden. Der Wasserbedarf dieser Kulturen dürfte innerhalb des kleinräumigen Gebietes jedoch vergleichbar sein, sodass auch ausserhalb der Konzessionsflächen in ähnlichem Umfang bewässert wird, wenn Bedarf besteht.

Einige der Standorte mit wiederholt festgestellter Bewässerung gemäss Satellitenanalyse konnten bei einer Feldbegehung im August 2025 bestätigt werden (Abbildung 8). Auch ausserhalb des Perimeters Bibertal wurden Bewässerungsaktivitäten beobachtet (Standort A in Abbildung 7). An diesem Standort erfolgte die Bewässerung über einen Hydranten, bei Standort B wurde Rheinwasser, bei Standort C Biberwasser verwendet.

5.2 Vergleich mit Wasserbezugsdaten Bibertal

Abbildung 11 zeigt den Vergleich zwischen dem satellitenbasiert ermittelten Bewässerungswasserverbrauch (ETblue) und den gemeldeten Wasserbezugsdaten aus Rhein und Biber im Perimeter Bibertal. Der Zusammenhang ist deutlich: Der ermittelte Bewässerungswasserverbrauch korreliert stark mit den gemeldeten Wasserbezügen ($R^2 = 0.77$). Dieses Resultat belegt, dass die Methode die interannuellen Unterschiede zuverlässig abbildet.

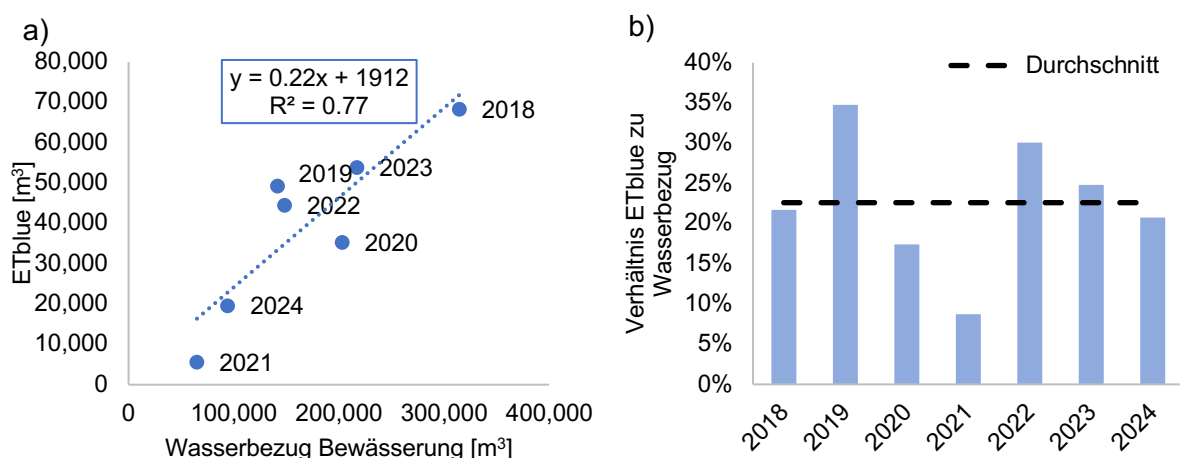


Abbildung 11. Vergleich des satellitenbasiert ermittelten Bewässerungswasserverbrauchs (ETblue) mit den gemeldeten Wasserbezugsdaten aus Rhein und Biber im Perimeter Bibertal. a) Beziehung zwischen ETblue und dem Wasserbezug für die Jahre 2018–2024. b) Verhältnis von ETblue zum Wasserbezug pro Jahr; die gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert über den gesamten Zeitraum.

Wie erwartet liegt der von den Pflanzen tatsächlich aufgenommene Bewässerungswasserverbrauch unter dem ausgebrachten Volumen, da ein Teil des Wassers durch Versickerung, Oberflächenabfluss oder Verdunstung verloren geht. Das durchschnittliche Verhältnis von ETblue zu Wasserbezug beträgt 22,6 % – ein im internationalen Vergleich sehr tiefer Wert, der weniger die physikalische Effizienz der Bewässerung widerspiegelt, sondern vor allem methodische Limitationen der Fernerkundung. Vor allem in Jahren mit häufiger Bewölkung (z. B. 2021) bleiben Bewässerungsereignisse teilweise unerfasst, da bewölkte Bedingungen zu fehlenden Satellitendaten führen und Bewässerungsphasen dadurch nicht erfasst werden können.

Abbildung 12b zeigt exemplarisch für Kartoffeln, dass der Bewässerungsanteil in einzelnen Jahren und Monaten bis auf 40% ansteigt, jedoch nie unter 10 % fällt. Bei einem hohen Regenwasserverbrauch ist die Sensitivität der Satellitenmethode zu gering, um Bewässerung zuverlässig zu detektieren. Zudem findet Bewässerung häufig bereits in der frühen Vegetationsphase statt, wenn der Gesamtwasserverbrauch der Pflanze tief ist und der Beitrag der Bewässerung im ET-Signal kaum nachweisbar ist. Dies führt zu einer systematischen Unterschätzung von ETblue in solchen Perioden, und erklärt teilweise die Streuung um die Regressionslinie in Abbildung 11a.

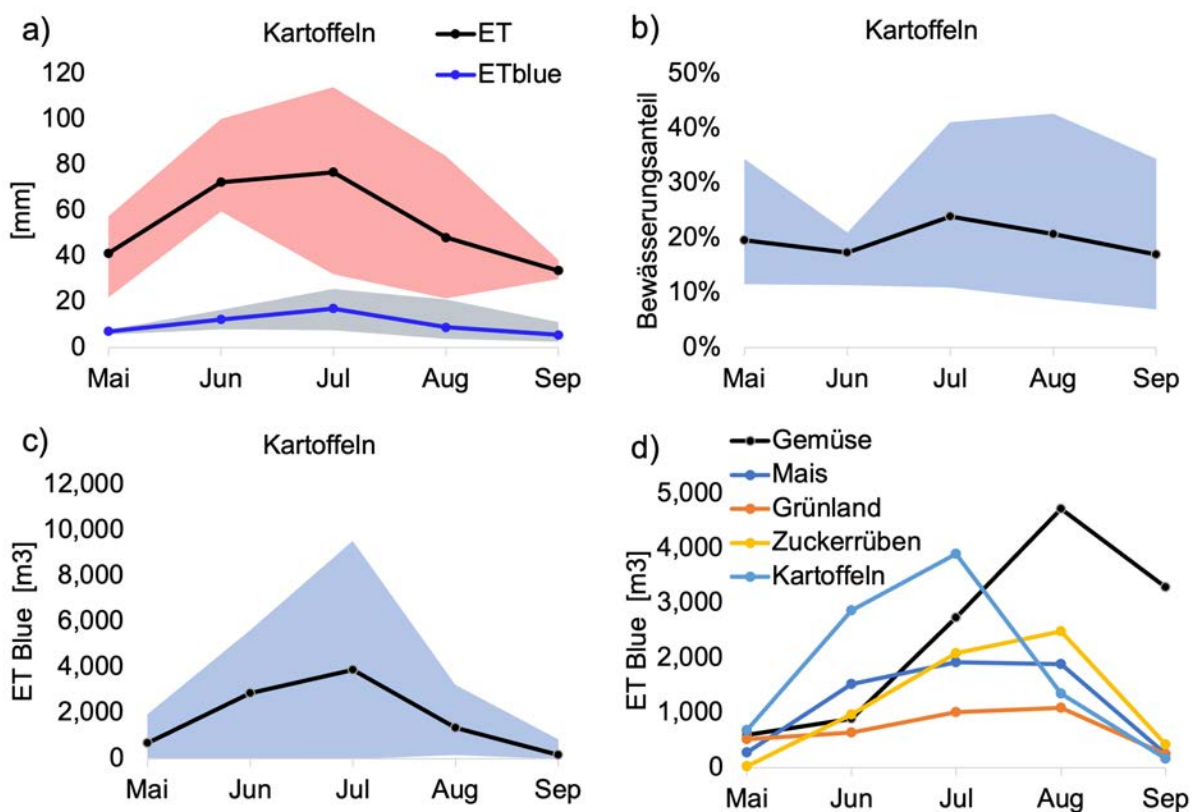


Abbildung 12. Monatliche Entwicklung der Evapotranspiration (ET) und der bewässerungsbedingten Evapotranspiration (ETblue) im Perimeter Bibertal. Die Schattierungen zeigen die Bandbreite zwischen den Jahren 2018–2024. a) Gesamte ET und ETblue für Kartoffeln. b) Anteil des Bewässerungswasserverbrauchs der Kartoffeln am gesamten Wasserverbrauch im Perimeter. c) Monatliche ETblue-Mengen für Kartoffeln in m³. d) Vergleich der monatlichen ETblue-Mengen verschiedener Kulturen (Gemüse, Mais, Grünland, Zuckerrüben, Kartoffeln); Zweitkulturen werden der Kategorie Gemüse zugeordnet.

Der Verlauf der modellierten Evapotranspiration (Abbildung 12) zeigt insgesamt ein schlüssiges Muster, das den bekannten Wachstumsphasen der Kulturen entspricht. Der Wasserbedarf der Kartoffeln steigt ab Mai deutlich an, erreicht im Juli sein Maximum und fällt ab August wieder. Andere Kulturen wie Zuckerrüben und Grünland erreichen ihren Spitzenverbrauch erst im August (Abbildung 12d). Diese Muster stimmen gut mit der agronomischen Realität überein.

