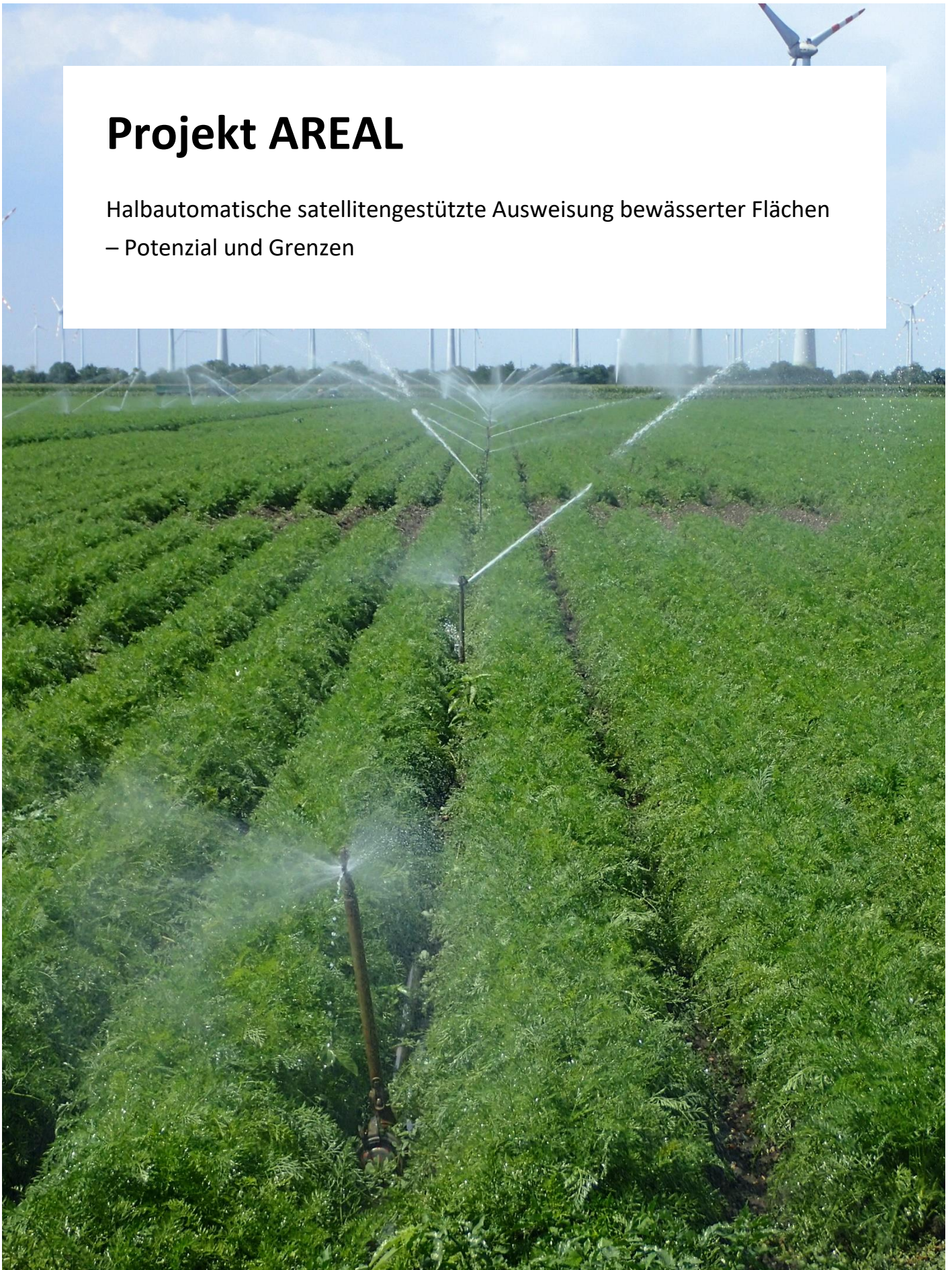


Projekt AREAL

Halbautomatische satellitengestützte Ausweisung bewässerter Flächen
– Potenzial und Grenzen



Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft,
Stubenring 1, 1010 Wien

Autorinnen und Autoren: Heike Brielmann, Martin Neuwirth, Isabella Greimeister-Pfeil,
Thomas Rosmann, Markus Ausserleitner, Harald Loishandl-Weisz, Helga Lindinger,
Johannes Grath, Gebhard Banko, Vito Satrapa (alle: Umweltbundesamt GmbH)

Projektkoordination: Ernst Überreiter, Manfred Clara (BML)

Fotonachweis: Elisabeth Stadler/Umweltbundesamt (S. 1); BML/Paul Gruber (S. 3); Markus
Ausserleitner/Umweltbundesamt (S. 47)

Wien, 2022.

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind
ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger
Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der
Autorin / des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche
Meinung der Autorin / des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen
Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Vorwort



Mag. Norbert Totschnig, MSc

Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen wird zur Ertragssicherung und Effizienzsteigerung der Produktion eingesetzt. Während die Landwirtschaft weltweit für 70 % der Wassernutzungen verantwortlich ist, beträgt der Anteil der Bewässerung am gesamten Wasserbedarf hierzulande lediglich rund 2,3 %. Allerdings ist die Bewässerung auf wenige Regionen Österreichs konzentriert und kann dort einen Großteil der Nutzungen des verfügbaren Wasserangebots ausmachen. Durch die Auswirkungen des Klimawandels wird sich der landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf bis zum Jahr 2050 annähernd verdoppeln. Gleichzeitig nehmen die Grundwasserressourcen tendenziell ab.