Der Zeitpunkt des pflanzlichen Wasserverbrauchs (ETblue) fällt nicht zwingend mit dem der Wasserentnahme zusammen, da Bewässerungswasser im Boden zwischengespeichert wird. Entsprechend ist nicht zu erwarten, dass ETblue während Entnahmestopps auf null sinkt. In vier der sieben untersuchten Jahre traten Entnahmestopps für Wasser aus der Biber auf, in einem weiteren Jahr (2023) bestanden Entnahmebeschränkungen (Abbildung 13). In Monaten mit aufeinanderfolgenden Entnahmebeschränkungen oder Entnahmestopps sinkt der modellierte Bewässerungswasserverbrauch deutlich, was zeigt, dass die Methode die zeitlichen Muster der Bewässerungsaktivität plausibel erfasst.

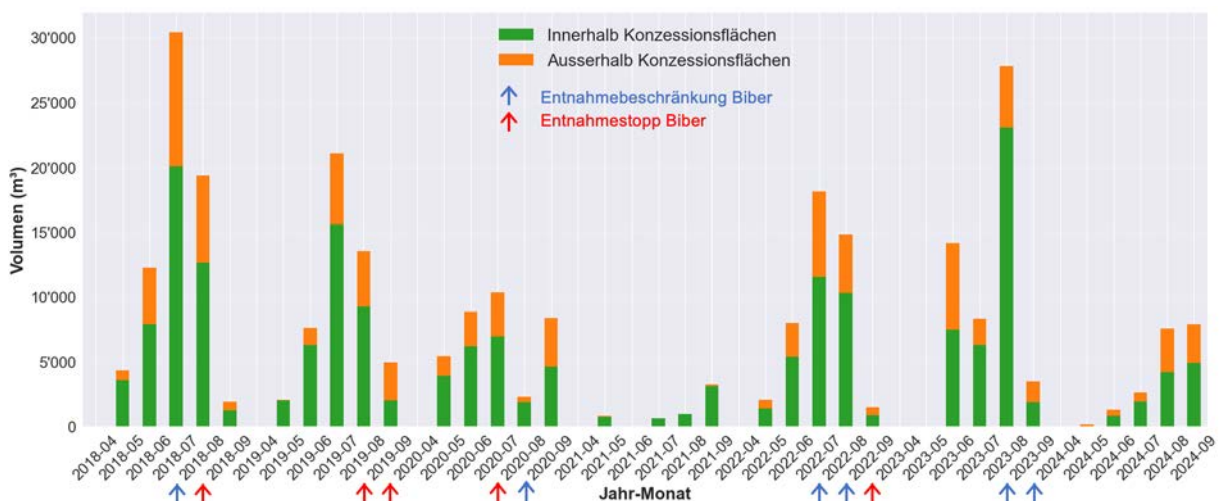


Abbildung 13. Monatlicher modellierter Bewässerungswasserverbrauch (ETblue) der Kulturen innerhalb des Perimeters Bibertal für den Zeitraum 2018–2024, aufgeteilt in Verbrauch innerhalb (grün) und ausserhalb (orange) der Konzessionsflächen. Die blauen Pfeile markieren Monate, in denen zeitweise Entnahmebeschränkungen aus der Biber bestanden, die roten Pfeile Monate, in denen zeitweise ein Entnahmestopp galt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Satellitenmethode unterschätzt zwar den absoluten Bewässerungswasserverbrauch der Pflanzen, bildet aber sowohl die jährlichen als auch die monatlichen Schwankungen konsistent ab. Die starke Korrelation mit den gemessenen Wasserbezügen zeigt, dass die Methode die tatsächlichen Bedingungen im Bibertal zuverlässig charakterisiert und somit ein realistisches, zeitlich differenziertes Bild des Bewässerungsgeschehens liefert.

5.3 Vergleich der Bewässerungsanteile nach Kultur

Tabelle 7 zeigt den Anteil bewässerter Fläche nach Kulturgruppen gemäss Satellitenanalyse für das Bibertal und den gesamten Kanton Schaffhausen im Vergleich zu den lokalen

Experteneinschätzungen (Agroscope 2025) sowie den schweizweiten Werten des Bundesamts für Statistik (BFS 2024)

Tabelle 7. Anteil bewässerter Fläche nach Kulturgruppe im Bibertal und im Kanton Schaffhausen (2018–2024) im Vergleich zu lokalen und nationalen Referenzwerten.

Kulturgruppe	Satellitenanalyse: Bibertal (Konzessionsflächen, 2018–2024)	Satellitenanalyse: Kanton Schaffhausen (2018–2024)	Lokale Experten- einschätzungen, Bibertal (Agroscope 2025)	Schweiz (BFS 2024, Erhebung 2023)
Gemüse	42,5%	32,5%	100%	64%
Kartoffeln	49,7%	39,6%	100%	44%
Mais	19,4%	4,7%	50%	1,4%*
Zuckerrüben	22,7%	4,9%	5%	4%
Wiesen / Dauergrünland	25,3%**	5,8%	30%	1,4%

*Wert für Getreide inkl. Mais, **Wert für Kunstwiesen

Im Vergleich mit den im Agroscope-Bericht 2025 zitierten Expertenaussagen wird der Anteil bewässerter Zuckerrüben im Bibertal von der Satellitenanalyse tendenziell überschätzt, während Gemüse- und Kartoffelflächen eher unterschätzt werden. Letzteres ist auf die methodischen Limitationen der Satellitenanalyse zurückzuführen (siehe Kapitel 5.2): Bei einem hohen Regenwasseranteil ist die Empfindlichkeit der Methode zu gering, um Bewässerung zuverlässig zu erkennen. Zudem erfolgt Bewässerung häufig bereits in der frühen Wachstumsphase zum Anwurzeln, wenn der Gesamtwasserverbrauch der Pflanze noch tief ist und die Methode diese Situation nicht adäquat erfassen kann. Dies führt zu einer Unterschätzung der Bewässerung bei Kulturen wie Gemüse und Kartoffeln.

Die Überschätzung bei Zuckerrüben dürfte hingegen andere Ursachen haben. Da die Durchschnittswerte für Schaffhausen im Rahmen der nationalen Vergleichswerte liegen, ist anzunehmen, dass im Bibertal innerhalb der Konzessionsflächen entweder aufgrund der guten Wasserverfügbarkeit überdurchschnittlich häufig bewässert wird oder dass aufgrund der kleinräumigen Parzellenstruktur und der Nähe zu bewässerten Feldern eine Überschätzung entsteht. In solchen Fällen können einzelne Bildpixel der Satellitendaten sowohl bewässerte als auch unbewässerte Flächen überdecken, wodurch die Auswertung zu hohe Werte ergibt.

5.4 Anwendung auf Kantone Schaffhausen, Zürich und Thurgau

Abbildung 14 zeigt die räumliche Verteilung der Bewässerungsklassifizierungen für den Zeitraum 2018–2024 in den Kantonen Schaffhausen, Thurgau und Zürich. Die Karte entspricht der Darstellung in Abbildung 7 für das Bibertal, wurde jedoch auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzungsfläche dieser drei Kantone angewendet. Abbildung 15 zeigt zusammenfassend den Anteil der als bewässert klassifizierten Nutzungsflächen je Gemeinde. Dargestellt ist der Anteil der Flächen, die im Zeitraum mindestens einmal als

bewässert erkannt wurden, bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzungsfläche der jeweiligen Gemeinde.

Gebiete mit bekannter Bewässerungstätigkeit werden in der Analyse gut erkannt. Die Gemeinden mit den höchsten Anteilen bewässerter Nutzungsflächen befinden sich im Bibertal und Umgebung:

- **Diessenhofen (TG):** 50,5 %,
- **Buch (SH):** 49,9 %,
- **Ramsen (SH):** 43,3 %,
- **Hemishofen (SH)** folgt auf Platz 7 mit 35,9 %.

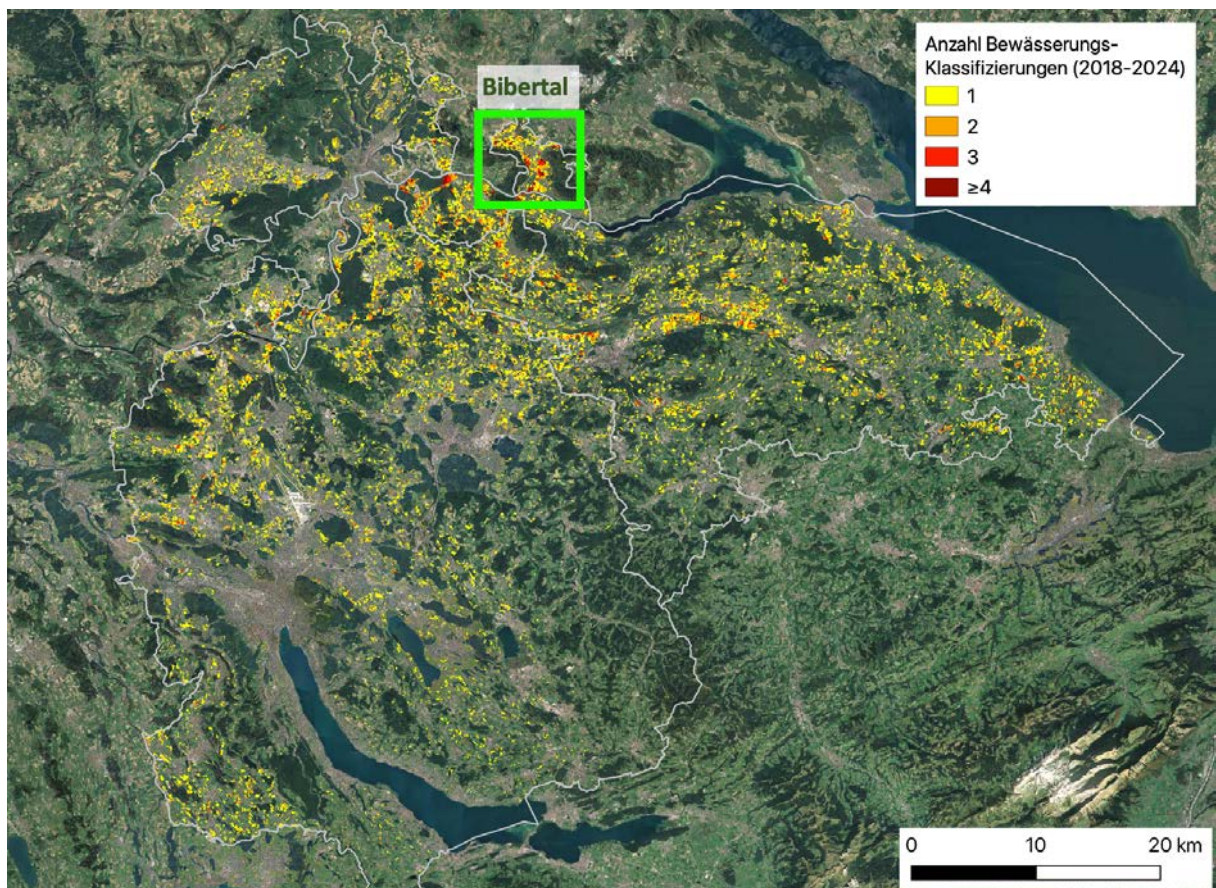


Abbildung 14. Anzahl der Klassifizierungen als bewässert in den Jahren 2018–2024 in den Kantonen Zürich, Thurgau und Schaffhausen. Das Bibertal ist grün markiert. Basiskarte: Google Satellite.

Damit wird deutlich, dass die satellitenbasierte Analyse bekannte Bewässerungsschwerpunkte zuverlässig identifiziert.

Diessenhofen am Rhein im Kanton Thurgau ist eine Gemeinde mit hoher Bewässerungsaktivität. Hier nutzt die Bewässerungsgenossenschaft "Schlattingen-Basadingen-Willisdorf und Umgebung" Wasser aus dem Rhein (Thurgau 2017). Weitere in Abbildung 15 markierte Gebiete, welche bekannt sind für hohe Bewässerungsaktivität, sind das Thurtal im Kanton Thurgau, wo über 100 Konzessionen für Grundwasserentnahmen sowie

Wasserbezug aus der Thur bestehen (Amt für Umwelt Kanton Thurgau, 2024). Das Furttal im Kanton Zürich ist bekannt für seinen intensiven Gemüseanbau. Seit 2022 wird dort über ein mehr als 12 Kilometer langes Leitungsnetz Wasser aus der Limmat zur Bewässerung verwendet. Davor bestanden Wasserrechte für Entnahmen aus dem Furtbach, aus oberflächennahem Grundwasser sowie aus Quellwasser.

Diese Gebiete zeigen, dass die Fernerkundungsmethode auch ausserhalb des Bibertals verlässlich jene Regionen erkennt, in denen aufgrund lokaler Infrastruktur und Kulturverteilung tatsächlich Bewässerung erfolgt.

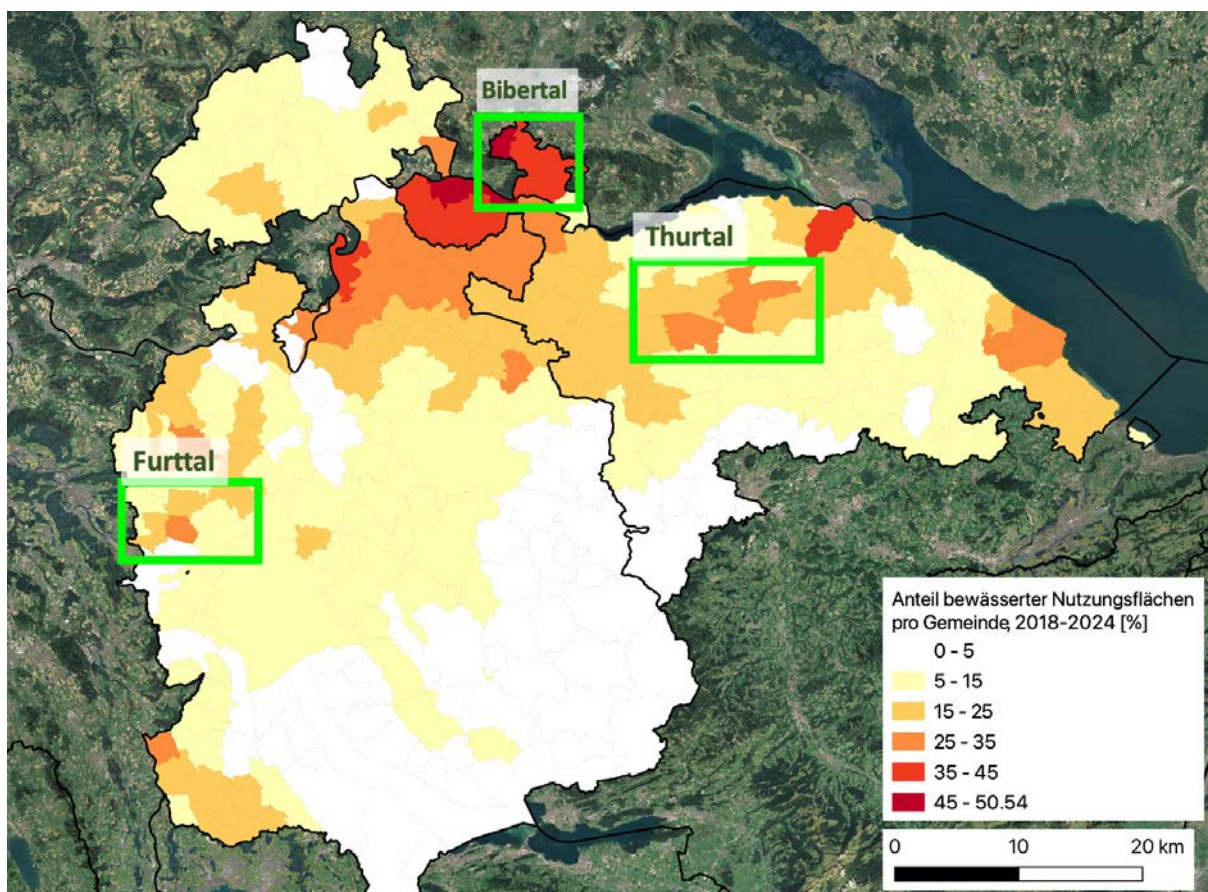


Abbildung 15. Anteil bewässerter Nutzungsfläche pro Gemeinde (2018–2024) in den Kantonen Zürich, Thurgau und Schaffhausen. Dargestellt ist der Anteil der Flächen, die im Zeitraum mindestens einmal als bewässert klassifiziert wurden, bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzungsfläche der jeweiligen Gemeinde. Grün markiert sind ausgewählte Gebiete mit dokumentierter Bewässerung. Basiskarte: Google Satellite.

Vergleich mit Modell- und Kantonsdaten

Die aus ETblue abgeleiteten Bewässerungsvolumen wurden in Wasserbezug umgerechnet, wobei die im Bibertal ermittelten jährlichen Verhältnisse zwischen ETblue und Wasserbezug (vgl. Abbildung 11) verwendet wurden. Zur Validierung erfolgte ein Vergleich mit den Modellresultaten aus der Agroscope-Studie (2025) sowie – für den Kanton Thurgau – mit den kantonalen Schätzungen der Bewässerungsvolumen.

Die Agroscope-Studie verwendet ein auf landwirtschaftliche Produktionssysteme

abgestimmtes, modellbasiertes Vorgehen: Basierend auf Kulturverteilung, Bodeneigenschaften, Klimadaten und regionalen Wasserbedarfskoeffizienten wird der potenzielle Bewässerungsbedarf für jede Kultur und Region bestimmt. Dabei werden sowohl der pflanzliche Wasserbedarf (ETc) als auch der Beitrag des Niederschlags (Effektivniederschlag) berücksichtigt, um daraus den jährlichen Netto-Bewässerungsbedarf zu schätzen.

Im Kanton **Schaffhausen** (Abbildung 16) liegen die aus Satellitendaten abgeleiteten Bewässerungsvolumen im Mittel der Jahre 2021–2023 um rund 40 % höher als die von Agroscope modellierten Werte. Die Differenz resultiert vor allem aus höheren Schätzungen für Mais, Grünland und Zuckerrüben. Für Gemüse und Kartoffeln stimmen die Ergebnisse beider Ansätze dagegen relativ gut überein.