Versorgungssicherheit der österreichischen Bevölkerung mit Lebensmitteln und Trinkwasser hat für mich oberste Priorität. Voraussetzung ist in beiden Fällen eine nachhaltige Bewirtschaftung unserer Wasserressourcen. Dafür benötigen wir die bestmöglichen verfügbaren Daten.

In der Digitalisierung von Prozessen steckt erhebliches Potenzial. Methoden zur satellitengestützten Kartierung von Bewässerungsflächen können uns dabei helfen, den Bewässerungsbedarf besser abzuschätzen. Mit dem vorliegenden Projekt AREAL wurde ein bedeutender Schritt gesetzt, um frei verfügbare Satellitendaten für Anwendungen in der Landwirtschaft und der Wasserwirtschaft nutzbar zu machen. Das Ergebnis des Projekts trägt als wichtiger Baustein zur Erhöhung der Versorgungssicherheit in Österreich bei.

Norbert Totschnig
Bundesminister

Inhalt

Vorwort	3
Danksagung	6
1 Zusammenfassung	7
2 Ausgangslage und Ziel	11
2.1 Ausgangslage	11
2.2 Ziel und Projektinhalt.....	15
3 Einleitung	17
4 Material und Methoden	23
4.1 Testgebiet	23
4.1.1 Marchfeld.....	23
4.1.2 Zissersdorf.....	26
4.2 Datengrundlagen	27
4.2.1 Wetterdaten	27
4.2.2 Betriebliche Bewässerungsbewilligungen	28
4.2.3 Schlagnutzungen.....	28
4.2.4 Erdbeobachtungsdaten.....	29
4.2.5 Daten zur Bodenfeuchte.....	33
5 Vorauswahl	34
5.1 Bewässerungsgebiete	34
5.2 Bewässerungskulturen.....	37
5.3 Bewässerungszeiträume	41
5.4 Bewässerungstechniken	42
5.5 Vorauswahl – Fazit.....	42
6 Referenzdatenerhebung	44
6.1 Betriebliche Bewässerungsbewilligungen	46
6.2 Vor-Ort-GIS-Kartierungen	46
6.3 Aufzeichnungen	49
6.4 Luftbilder.....	49
6.5 Weitere Aufbereitung der Referenzdaten.....	51
6.6 Repräsentativität der Referenzdaten für den Grundwasserkörper Marchfeld.....	52
7 Satellitengestützte Detektion von Bewässerungsereignissen	55
7.1 Standort Landwirtschaftliche Fachschule Obersiebenbrunn	55
8 Satellitengestützte Kartierung bewässerter Flächen	59

8.1 Referenzzeitreihen-Methode	60
8.2 Schrankenwert-Methode.....	67
8.3 Vergleich der Methoden.....	76
9 Diskussion der Ergebnisse.....	80
9.1 Vorauswahl	80
9.2 Satellitendaten.....	81
9.3 Klassifikationsmethoden.....	82
9.4 Referenzdaten.....	83
10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	85
Tabellenverzeichnis.....	88
Abbildungsverzeichnis.....	89
Literatur.....	91
Anhang	97
Abkürzungen.....	99

Danksagung

Unser besonderer Dank für die Unterstützung bei der Durchführung des Projektes gilt Mag. Florian Deissenberger und Dipl.-Ing. Wolfgang Neudorfer vom Kompetenzzentrum Bewässerung bzw. der Betriebsgesellschaft Marchfeldkanal.

Des Weiteren danken wir Dipl.-Ing. Arno Kastelliz von der Landwirtschaftlichen Fachschule Obersiebenbrunn, Dr. Reinhard Nolz vom Institut für Bodenphysik und landeskulturelle Wasserwirtschaft sowie Dr. Francesco Vuolo vom Institut für Geomatik der Universität für Bodenkultur Wien für ihre Beratung und Unterstützung bei der Projektdurchführung.

Wir danken ferner allen landwirtschaftlichen Betrieben und Wassergenossenschaften, die Informationen zur Bewässerung für das Projekt bereitgestellt haben.

1 Zusammenfassung

Die Datenlage zur Ermittlung des jährlichen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Österreich ist aktuell noch unzureichend, wie zuletzt die Ergebnisse des Projektes „Wasserschatz Österreichs“ (BMLRT 2021a, b) zeigten. Das Management der Ressource Wasser erfordert jedoch regelmäßig sowohl räumlich als auch zeitlich detaillierte Daten zur Bewässerung in der Landwirtschaft. Dies ist insbesondere in den niederschlagsarmen, landwirtschaftlich ertragsstarken Bewässerungsgebieten im Osten und Nordosten Österreichs (BMLRT 2021a, b) relevant, wo aufgrund von höheren Temperaturen und Verdunstungsraten sowie Trockenzeiten im Sommerhalbjahr zukünftig mit einem Mehrbedarf an Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung zu rechnen ist.

Satellitendaten finden in der Landwirtschaft mittlerweile verbreitet Anwendung in der Steuerung der Bewirtschaftung (Precision Farming), der Erfassung von Dürre-, Hagel- und Starkregenschäden oder der Dokumentation von Erträgen. Gerade in den letzten Jahren wurden – vor dem Hintergrund der Auswirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf – zunehmend Anstrengungen unternommen, Methoden zur satellitengestützten Kartierung von Bewässerungsflächen und zur Vorhersage bzw. Hochrechnung des Bewässerungsbedarfs zu entwickeln.