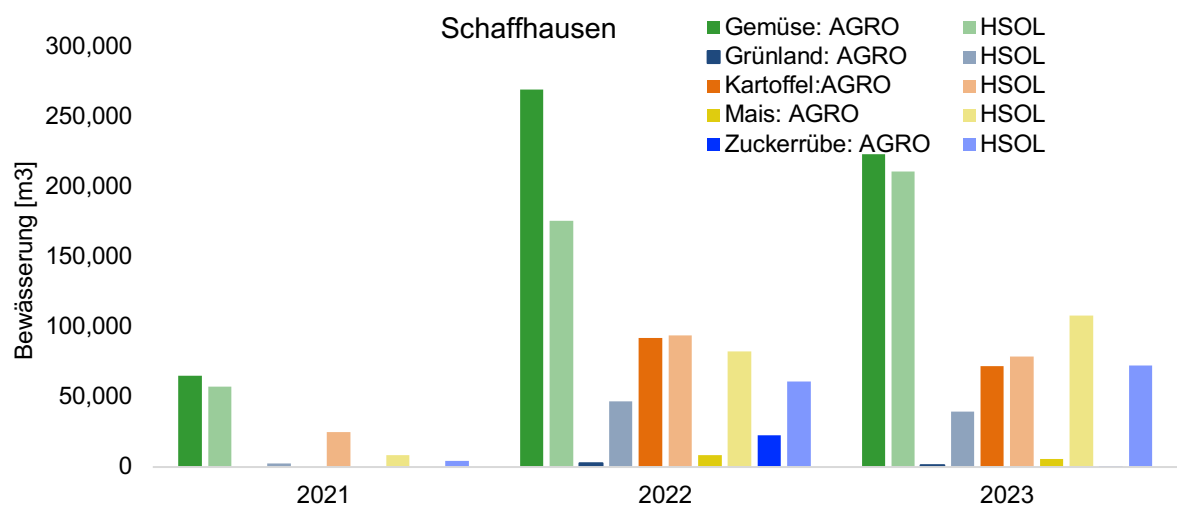


Abbildung 16. Vergleich der geschätzten Wasserverbrauchsmengen für die Bewässerung im Kanton Schaffhausen gemäss satellitenbasierten Auswertungen von HSOL und Modellschätzungen von Agroscope (AGRO) für die Jahre 2021–2023. Dargestellt sind die jährlichen Bewässerungsvolumina je Kultur.

Für den Kanton **Thurgau** existieren neben den Agroscope-Modellwerten auch kantonale Schätzungen der Bewässerungsverbräuche (Abbildung 17). Auffällig ist, dass die kantonalen Werte von Jahr zu Jahr nur gering variieren: Der Gesamtverbrauch im sehr nassen Jahr 2021 liegt lediglich etwa 30 % tiefer als im trockenen Jahr 2023. Im Gegensatz dazu zeigen sowohl die Agroscope-Schätzungen als auch unsere satellitenbasierten Resultate eine deutlich stärkere Variation. Gemäss beiden Ansätzen war der Bewässerungswasser-verbrauch im Jahr 2023 beinahe doppelt so hoch wie im Jahr 2021.

Dass die gemeldeten Entnahmemengen weniger stark von klimatischen Bedingungen abhängen, wird zumindest im Bibertal (vgl. Abbildung 11a) nicht durch Beobachtungsdaten gestützt. Es ist anzunehmen, dass die kantonalen Erhebungen auf unsicheren oder unvollständigen Schätzungen beruhen. Das Amt für Umwelt des Kantons Thurgau bestätigt, dass die kantonalen Zahlen teilweise auf Schätzungen beruhen.

Die Agroscope-Schätzungen liegen im Thurgau insgesamt deutlich höher als unsere satellitenbasierten Werte – insbesondere im Jahr 2022, wo der Unterschied +130 % beträgt.

Der kantonale Schätzwert liegt mit +57 % etwa in der Mitte zwischen beiden Ansätzen. Die Gründe für diese Abweichungen können derzeit nicht abschliessend geklärt werden. Sie verdeutlichen jedoch, dass methodische Unsicherheiten bei der Schätzung des Bewässerungsbedarfs bestehen und zukünftige Vergleiche – wie im Bibertal – durch punktuelle Beobachtungsdaten ergänzt werden sollten.

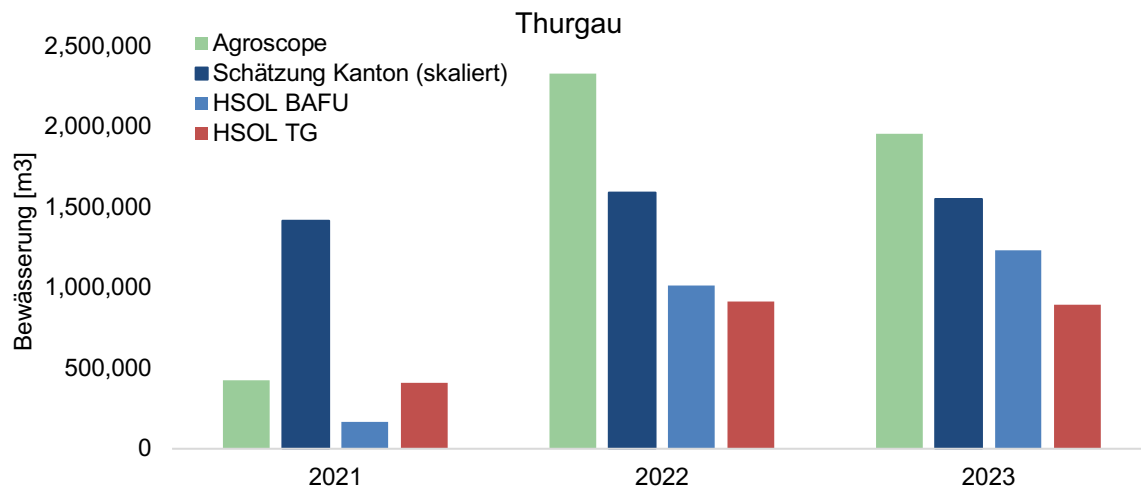


Abbildung 17. Vergleich der geschätzten Wasserverbrauchsmengen für die Bewässerung im Kanton Thurgau gemäss satellitenbasierten Auswertungen von HSOL, Modellschätzungen von Agroscope und kantonalen Angaben für die Jahre 2021–2023. „HSOL BAFU“ bezieht sich auf die Schätzungen des vorliegenden Berichts mit der überarbeiteten Methode. „HSOL TG“ bezieht sich auf die Ergebnisse des Vorgängerberichts im Auftrag des Kantons Thurgau.

Anmerkung: Die dargestellten Wasserverbrauchsmengen entsprechen der Summe aller in der satellitenbasierten Auswertung erfassten Nutzungskategorien; Obstflächen wurden dabei ausgeschlossen. Um die kantonalen Angaben und diejenigen von Agroscope mit den HSOL-Werten vergleichbar zu machen, wurden sie entsprechend skaliert: Auf Basis der Agroscope-Modellschätzungen wurde zunächst der relative Anteil des Bewässerungsbedarfs für Obst berechnet. Der gleiche relative Anteil wurde anschliessend von den kantonalen Gesamtwerten abgezogen.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

6.1 Eignung von Satellitendaten und Limitationen

Die vorliegende Studie zeigt, dass satellitenbasierte Methoden grundsätzlich geeignet sind, Bewässerungsaktivitäten in der Schweiz zu erfassen und zeitlich-räumliche Muster des landwirtschaftlichen Wasserbezugs abzubilden. Die starke Korrelation zwischen dem modellierten Bewässerungswasserverbrauch (ETblue) und den gemessenen Wasserbezügen im Bibertal ($R^2 = 0.77$) belegt, dass die Methode die interannuelle Variabilität der Bewässerung zuverlässig widerspiegelt. Auch die räumliche Identifikation bekannter Bewässerungsgebiete – wie des Bibertals, des Thurtals und des Furttals – unterstreicht die Validität des Ansatzes.

Dennoch bestehen methodische Limitationen, die bei der Interpretation der Ergebnisse und bei einer möglichen schweizweiten Anwendung berücksichtigt werden müssen:

Punktgenaue Bestimmung von Bewässerung: Aus den Ergebnissen dieser Studie sowie der Validierung der Vorgängerstudie in der Region Broye (hydrosolutions GmbH 2024) lässt sich nicht ableiten, dass punktgenaue Bestimmungen von Bewässerung auf Feldebene möglich sind. Die Ergebnisse und Beobachtungen im Feld deuten darauf hin, dass Standorte mit gehäuft detektierten Bewässerungsklassifizierungen tatsächlich mit Orten aktiver Bewässerung übereinstimmen, doch können für einzelne Jahre und Felder keine zuverlässigen Aussagen gemacht werden. Das Ergebnis der Analyse, wonach auch ausserhalb der Konzessionsflächen bewässert wird, ist daher mit Vorsicht zu interpretieren. Beobachtungen von Bewässerung ab Hydrant (Abbildung 8) machen es jedoch plausibel, dass bei hohem Wasserbedarf auch ausserhalb der Flächen, die offiziell über Konzessionen für Wasserentnahmen aus der Biber oder dem Rhein verfügen, bewässert wird.

Ein Vergleichsbeispiel aus Spanien verdeutlicht sowohl das Potenzial als auch die Grenzen satellitengestützter Ansätze: In der östlichen La Mancha in Zentralspanien wird die Bewässerung vollständig ohne direkte Wassermessung und ohne Wassergebühren überwacht – ausschliesslich mittels Fernerkundung von Kulturen (Sanz et al. 2016). Jedoch vertraut auch dieses System nicht blind den Satellitendaten: Nur wenn eine Inkonsistenz zwischen den deklarierten Kulturen und dem Fernerkundungsmonitoring besteht, wird eine Inspektion im Feld durchgeführt. In der Schweiz, mit deutlich schwierigeren Bedingungen für Satellitenmonitoring aufgrund häufiger Bewölkung, gilt noch viel mehr, dass ein solches System nicht für punktgenaues Monitoring genutzt werden kann. Anstatt auf punktgenaues Monitoring sollte sich eine Anwendung deshalb auf regionale Abschätzung der Bewässerungsfrequenzen und -volumen beschränken, beispielsweise pro Gemeinde (siehe Abbildung 16). Dies gilt auch unabhängig von der in Kapitel 6.3 erwähnten zukünftigen Verfügbarkeit von Satellitendaten mit höherer zeitlicher Auflösung.

Erfassbarkeit verschiedener Kulturen: Die Methode kann nur Kulturen erfassen, welche einen signifikanten ($>10\%$) Bewässerungsanteil aufweisen (vgl. Abbildung 13b).

Deshalb ist die Anwendbarkeit auf bewässerungswürdige Kulturen gemäss BLW (2024) einzuschränken (Tabelle 1). In dieser Studie nicht angewendet wurde die Analyse auf Obstanlagen und Rebanlagen. Beeren sind ebenfalls im Bibertal praktisch nicht präsent. Um die Anwendbarkeit auf diese Kulturen zu beurteilen, braucht es vertiefte Studien und allenfalls eine Weiterentwicklung der Methode.

Datenlücken und räumliche Auflösung: Datenlücken infolge von Wolkenabdeckung sowie die begrenzte Genauigkeit bei kleinräumig strukturierten landwirtschaftlichen Flächen führen zu spezifischen Unsicherheiten. Unsere Studie hat gezeigt, dass diese Faktoren den absoluten Bewässerungswasserverbrauch systematisch unterschätzen. Trotzdem zeigt die Anwendung im Bibertal, dass eine robuste Einschätzung der Bewässerungsaktivitäten möglich ist, insbesondere bei der Erfassung zeitlicher Dynamiken: Die gute Übereinstimmung zwischen modelliertem Bewässerungswasserverbrauch und den gemessenen Wasserbezügen im Bibertal (Abbildung 11) sowie die plausible Abbildung monatlicher Schwankungen (Abbildung 12) bestätigen dies.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Satellitendaten in der Schweiz für die **regionale Erfassung und das Monitoring von Bewässerungstrends** geeignet sind, jedoch nicht für die parzellenscharfe Kontrolle einzelner Betriebe oder Flächen. Für eine operative Anwendung – also ein regelmässiges, zuverlässiges und institutionell verankertes Monitoring – empfiehlt sich daher eine Fokussierung auf Gemeindeebene oder grössere räumliche Einheiten.

6.2 Anforderungen an ergänzende Datenquellen

Ein wesentlicher methodischer Fortschritt dieser Studie besteht darin, dass erstmals ergänzende Datenquellen in hoher räumlicher Auflösung systematisch mit Satellitendaten kombiniert wurden, um bewässerte Flächen und Bewässerungsmengen in einer Region der Schweiz zu erfassen. Durch die Integration von Bodendaten, topographischen Informationen, Niederschlagsdaten und Vegetationsindizes in ein maschinelles Lernmodell konnte die räumliche Heterogenität der Evapotranspiration unter nicht-bewässerten Bedingungen (ETgreen) präziser modelliert werden als in bisherigen Ansätzen.

Verwendete Datenquellen und ihre Verfügbarkeit: Die in dieser Studie verwendeten ergänzenden Datensätze – digitales Höhenmodell, Bodenhinweiskarte, Niederschlagsdaten, Waldnähe und Vegetationsindizes – sind schweizweit mit ausreichender räumlicher Auflösung verfügbar (Tabelle 5). Auch wenn der Nutzen der einzelnen Datensätze nicht systematisch evaluiert wurde – dafür fehlen geeignete Validierungsdaten auf Feldebene –, ist davon auszugehen, dass die verwendeten Datenquellen ihren Zweck erfüllen. Die erfolgreiche Anwendung im Bibertal sowie die plausible Identifikation bekannter Bewässerungsgebiete in den Kantonen Schaffhausen, Zürich und Thurgau bestätigen die Robustheit des gewählten Ansatzes.

Grundwasserdaten als potenzielle Ergänzung: Die Vegetation zapft auch Grundwasser an und verdunstet dieses. Da keine schweizweit einheitlichen Karten in genügend hoher

Auflösung zum Flurabstand vorhanden sind, nehmen wir an, dass die räumliche Autokorrelation – berücksichtigt durch die Koordinaten im Modell – ein genügend guter Prädiktor für den Einfluss von Grundwasser ist. Wir nehmen also an, dass Kulturen, welche nahe beieinander wachsen, einem ähnlichen Einfluss des Grundwassers unterliegen. Optimalerweise würden der dynamische Flurabstand und die Wurzeltiefe jeder Kultur in die Analyse mit einfließen, aber die bestehende Datengrundlage hat den Einbau dieser Information in die Methodologie in der verfügbaren Zeit nicht erlaubt. Vor allem für das Bewässerungsmonitoring von tiefwurzelnden Kulturen wie Obstplantagen und Reben (im Bibertal nicht von Bedeutung) werden solche Erwägungen wichtig sein. Eine schweizweite Karte zum Grundwasserflurabstand mit ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung würde die Modellierung von ETgreen weiter verbessern.

Landnutzungsdaten als zentrale Grundlage: Die Qualität der Landnutzungsdaten ist in der Schweiz sehr hoch, und diese Daten sind für unsere Methode von zentraler Bedeutung. Sie ermöglichen erst die effektive Nutzung von Satellitendaten zur Bewässerungserfassung. Die kantonalen Nutzungsflächen, die über geodienste.ch verfügbar sind, liefern präzise geometrische und thematische Informationen zur Kulturverteilung und bilden die Grundlage sowohl für die Modellierung von ETgreen (über Referenzflächen) als auch für die Aggregation der Resultate auf Feldebene.

Empfehlungen zur Verbesserung der Datengrundlage: Bei den Landnutzungsdaten kann angesetzt werden, um die satellitenbasierte Methode noch weiter zu unterstützen und ihre schweizweite Anwendbarkeit zu erleichtern. Informationen zu Bewässerungskonzessionen und deren tatsächlicher Nutzung könnten als zusätzliche Prädiktorvariablen in das maschinelle Lernmodell einfließen. Dies würde die Trennschärfe zwischen bewässerten und nicht-bewässerten Flächen verbessern sowie die Interpretation der Satellitenresultate schweizweit erheblich erleichtern. Wir empfehlen:

1. **Integration von Bewässerungskonzessionen in Nutzungsflächen:** Die Kantone sollten Informationen zu Bewässerungskonzessionen als Attribute in den Nutzungsflächen zur Verfügung stellen.
2. **Jährliche Meldung der Konzessionsnutzung:** Weitergehend können Landwirte mit Bewässerungskonzessionen angehalten werden, für jedes Feld aufzuführen, ob in diesem Jahr von der Konzession Gebrauch gemacht wurde.

Auch wenn solche Informationen den effektiven Verbrauch von Bewässerung in der Schweiz noch nicht ganzheitlich abbilden würden – da Bewässerung ab Hydranten oder ohne erforderliche Konzession nicht erfasst würde –, wären diese Angaben für einen satellitenbasierten Modellansatz wie in dieser Studie von grossem Wert.

Validierungsdaten zur Methodenoptimierung: Um die Methode zu validieren und weiterzuentwickeln, sind zusätzlich verlässliche Datensätze mit geografischen Informationen über bewässerte und garantiert nicht bewässerte Flächen sowie über ausgebrachte Bewässerungsvolumen erforderlich. Solche Datensätze können über Steuerungssoftware für Beregnungsmaschinen (z.B. <https://www.raindancer.com>) gesammelt werden. Es gibt bereits Landwirtschaftsbetriebe in der Schweiz, welche solche Software nutzen

(Amt für Umwelt Kanton Thurgau, persönliche Mitteilung). Solche Datensätze sind jedoch derzeit nicht öffentlich verfügbar in der Schweiz. Sie würden sich eignen, die Modellparameter systematisch zu optimieren und die Unsicherheiten der Methode quantitativ zu bewerten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die grundlegenden Datenquellen für eine schweizweite Anwendung der Methode bereits vorhanden sind. Durch gezielte Ergänzungen – insbesondere bei den Landnutzungsdaten und durch die Verfügbarmachung von Validierungsdaten – könnte die Methode jedoch weiter verbessert und ihre operative Anwendbarkeit deutlich erhöht werden.

6.3 Empfehlungen für die schweizweite Anwendung

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die satellitenbasierte Methode grundsätzlich auf andere Regionen der Schweiz übertragbar ist. Die erfolgreiche Identifikation bekannter Bewässerungsgebiete in den Kantonen Schaffhausen, Zürich und Thurgau (Kapitel 5.3) bestätigt die räumliche Skalierbarkeit des Ansatzes. Dennoch sind für eine regelmäßige, zuverlässige und institutionell verankerte Anwendung weitere Entwicklungsschritte notwendig.

Regionale Validierung: Für die operative Anwendbarkeit in der ganzen Schweiz ist eine gute geografische Abdeckung von Validierungsstudien nötig. Insbesondere sollten ähnliche Studien wie diese in Kantonen mit den höchsten Wassermengen wie dem Wallis (BFS 2024) oder dem Berner Seeland durchgeführt werden. Eine Erweiterung auf nationale Ebene ist möglich, aber es fehlen fundierte Studien für verschiedene Landesteile. Die vorliegende Studie schafft eine methodische Grundlage und zeigt das Potential auf, damit Daten zur Wassernutzung mit verhältnismässig geringem Aufwand über Satelliten schweizweit erhoben werden können.

Empfohlene Schritte für eine schweizweite Implementierung:

1. **Fallstudien für andere Landesteile**, mit Fokus auf Kulturen, welche im Bibertal nicht von zentraler Bedeutung sind (d.h. Wiesenbewässerung, Obstkulturen, Reben). Idealerweise mit georeferenzierten Validierungsdaten, um die Modellparameter systematisch zu optimieren.
2. **Landesweite Anwendung mit Fokus auf eine mehrjährige Studienperiode in der Vergangenheit.** Die Stärke der Satellitenmethode zeigt sich vor allem durch die einfache Anwendbarkeit auf grosse Gebiete, und die Unsicherheiten für einzelne Jahre werden durch einen mehrjährigen Untersuchungszeitraum ausgeglichen (siehe Anteil bewässerter Nutzungsfläche pro Gemeinde 2018–2024, Abbildung 16).
3. **Operative Anwendung (laufendes Monitoring) auf die ganze Schweiz.** Dieser Schritt wird möglich sein, sobald weitere hochaufgelöste Satellitenprodukte zu Landoberflächentemperaturen verfügbar sind. Mit den geplanten Starts von [TRISHNA](#) (2026) und [LSTM](#) (voraussichtlich 2029) sowie der bereits operierenden [ECOSTRESS](#)-Mission werden künftig täglich hochaufgelöste

Landoberflächentemperaturen erfasst. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung gegenüber der heutigen Situation dar und wird die Grundlage für ein operatives, schweizweites Bewässerungsmonitoring auf Grundlage von Satellitendaten schaffen.