Im Gegensatz zur Anwendung in semiariden und ariden Gebieten ist die Entwicklung entsprechender Methoden in Mitteleuropa mit einem höheren Aufwand verbunden bzw. unterliegt höheren Unsicherheiten. Dies liegt an der häufigeren Wolkenbildung und damit verbundenen Datenlücken in den optischen Satellitenaufnahmen, an der schwierigen Unterscheidung von niederschlags- oder bewässerungsbedingten Änderungen der Pflanzenentwicklung oder Bodenfeuchte und an den in Ländern wie Österreich in vielen Gebieten charakteristischen kleinräumigen, heterogenen landwirtschaftlichen Strukturen.

Ziel der Arbeiten

Im Rahmen des gegenständlichen Projektes sollte geprüft werden, ob flächendeckende, kontinuierliche und unabhängig erfasste Satellitendaten zur Landbeobachtung aus dem Copernicus Erdbeobachtungsprogramm der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation ein geeignetes Werkzeug darstellen, um die bestehenden Datenlücken

zum Ausmaß der bewässerten Flächen in Österreich zu füllen und Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in der Landwirtschaft und der wasserwirtschaftlichen Planung beim Management von Grundwasserressourcen zu unterstützen.

Dies beinhaltete die Erhebung von Referenzdaten (Stichproben) tatsächlicher Bewässerungsvorgänge auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Diese bildeten die Datengrundlage für die Entwicklung und Validierung satellitengestützter Methoden zur Ausweisung bewässerter Flächen. Das Potenzial und die Grenzen dieser Methoden werden dargelegt.

Methoden

Die Kartierung bewässerter Flächen auf Basis von Sentinel-Satellitendaten erfordert die Verarbeitung sehr großer, vielfältiger und zum Teil in hoher zeitlicher Auflösung vorliegender Datenmengen (*big data*). Um Speicher- und Rechenkapazitäten, insbesondere zur Verarbeitung der Satellitendaten effizient zu nutzen, erfolgte eine methodische Eingrenzung auf tatsächlich relevante räumliche und zeitliche Daten und landwirtschaftliche Kulturen.

Im vorliegenden Projekt wurde ein Testgebiet in der Region Marchfeld ausgewählt, um in der Bewässerungsperiode 2021 Referenzdaten zu im Über-Kopf-Verfahren beregneten Feldern zu erheben. Fokussiert wurde bei der Stichprobenerhebung auf die Feldfrüchte Getreide, Körnermais, Feldgemüse, Sojabohnen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Luzerne, Raps, Körnererbsen, Silomais und Hirse.

Tatsächlich bewässerte Felder wurden mit Unterstützung von landwirtschaftlichen Betrieben, Bewässerungsgenossenschaften und der Landwirtschaftlichen Fachschule Obersiebenbrunn sowie unter Verwendung von Aufzeichnungen zu Bewässerungsaktivitäten und -bewilligungen, Vor-Ort-GIS-Kartierungen und mittels Luftbildern erfasst. Darüber hinaus wurden INVEKOS-Daten mit den Informationen zu den Feldkulturen auf den jeweiligen Flächen verwendet.

Auf Basis der aktuellen wissenschaftlichen Literatur wurde die Eignung des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) und des normalisierten Differenzwasserindex (NDWI) abgeleitet aus Sentinel-2-Daten sowie die Eignung von Sentinel-1-Rückstreukoeffizienten (VV- und VH-Polarisation) für eine Unterscheidung von bewässerten und nicht bewässerten Flächen getestet.

Ergebnisse

Sentinel-1- und Sentinel-2-Erdbeobachtungsdaten erwiesen sich als grundsätzlich gut geeignet, um landwirtschaftliche Feldfruchtflächen hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus zu klassifizieren und in Karten auszuweisen. Bewässerungseffekte spiegeln sich sowohl im Vegetationsstatus der Nutzpflanzen als auch im Boden- und Pflanzenwassergehalt wider. Der Vegetationsstatus konnte satellitengestützt mittels Sentinel-2-Daten in Form des **normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI)** abgeleitet werden. Sentinel-1-Daten erlaubten zudem Rückschlüsse auf die Bodenfeuchte und den Pflanzenwassergehalt, vor allem auf Basis der Rückstreukoeffizienten (VV- und VH-Polarisation) der vom Sentinel-1-Satelliten ausgesandten und empfangenen Radarwellen.

Der Bewässerungsstatus ausgewählter, bewässerungsrelevanter Feldkulturen im Testgebiet Marchfeld wurde auf Basis von **Referenzzeitreihen** des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (**NDVI**, Sentinel-2) für tatsächlich bewässerte und tatsächlich nicht bewässerte Felder ermittelt. Die mittels **NDVI-Referenzzeitreihen-Methode** als bewässert klassifizierten Flächen repräsentieren für die untersuchten Feldkulturarten die obere Grenze (Maximalvariante) des Ausmaßes der Bewässerungsflächen im Testgebiet Marchfeld. Sie geben die durch Bewässerungseffekte veränderte Vegetationsentwicklung über die Zeit wider. Die Flächen für die **sechs klassifizierten Kulturarten** Körnermais, Speisekartoffeln, Speiseindustriekartoffeln, Saatmaisvermehrung, Zuckerrüben und Sojabohnen wurden ihrem Bewässerungsstatus mit einer Gesamtgenauigkeit von 76,9 % richtig zugeordnet. Die Genauigkeit der Klassifikation des Bewässerungsstatus variierte je Kulturart in Abhängigkeit von der Referenzdatendichte, d.h. der Anzahl der Stichproben.