Integration in ein gesamtheitliches Konzept: Die satellitenbasierte Methode sollte als Ergänzung zu bestehenden Ansätzen verstanden werden – nicht als Ersatz. Eine Kombination mit Modellierungsansätzen (wie jenen von Agroscope), kantonalen Erhebungen und punktuellen Messungen kann zu einem robusteren Gesamtbild führen. Dabei sollten die jeweiligen Stärken genutzt werden: Satellitendaten liefern objektive, flächendeckende Informationen zur tatsächlichen Bewässerungstätigkeit, während Modelle den potenziellen Bedarf abschätzen und kantonale Erhebungen lokales Expertenwissen einbringen.

Langfristig könnte ein hybrides System entstehen, in dem Satellitendaten zur Identifikation von Bewässerungs-Hotspots und zur Erfassung interannueller Trends dienen, während gezielte Felderhebungen und Messungen dort eingesetzt werden, wo präzise Informationen auf Betriebsebene erforderlich sind.

7 Danksagung

Wir danken dem BAFU für die Finanzierung dieses Projektes. Unser besonderer Dank gilt Dr. Petra Schmocker-Fackel und Dr. Fabia Hüsler vom BAFU für die kompetente Begleitung und Unterstützung. Tiefbau Schaffhausen danken wir herzlich für die Bereitstellung der Daten aus dem Bibertal sowie für ihre stete Verfügbarkeit zur Beantwortung fachlicher Fragen und für die konstruktive Zusammenarbeit. Für die enge Zusammenarbeit im Rahmen des Vorgängerprojektes im Kanton Thurgau danken wir Lina Tyroler vom Amt für Umwelt Kanton Thurgau für die engagierte Begleitung, Walter Koch von Rathgeb BioProdukte AG für das Teilen seines Expertenwissens im Bereich Landwirtschaft und Bewässerung, sowie Andreas Kaiser und seinem Team an der HAFL für die Bereitstellung von Informationen zur Praxisbewässerung in der Broye-Region.

8 Verfügbarkeit der Codes

Die in dieser Studie entwickelten Python-Codes zur Analyse der Satellitendaten und zur Modellierung des Bewässerungswasserverbrauchs sind öffentlich zugänglich und werden auf GitHub bereitgestellt. Der Zugriff erfolgt über: <https://github.com/hydro-solutions/irrigation-mapper-Switzerland/>

9 Literaturverzeichnis

- Agroscope (Hrsg.), Baumgartner T, et al (2025) SwissIrrigationInfo: Modellbasierte Schätzungen des Wasserverbrauchs für Bewässerung in der Schweiz. Agroscope Sci 212: <https://doi.org/10.34776/AS212G>
- BFS (2024) Landwirtschaftliche Betriebszählung 2023 – Zusatzerhebung Herbst 2023. Bundesamt für Statistik, Neuenburg
- BLW (2024) Leitfaden Bewässerung. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern
- Bundesrat (2021) Wasserversorgungssicherheit und Wassermanagement - Grundlagenbericht. Bericht in Erfüllung des Postulats Rieder (18.3610). Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern
- HAFL (Hrsg.), Pestoni A, et al (2023) Datengrundlage und künftige Datenerfassung zur landwirtschaftlichen Bewässerung in der Schweiz Projekt «Swiss Irrigation Info»: Schlussbericht Modul 1. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen
- Hirschi M, Michel D, Lehner I, Seneviratne SI (2017) A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration. Hydrol Earth Syst Sci 21:1809–1825. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1809-2017>
- hydrosolutions GmbH (2024) Abschätzung der bewässerten Fläche im Kanton Thurgau pro Gemeinde mit Fernerkundungsdaten. hydrosolutions GmbH, Zürich
- Karimi P, Bongani B, Blatchford M, Fraiture C de (2019) Global satellite-based ET products for the local level irrigation management: An application of irrigation performance assessment in the Sugarbelt of Swaziland. Remote Sens 11. <https://doi.org/10.3390/rs11060705>
- Lazaro N (2024) Estimating Blue Water Consumption in Swiss Agriculture Using Global ET Data. Master Project Thesis - ETH Zürich, Zürich
- Onačillová K, Gallay M, Paluba D, et al (2022) Combining Landsat 8 and Sentinel-2 Data in Google Earth Engine to Derive Higher Resolution Land Surface Temperature Maps in Urban Environment. Remote Sens 14:4076. <https://doi.org/10.3390/rs14164076>
- Ragetti S, Herberz T, Siegfried T (2018) An Unsupervised Classification Algorithm for Multi-Temporal Irrigated Area Mapping in Central Asia. Remote Sens 10:1–23. <https://doi.org/10.3390/RS10111823>

-
- Ragettli S, Kreiner A, Yakovlev A, et al (2024) Unraveling Agricultural Water Use in Three Central Asian Irrigation Oases Using Remote Sensing. *Rev J Hydrol Reg Stud*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4866233>
- Rosa L, Ragettli S, Sinha R, et al (2024) Regional irrigation expansion can support climate-resilient crop production in post-invasion Ukraine. *Nat Food* 5:684–692. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-01017-7>
- Sanz D, Calera A, Castaño S, Gómez-Alday JJ (2016) Knowledge, participation and transparency in groundwater management. *Water Policy* 18:111–125. <https://doi.org/10.2166/wp.2015.024>
- Thurgau (2017) Pilotprojekt Anpassung an den Klimawandel: Entwicklung von Instrumenten zur Früherkennung und von Lösungsansätzen für die Thurgauer Land- und Ernährungswirtschaft beim Umgang mit Wasserknappheit. Amt für Umwelt Kanton Thurgau, Landwirtschaftsamt Kanton Thurgau, Frauenfeld
- Warm Winter 2020 Team, ICOS Ecosystem Thematic Centre (2022) Warm Winter 2020 ecosystem eddy covariance flux product for 73 stations in FLUXNET-Archive format—release 2022-1

Anhang 1: Technische Details zur Implementierung des Ansatzes des maschinellen Lernens

Sampling im Random-Forest-Algorithmus

Die Trainingsdaten (30-m Pixelwerte) werden zufällig innerhalb der jeweiligen Trainings-Polygonen ausgewählt. Insgesamt werden 10'000 Stichproben berücksichtigt. Um sicherzustellen, dass die Stichproben räumlich gleichmässig verteilt sind, wird das Untersuchungsgebiet in ein regelmässiges 10 x 10 km Raster (Grid) unterteilt. Aus jeder Gitterzelle werden proportional gleich viele Pixel entnommen. Auf diese Weise wird verhindert, dass Regionen mit einer besonders grossen Anzahl an Referenzflächen (z. B. Weiden im Zürcher Oberland, siehe Abbildung 5) das Modell überproportional beeinflussen. Dadurch bleibt die räumliche Repräsentativität der Trainingsdaten gewährleistet.

Auswahl der Referenzflächen

Für das Sampling werden nur Polygone verwendet, die eine Mindestfläche von 1 ha aufweisen. Zudem wird ein innerer Puffer von 15 m berücksichtigt, damit keine gemischten Pixel an den Rändern der Polygone ausgewählt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass ausschliesslich homogene Flächen mit klarer Nutzungsklassifikation in das Training einfließen und potenziell fehlerhafte Pixel ausgeschlossen werden.

Erkennung von Messrauschen (Noise Detection)

Zur Erkennung von Ausreissern werden 10 000 zufällige Pixel gesammelt, die nicht für das Training des Modells verwendet wurden. Für jede Nutzungskategorie (Weiden, Mais, Zuckerrüben und Kunstwiesen) und jede Dekade wird mit diesen Pixeln ETgreen modelliert. Anschliessend wird pro 10 km Grid der Median und der Median Absolute Deviation (MAD) der Abweichungen berechnet. Der Residualwert wird nach folgender Formel berechnet:

$$residual = median_abs_res + MAD \times 2.4387$$

Der gewählte Multiplikationsfaktor (2.4387) in der Formel stellt sicher, dass rund 90 % der Werte innerhalb dieses Grenzbereichs liegen. Diese Methode dient der Unterscheidung zwischen Rauschen und Signal. Sie ermöglicht, zufällige Messfehler zu identifizieren und vom eigentlichen Bewässerungssignal zu trennen.

Potenzielle Evapotranspiration (ETc) und Berechnung der ETa/ETc-Verhältnisse

Die potenzielle Evapotranspiration (ETc) dient als Referenzgrösse zur Berechnung der ETa/ETc-Verhältnisse. Die verfügbaren Daten der Satellitenprodukte zur potenziellen Evapotranspiration von Alfalfa-Referenzgras werden mit den Crop-Koeffizienten (Kc-Werten) für Weiden angepasst (Tabelle 8), um die ETa/ETc-Verhältnisse über Weiden gemäss Landnutzungsflächen zu erhalten.

Tabelle 8. Crop-Koeffizienten (*K_c*) für Weiden nach Monat und Dekade. Quelle: [FAO Aquastat](#).

Dekade (Monat.Dekade)	K _c (Weiden)
05.D1	0.85
05.D2	0.85
05.D3	0.86
06.D1	0.88
06.D2	0.88
06.D3	0.91
07.D1	0.92
07.D2	0.94
07.D3	0.95
08.D1	0.94
08.D2	0.94
08.D3	0.94
09.D1	0.95
09.D2	0.95
09.D3	0.95

Aggregation auf Feldebene

Nach der Modellierung von ET_{green}, ET_a/ET_c und der Berechnung von ET_{blue} werden die Pixelwerte auf Feldebene aggregiert. Für jedes Feld (entsprechend den Polygonen der Nutzungsflächen) wird der Medianwert auf Basis der 30 m-Pixel pro Dekade (Mai bis September) berechnet. Liegt der Median des ET_a/ET_c-Verhältnisses über dem definierten Schwellenwert (**ET_a/ET_c Schwellenwert**, siehe Tabelle 6), wird ET_{blue} auf null gesetzt. Die zeitliche Entwicklung der dekadischen ET_a/ET_c-Verhältnisse für die bewässerungswürdigen Nutzungsflächen im Bibertal ist in Abbildung 21 dargestellt.

Für jedes Feld wird der zulässige **Residualwert** berechnet. Anschliessend werden monatliche ET_{blue}-Werte aggregiert, wobei nur Werte berücksichtigt werden, die über dem Residual liegen. Felder, deren maximaler monatlicher ET_{blue}-Wert den Schwellenwert (**ET_{blue} Schwellenwert**, siehe Tabelle 6) überschreitet, werden als bewässert klassifiziert. Der saisonale ET_{blue}-Wert ergibt sich als Summe der dekadischen ET_{blue}-Werte dieser Felder. Der Residualwert wird in dieser Endsumme nicht mehr berücksichtigt.

Vegetationsperiode und Zeitfilterung

Die Vegetationsperiode wird für jedes Feld auf Basis der NDVI-Zeitreihe bestimmt. Als Schwellenwert wird ein NDVI von 0.3 verwendet. Die Vegetationsperiode beginnt 15 Tage bevor dieser Schwellenwert überschritten wird und endet, sobald der NDVI wieder unter 0.3 fällt. Der Medianwert des Beginns und des Endes der Vegetationsperiode pro Feld wird verwendet, um sicherzustellen, dass ET_{blue} nur während der aktiven Wachstumsphase berechnet wird. Monate ausserhalb der Vegetationsperiode werden für die Berechnung von ET_{blue} ausgeschlossen.

Handhabung von Dekaden ohne Daten

In Fällen, in denen keine Satellitenbilder verfügbar sind (z. B. durch Bewölkung, insbesondere bei Landsat), werden keine Interpolationen durchgeführt. Für diese Zeitabschnitte wird **ET_{blue} = 0** gesetzt. Dadurch wird vermieden, dass künstliche Werte in die Analyse einfließen und die resultierenden Bewässerungsabschätzungen verzerren.

Anhang 2: Ergänzende Abbildungen

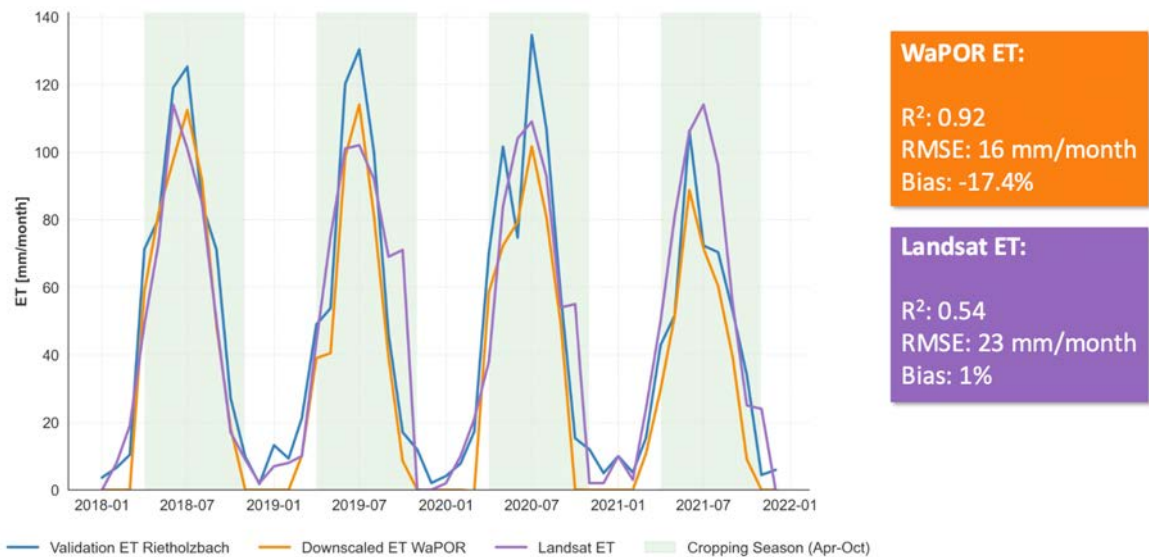


Abbildung 18. Monatliche Evapotranspiration gemessen von der Lysimeter Station in Rietholzbach – Sankt Gallen, und gemäss den beiden Satelliten-basierten Produkten (WaPOR und Landsat ET). Referenz Lysimeterdaten: [Hirschi et al. \(2017\)](#). Abbildung aus [hydrosolutions GmbH \(2024\)](#).

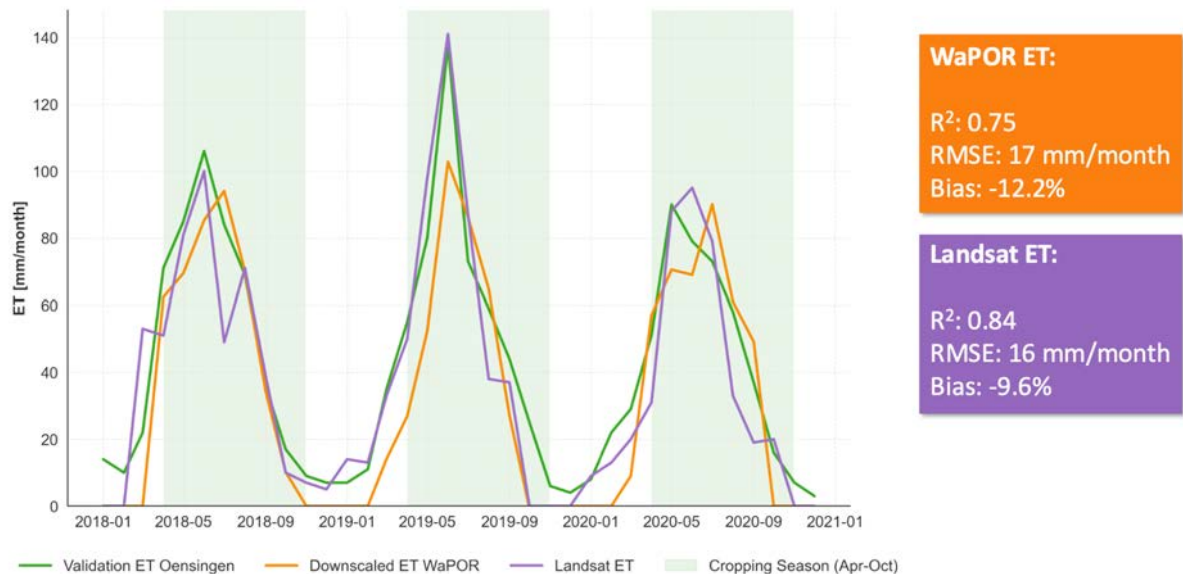


Abbildung 19. Monatliche Evapotranspiration gemessen von der FluxNet Station in Oensingen – Solothurn, und gemäss den beiden Satelliten-basierten Produkten (WaPOR und Landsat ET). Referenz FluxNet Daten: [Warm Winter 2020 Team and ICOS Ecosystem Thematic Centre \(2022\)](#). Abbildung aus [hydrosolutions GmbH \(2024\)](#).

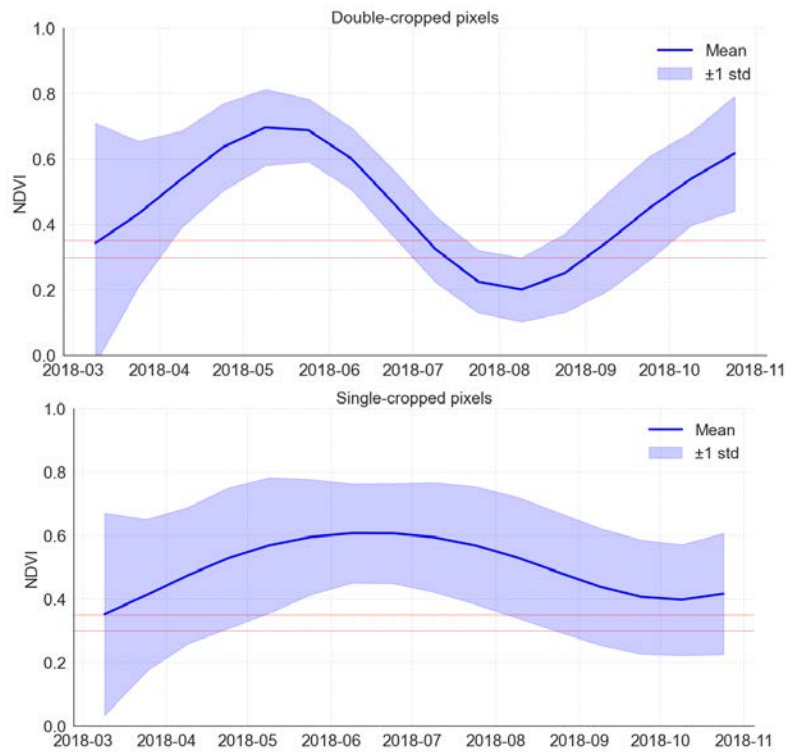


Abbildung 20: Beispiel einer Doppelkultur (oben; zwei Ernten) und einer Einzelkultur (unten) gemäss NDVI Vegetationsindex. Abbildung aus [Lazaro 2024](#).