Ergänzend wurde getestet, ob sich bewässerte und nicht bewässerte Felder auch mittels **über den Bewässerungszeitraum gemittelten** bewässerungssensitiven Sentinel-2-Indizes (NDVI, NDWI) und Sentinel-1-Variablen (VV- und VH-Rückstreukoeffizienten) unterscheiden lassen. Kulturartenabhängig erwiesen sich auch die zeitlich gemittelten Sentinel-Variablen und -indizes als empfindlich gegenüber Bewässerungsaktivitäten, sodass statistische **Schrankenwerte** für eine Klassifizierung des Bewässerungsstatus ermittelt werden konnten. Je nach Kulturart wurden bis zu vier Variablen (NDVI, NDWI, VV und VH) für die Bestimmung des Bewässerungsstatus herangezogen, und somit die unterschiedlichen Stärken beider Sentinel-Satelliten genutzt. Die **Schrankenwert-Methode** ist dadurch allerdings restriktiver als die Referenzzeitreihen-Methode in der Ausweisung bewässerter Felder. Die mittels **Schrankenwert-Methode** im Testgebiet ausgewiesenen bewässerten Flächen repräsentie-

ren deshalb für die untersuchten Kulturarten die untere Grenze des Flächenausmaßes (Minimalvariante). Nur die **vier Kulturarten** Körnermais, Speiseindustriekartoffeln, Saatmaisvermehrung und Zuckerrüben konnten mit der Schrankenwert-Methode hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus **klassifiziert** werden. Diese wurden aber mit einer hohen statistischen Sicherheit ausgewiesen.

Die kulturartenabhängige Betrachtung ist grundsätzlich Voraussetzung für die satellitengestützte Klassifizierung des Bewässerungsstatus. Auf Basis der Schlagnutzungsinformationen (INVEKOS) lassen sich allerdings Feldern, welche für den Feldgemüsebau genutzt werden, keine spezifischen Feldgemüsekulturen zuordnen. Eine satellitengestützte Ausweisung des Bewässerungsstatus von Gemüsefeldern war deshalb im Projekt nicht möglich. Im Testgebiet wird Feldgemüse fast immer bewässert.

Ausblick

Auf Grundlage der Projektergebnisse werden für eine flächendeckende, satellitengestützte Erhebung tatsächlich bewässerter Flächen in Österreich folgende nächste Schritte empfohlen:

- Verdichtung und Ausweitung der Referenzdatenerhebung auf weitere Bewässerungsperioden und -gebiete sowie bisher nicht berücksichtigte Kulturarten unter Nutzung von Aufzeichnungen, Vor-Ort-Kartierungen und Luftbildern.
- Integration einer Gemüseartenklassifizierung (Hauptgemüsearten).
- Schärfung des Klassifikationsmodells durch Integration weiterer bewässerungssensitiver Satellitenvariablen und -indizes und Erprobung alternativer Klassifizierungsansätze in Abhängigkeit von der Referenzdatendichte.
- Nutzung von ergänzenden Informationen aus Modellen zur Ausweisung von Trockenheit/Trockenstress und Pflanzenwasserbedarf.

2 Ausgangslage und Ziel

Bewässerung ist eine Kulturtechnik zur Ertragssicherung und Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft. Angesichts des Temperaturanstiegs und häufigerer Trockenperioden in Folge des Klimawandels sowie in Folge der Globalisierung und technologischer Veränderungen in der Landwirtschaft ist die Generierung zuverlässiger Daten zum Bewässerungsausmaß und -bedarf essenziell. Die Kenntnis der Verteilung, Ausdehnung und Lage bewässerter Flächen sowie der eingesetzten Wassermengen ist notwendig, um Auswirkungen von Bewässerung auf Grundwasserstände und Abflüsse von Oberflächengewässern zu beurteilen. Entsprechende Daten sind Voraussetzung für ein nachhaltiges und vorsorgendes Management von Wasserressourcen.

2.1 Ausgangslage

Die Datenlage zur Ermittlung des jährlichen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Österreich ist aktuell noch unzureichend, wie zuletzt die Ergebnisse des Projektes „Wasserschatz Österreichs“ (BMLRT 2021a, 2021b) zeigten.

Als **Bewässerungsbedarf** wird das für eine Bewässerung vorzuhaltende Wasservolumen eines Gebietes verstanden.

Das Ausmaß der bewässerten landwirtschaftlichen Flächen und des Wasserbedarfs für die landwirtschaftliche Bewässerung in Österreich kann wetterabhängig über die Jahre stark schwanken, nimmt aber langfristig zu (BMLRT 2021b). Aktuell werden jährlich durchschnittlich 69 Mio. m³ Wasser für die Bewässerung eingesetzt, das sind rund 2,3 % des gesamten Wasserbedarfs von Österreich. Mit Zielhorizont 2050 kann dieser Bewässerungsbedarf, abhängig von stark variierender Witterung, um rund 80 % auf rund 125 Mio. m³ pro Jahr steigen, in Trockenjahren und mit weiterem Ausbau der Bewässerung auf bis zu rund 159 Mio. m³ (BMLRT 2021b).