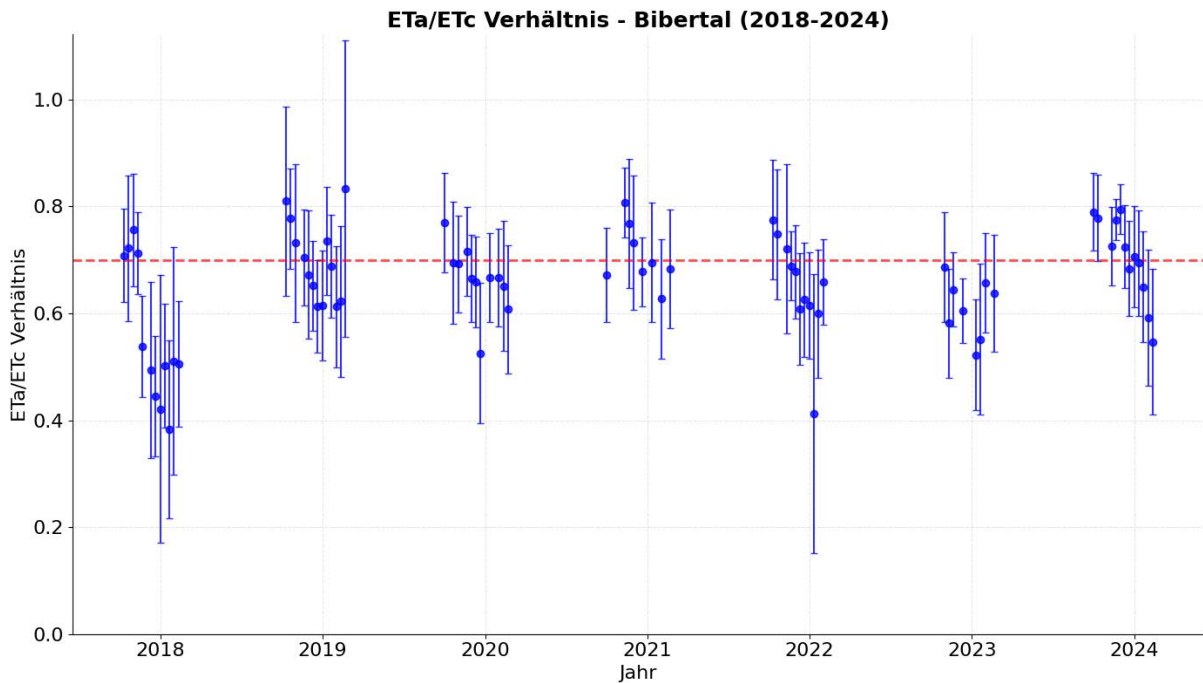


Abbildung 21. Zeitliche Entwicklung des modellierten ET_a/ET_c -Verhältnisses im Bibertal (2018–2024), dargestellt als dekadische Mittelwerte mit Standardabweichung für jede Dekade mit verfügbaren Landsat-Satellitenbildern. Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden aus auf Feldebene aggregierten Werten der bewässerungswürdigen Nutzungsflächen im Bibertal berechnet. Werte unterhalb des definierten ET_a/ET_c -Schwellenwerts (gestrichelte Linie; Tabelle 6) deuten auf Wasserstressbedingungen hin.

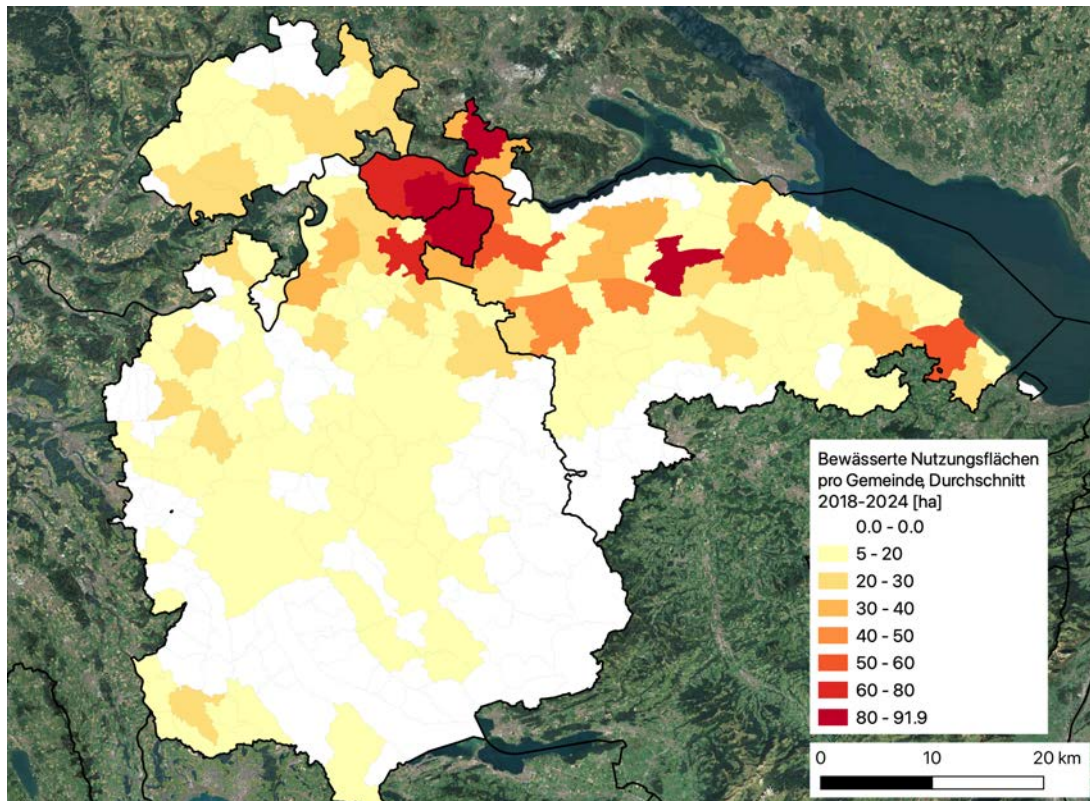


Abbildung 22. Durchschnittlich bewässerte Fläche pro Gemeinde (2018–2024) in den Kantonen Zürich, Thurgau und Schaffhausen. Basiskarte: Google Satellite.

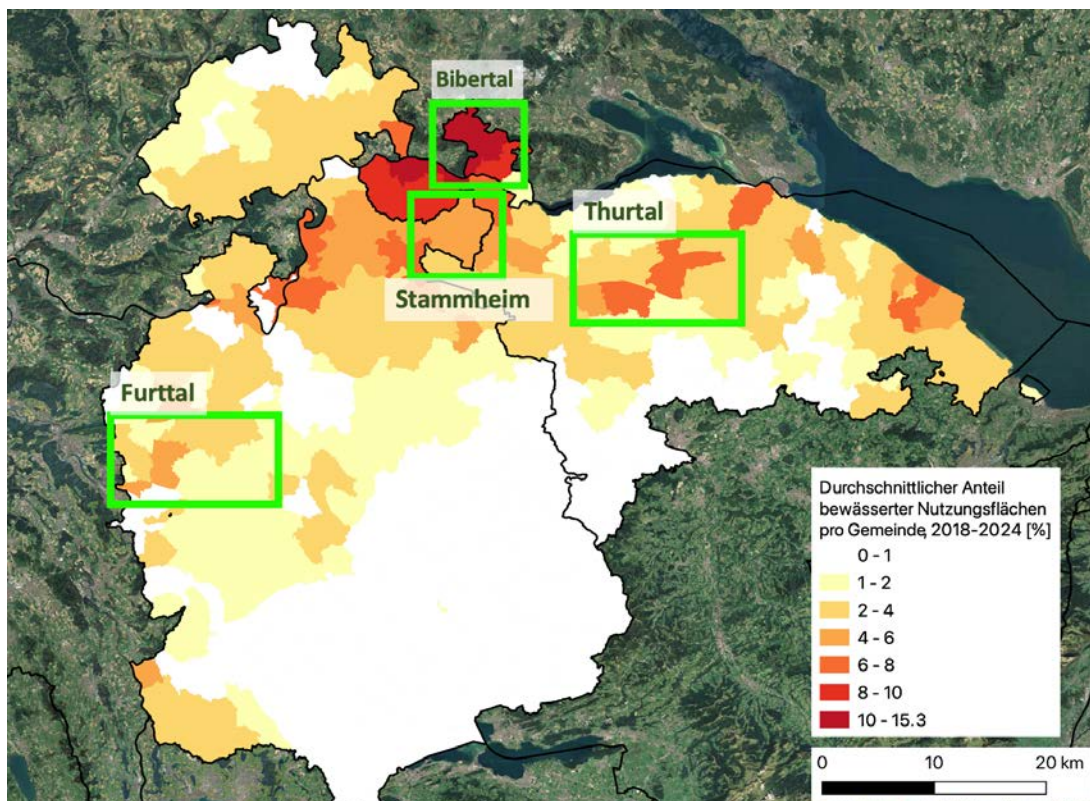


Abbildung 23. Durchschnittlicher Anteil bewässerter Nutzungsfläche pro Gemeinde (2018–2024) in den Kantonen Zürich, Thurgau und Schaffhausen. Grün markiert sind ausgewählte Gebiete mit dokumentierter Bewässerung. Basiskarte: Google Satellite.