Integrierte Statistiken landwirtschaftlicher Betriebe werden im Rahmen sogenannter **Agrarstrukturserhebungen (AS)** erfasst. Auf Grundlage der Verordnung (EU) 2018/1091 und der nationalen Agrarstrukturstatistik-Verordnung (BGBl. II Nr. 279/2019 idgF) sammelt die STATISTIK AUSTRIA¹ Merkmale landwirtschaftlicher Betriebe in Österreich. Im Rahmen von Vollerhebungen (einmal pro Dekade) oder Teilerhebungen (zusätzlich alle 3–4 Jahre) werden unter anderem auch Daten zur landwirtschaftlichen Bewässerung erfasst:

Agrarstrukturserhebung 2020 (AS 2020), Erhebungsmerkmale zur Bewässerung:

- Ackerbau: bewässerbare Fläche insgesamt (in Hektar/Ar),
- Feldgemüsebau: tatsächlich bewässerte Feldgemüseflächen in m²; nicht bewässerte Feldgemüseflächen in m²; Grund der Nicht-Bewässerung (Bewässerung nicht notwendig, keine Bewässerungsanlage vorhanden, mangelnde Wasserverfügbarkeit).

Die hierbei erhobenen Daten zur Bewässerung sind für die spezifischen Anforderungen der lokalen oder regionalen wasserwirtschaftlichen Planung nicht immer detailliert genug. Als wichtigste Einschränkung in der Datenlage sind die räumliche und zeitliche Auflösung der Daten und das Fehlen von Bewässerungsmengen zu nennen:

- Die Ergebnisse der Agrarstrukturserhebung stehen auf Ebene der österreichischen Gemeinden zur Verfügung. unternehmens- und personenbezogene Angaben, also die Daten der einzelnen landwirtschaftlichen Betriebe, sind im Sinne der Datenschutz-Grundverordnung (EU 2016), des Datenschutzgesetzes (DSG, BGBl. I Nr. 165/1999 idgF) sowie des Bundesstatistikgesetzes 2000 (BGBl. I Nr. 163/1999 idgF) geheimzuhalten.
- Agrarstatistische Vollerhebungen erfolgen nur einmal pro Dekade, Stichprobenerhebungen etwa alle drei Jahre. Sie stellen damit eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Erhebung auf Ebene der Gemeinden dar. Der Bewässerungsbedarf und das Bewässerungsausmaß können jedoch kleinräumig, jährlich und saisonal stark schwanken, mit entsprechenden Auswirkungen auf lokale oder regionale Wasserressourcen.

¹ [STATISTIK AUSTRIA](https://www.statistik.at)

Fällt der Erhebungszeitraum der Agrarstrukturerhebung (AS) beispielsweise in ein niederschlagsreiches Jahr, wie zum Zeitpunkt der AS-Vollerhebung 2010, wird das Ausmaß des Bewässerungsbedarfs in den aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Planung relevanten Trocken- und Dürreperioden unterschätzt. Die Daten der Vollerhebung 2020 standen zum Zeitpunkt der gegenständlichen Berichtslegung noch nicht zur Verfügung.

Unsicherheiten in der Abschätzung des Bewässerungsausmaßes und Bewässerungsbedarfs auf Basis der statistischen Datengrundlage ergeben sich zudem daraus, dass nur Betriebe über bestimmten Größenschwellen erfasst werden², dass häufig nur bewässerbare, d. h. Flächen mit einer entsprechenden Bewässerungsinfrastruktur, aber nicht tatsächlich bewässerte Flächen gemeldet werden und dass keine Bewässerungsmengen gemeldet werden.

Für langfristige Prognosen liefern Agrarstrukturerhebungen wichtige Hinweise und Daten, für die wasserwirtschaftliche Genehmigungs- und Planungspraxis insbesondere auf regionaler Ebene werden jedoch regelmäßig Daten zu bewässerten Flächen und Bewässerungsmengen mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung benötigt.

Auch im Zusammenhang mit Melde- und Aufzeichnungspflichten werden Daten zur Bewässerung in Österreich erhoben. Die Abwicklung von Marktordnungsprämien und Leistungsabgeltungen als Direktzahlungen an landwirtschaftliche Betriebe im Zuge der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP)³ erfolgt EU-weit nach einheitlichen Vorgaben im Rahmen von INVEKOS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem). In Österreich ist mit der Abwicklung der INVEKOS-Zahlungen (EU-, Bundes- und Landesmittel) die Agrarmarkt Austria (AMA)⁴ betraut. Im Rahmen des AMA-Mehrfachantrags Flächen (MFA) wird auf Betriebsebene – neben schlagbezogenen Angaben zu angebauten Kulturen – erhoben, ob eine behördliche Bewilligung zur Bewässerung vorliegt. Die Daten können analog zur Agrarstrukturerhebung nur in räumlich aggregierter Form weiterverwendet werden. Informationen zu tatsächlich bewässerten Flächen liegen auf diese Weise nicht vor.

Jede landwirtschaftliche Bewässerung erfordert eine wasserrechtliche Bewilligung. Gemäß Wasserrechtsgesetz ist dafür die Bezirkshauptmannschaft zuständig. Bewilligungen für Be-

² [Agrarstrukturerhebung 2020, Fragebogen](#)

³ [Gemeinsame Agrarpolitik](#)

⁴ services.ama.at/servlet

wässerung werden für maximal 25 Jahre erteilt (WRG §21) und in sogenannten Wasserbüchern dokumentiert. Das sind öffentliche Register bewilligungspflichtiger Wassernutzungen entsprechend §124 bis 126 des Wasserrechtsgesetzes (WRG, BGBl. Nr. 215/1959 idgF). Die wasserrechtliche Bewilligung und der Eintrag in das Wasserbuch-Register muss laut §111 und §124 Wasserrechtsgesetz Angaben zum „Maß der zur Benutzung kommenden Wassermenge“ enthalten. Anzugeben ist die bewilligte Höchstwasserentnahme, auch als Spitzenkonsens bezeichnet. Spitzenkonsense sind theoretische Höchstmengen, die kaum dauernd in Anspruch genommen werden. Häufig enthalten Wasserrechtsbescheide deswegen auch Angaben zum Jahreskonsens, der die durchschnittliche Wasserentnahme pro Jahr begrenzt. Das tatsächliche Ausmaß und der tatsächliche Bewässerungsbedarf lässt sich aus den Angaben der Wasserbücher nicht ableiten.

Teilweise müssen Bewilligungsinhabende für landwirtschaftliche Bewässerungen ein Bewässerungsbuch führen und die dokumentierten jährlichen Bewässerungsmengen der jeweiligen zuständigen Behörde übermitteln. Bei Verlängerung bzw. Neubewilligung wird die Einhaltung der Konsensmengen überprüft. Die von den Bewilligungsinhabenden übermittelten Bewässerungsmengen liegen allerdings überwiegend analog vor und stehen damit für eine systematische, österreichweite Auswertung derzeit nicht zur Verfügung (BMLRT 2021a).

Im Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan 2021 (BMLRT 2022) wird für alle Grundwasserkörper der gute mengenmäßige Zustand nach den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie (RL 2000/60/EG) ausgewiesen. Für zwei oberflächennahe Grundwasserkörper besteht jedoch das Risiko, den guten mengenmäßigen Zustand bis 2027 zu verfehlen. Die Nutzungsintensität des Grundwassers, das Verhältnis der Brunnenentnahmen in Relation zur verfügbaren Grundwasserressource, ist regional unterschiedlich ausgeprägt, mit den höchsten Werten im Osten Österreichs. Das Management der Ressource Wasser erfordert regelmäßig sowohl räumlich als auch zeitlich detaillierte Daten zur Bewässerung in der Landwirtschaft. Dies gilt insbesondere für die durch höhere Nutzungsintensitäten geprägten, niederschlagsarmen, landwirtschaftlich ertragsstarken Bewässerungsgebiete im Osten und Nordosten Österreichs (BMLRT 2021a, b). Hier ist aufgrund steigender Temperaturen und Verdunstungsraten sowie Trockenzeiten im Sommerhalbjahr zukünftig mit einem Mehrbedarf an Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung zu rechnen.

Ob flächendeckende, kontinuierliche und unabhängig erfasste Satellitendaten zur Landbeobachtung aus dem Copernicus Erdbeobachtungsprogramm⁵ der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation ein geeignetes Werkzeug darstellen, um die bestehenden Datenlücken zum Ausmaß der bewässerten Flächen in Österreich zu füllen und Entscheidungsträger in der Landwirtschaft und der wasserwirtschaftlichen Planung beim Management von Grundwasserressourcen zu unterstützen, sollte im vorliegenden Projekt getestet werden.

2.2 Ziel und Projektinhalt

Übergeordnetes Ziel des Forschungsvorhabens war es, Potenzial und Grenzen von Fernerkundungsmethoden zur Identifizierung bewässerter Flächen in Österreich aufzuzeigen. Es sollte geprüft werden, inwieweit derartige Methoden Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in der Landwirtschaft und der wasserwirtschaftlichen Planung beim Management von Grundwasserressourcen unterstützen können.

Konkret sollte eine satellitengestützte Methode zur Ermittlung tatsächlich bewässerter Flächen in einer Testregion entwickelt und anhand von Stichprobenerhebungen validiert werden, welche auf der Auswertung von hochaufgelösten Satellitendaten aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (Sentinel-1,-2) und agrarmeteorologischen Daten beruht.

Dazu wurden zunächst der aktuelle Methodenstand zur Ermittlung von Bewässerungsflächen unter Nutzung von Sentinel-Datensätzen und Berücksichtigung relevanter Vorläuferprojekte in Österreich recherchiert (Kap. 3) und die notwendigen Datengrundlagen erhoben (Kap. 4).

Ferner wurden bewässerungsrelevante landwirtschaftliche Gebiete, Kulturen und Zeiträume als Grundlage für die Stichprobenerhebung identifiziert (Kap. 4). Kriterien für die Auswahl von Referenzflächen wurden festgelegt und landwirtschaftliche Betriebe, Versuchsanstalten oder Bewässerungsgenossenschaften als Kooperationspartner für die Stichprobenerhebung kontaktiert (Kap. 6).

⁵ copernicus.eu/de

Satellitendaten wurden aufbereitet und geeignete Variablen extrahiert (Kap. 4.2.4, 8). Anschließend wurden zwei Methoden zur Ausweisung bewässerter Flächen auf Basis von Satellitendaten und im Abgleich mit den erhobenen Referenzdaten getestet (Kap. 8.1, 8.2). Für das Testgebiet und ausgewählte relevante landwirtschaftliche Kulturen und Fruchtarten wurden mittels dieser Methoden bewässerte und nicht bewässerte Flächen ausgewiesen. Unsicherheiten der Methoden sowie Weiterentwicklungsmöglichkeiten wurden beschrieben und Rahmenbedingungen zur Übertragbarkeit auf weitere Zeiträume und Bewässerungsgebiete in Österreich definiert (Kap. 9, 10).

3 Einleitung

Der Einsatz von satellitengestützten Verfahren im Bereich der Landwirtschaft oder der Landüberwachung durchläuft aufgrund neuer Satelliten-Missionen und der ständig wachsenden Datenverfügbarkeit eine rasante Entwicklung und ermöglicht bereits jetzt planungs- und maßnahmenrelevante, flächendeckende Datenerhebungen, die auf anderem Wege nur mit ungleich höherem Aufwand möglich sind. So erlauben auf Basis von Sentinel-2-Satellitendaten erzeugte, räumlich hoch aufgelöste Darstellungen des zeitlichen Verlaufs der Pflanzenentwicklung beispielsweise Aussagen zum Wachstums- und Gesundheitszustand von Pflanzen und Bewirtschaftungshinweise für einzelne Betriebe aber auch eine verbesserte Abwicklung und Erfassung von Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen in Folge von Hagelschlag, Dürre oder Sturm⁶.

Auch grob aufgelöste, globale Informationen zur Bodenfeuchte auf Basis von Sentinel-1-Satellitendaten stehen als wesentlicher Input für Fragestellungen zum Wasserkreislauf und für Wasserbilanzen bereits zur Verfügung⁷ und werden in Hinblick auf eine feinere räumliche Auflösung ständig weiterentwickelt (Bauer-Marschallinger et al. 2019) und auch für die Abschätzung von Bewässerungsmengen (Zappa et al. 2021) getestet.

Gleichzeitig wurden und werden in den letzten Jahren speziell Methoden zur satellitengestützten Kartierung von Bewässerungsflächen (Bazzi et al. 2019; Bousbih et al. 2018; Chen et al. 2018; Gao et al. 2018; Zurqani et al. 2021) und zur Vorhersage (Vuolo et al. 2015) bzw. Hochrechnung des Bewässerungsbedarfs (Brocca et al. 2018) entwickelt, mit größerem Anwendungserfolg in semiariden und ariden Gebieten (Massari et al. 2021; Ozdogan et al. 2010).

In den humiden Gebieten Mitteleuropas bedarf die Entwicklung entsprechender Methoden grundsätzlich eines größeren Aufwands bzw. unterliegt höheren Unsicherheiten. Ursache dafür ist vor allem eine häufigere Wolkenbildung und damit verbundene Datenlücken in den Satellitenaufzeichnungen sowie an der schwierigen Unterscheidung von niederschlags-

⁶ hagel.at

⁷ [Copernicus Climate Change Service \(C3S\), Soil moisture gridded data from 1978 to present](#)

oder bewässerungsbedingten Änderungen in der Pflanzenentwicklung oder Bodenfeuchte (Ozdogan et al. 2010).

Kleinräumige, heterogene landwirtschaftliche Strukturen, wie beispielsweise für viele Regionen Österreichs charakteristisch, sind ebenfalls eine Herausforderung für satellitengestützte Auswertungen, wenn erforderliche räumliche und zeitliche Auflösungen (noch) nicht erreicht werden können.

Massari et al. (2021) fassen in einem Rückblick die relevanten Methoden zur Ausweisung von Bewässerungsflächen, zur Detektion von Bewässerungsereignissen und zur Quantifizierung des Bewässerungsbedarfs auf Basis von Satellitendaten zusammen. Im Wesentlichen lassen sich drei satellitenbasierte Datengruppen zur Kartierung oder Quantifizierung von Bewässerung unterscheiden: (i) optische und Nah-Infrarotdaten, (ii) Radardaten und (iii) gravimetrische Daten. Satellitendaten werden insbesondere für eine Quantifizierung des Bewässerungsbedarfs häufig mit Landoberflächenmodellen (land surface models, LSMs) oder Wasserbilanzen kombiniert.

Die Erfassung von optischen und Nah-Infrarotdaten (VIS-NIR, *visible- and near-infrared*) erlaubt über empirisch abgeleitete Vegetationsindizes wie z. B. den normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI, *normalized difference vegetation index*) die Detektion von Änderungen im Vegetationsstatus, der Pflanzengesundheit und dem Wassergehalt und kann demzufolge auch für die Identifizierung von bewässerten Flächen genutzt werden. Landoberflächentemperaturen oder Evapotranspiration lassen sich ebenfalls auf Basis von VIS/NIR-Daten ableiten.

Die nachfolgende Aufzählung gibt eine Übersicht über aktuell verfügbare VIS-NIR-Satelliten-Sensor-Kombinationen zur Kartierung von Bewässerungen auf Basis des NDVIs und die jeweils erreichten räumlichen Auflösungen (Massari et al. 2021):

- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), NOAA-17-Mission (2002–2013), US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Auflösung ca. 1 km;
- Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Terra (1999) und Aqua (2002) Missionen, US National Aeronautics and Space Administration, Auflösung ca. 500 m;
- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), Envisat-Mission (2002–2012), EU European Space Agency (ESA), Auflösung ca. 250 m;

- Operational Land Imager (OLI)/Thermal Infrared Sensor (TIRS), Landsat 4-7, Landsat-8-Mission, US National Aeronautics and Space Administration (NASA) / United States Geological Survey (USGS), Auflösung ca. 30 m;
- Multispectral imager (MSI), Sentinel-2 A/B Missionen (2015/2017), EU European Space Agency (ESA), ca. 10, 20 oder 60 m.

Für die Kartierung von Bewässerungsflächen wird bei der Verwendung von optischen und Nah-Infrarotdaten (z. B. Sentinel-2) die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit bewässerter und nicht bewässerter Flächen genutzt. Die Unterscheidung kann durch ergänzende Klassifizierungen nach agrarökologischen oder naturräumlichen Gebieten oder nach Kulturarten und Pflanzenwasserbedarfsfaktoren verbessert oder durch meteorologische Daten zur Evapotranspiration und zum Niederschlag ergänzt werden.

Ein weiterer Ansatz basiert auf der Erfassung von Radardaten (Mikrowellensensoren), welche über die gemessenen Rückstreukoeffizienten (siehe Kap. 4.2.4) Aussagen über den Bodenwassergehalt und die Abschätzung der oberflächennahen Bodenfeuchte erlaubt. Kann zwischen Niederschlags- und Bewässerungsereignissen und ihrem Einfluss auf die Sentinel-1-Daten bzw. die daraus ermittelte Bodenfeuchte unterschieden werden, zum Beispiel durch eine gleichzeitige Analyse von Daten auf der räumlichen Skala der Parzelle oder des Schlags (*fieldscale*) im Vergleich zu einer gröberen, regionalen Skala für eine spezifische Kulturart (*cropscale*), können bewässerte und nicht bewässerte Flächen mittels Radardaten identifiziert werden. Das Gelingen einer derartigen Bewässerungskartierung ist dabei von Faktoren wie z. B. den eingesetzten Bewässerungstechniken, angebauten Kulturarten, verfügbaren Referenzdaten und erreichten räumlichen und zeitlichen Auflösungen abhängig.

Die nachfolgende Aufzählung gibt eine Übersicht über aktuell verfügbare satellitenbasierte Radardaten zur Kartierung von Bewässerungen auf Basis von Bodenfeuchteinformationen und die jeweils erreichten räumlichen Auflösungen (Massari et al. 2021):

- Global Change Observation Mission – Water (GCOM-W), 2012, Japan Aerospace Exploration Agency, Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2), Auflösung ca. 25 km;
- Multisatellitenprodukt ESA-CCI, EU European Space Agency (ESA), räumliche Auflösung: 0.25° x 0.25°;
- Metop Missionen, European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), Advanced Scatterometer (ASCAT), Auflösung ca. 0.1° x 0.1°;

- Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission, 2015–2015, US National Aeronautics and Space Administration (NASA), L-band Radar und Radiometer, Auflösung ca. 1–9 km;
- Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) Mission, 2009, EU European Space Agency (ESA), Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS), Auflösung ca. 1 km;
- C-Band-SAR (Synthetic Aperture Radar), Sentinel-1 A/B Missionen (2014/2016), EU European Space Agency (ESA), ca. 500 m (TU Wien S1 Bodenfeuchte) bzw. ca. 1 km; Rückstreuoeffizienten des Radars mit einer Auflösung von 9–40 m.

Die räumliche Auflösung der aus Satellitendaten abgeleiteten Bodenfeuchteprodukte liegt damit derzeit noch häufig über der Feldskala einer kleinräumigen Landwirtschaft, die Rückstreuoeffizienten des Radars selbst (siehe Kap. 4.2.4) liefern aber ihrerseits ebenfalls bereits Informationen über den Bodenwassergehalt und können kleinskaliger – auf Feldebene – für eine Unterscheidung von bewässerten und nicht bewässerten Flächen genutzt werden, wie das gegenständliche Projekt zeigt.

Ein weiterer Ansatz – basierend auf Daten der *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE)-Missionen – macht sich die Messung des Erdschwerefeldes und gravimetrischer Daten und die daraus abgeleiteten Änderungen in den Grundwasservolumina und -massen zunutze, zielt also direkt auf den Quantitätsaspekt ab. Die räumliche und zeitliche Auflösung dieser Daten limitiert den Ansatz aber bisher auf überwiegend sehr große Gebiete oder Gebiete mit zum Teil extremen Grundwasserschwankungen (Landerer et al. 2020; Rodell et al. 2018).

Für eine erfolgreiche Identifizierung von Bewässerungsflächen werden die verschiedenen Datengruppen auch kombiniert (Bazzi et al. 2020; Le Page et al. 2020) und da mit den Satellitendaten sehr große, vielfältige und zum Teil in hoher zeitlicher Auflösung vorliegende Datenmengen (big data) verarbeitet werden, kommen häufig Techniken des Maschinellen Lernens (Machine Learning) zum Einsatz. Hierbei werden überwachte (*supervised*) und nicht-überwachte (*unsupervised*) Verfahren unterschieden. Erstere, wie beispielsweise Entscheidungsbäume (z. B. Klassifikations- und Regressionsbäume, *Random Forest* etc.) werden für die Mustererkennung, also z. B. für die Unterscheidung von bewässerten und nicht bewässerten Flächen, anhand von entsprechenden Referenzdaten (Stichproben) trainiert.

Unüberwachte Verfahren werden entwickelt, um derartige Muster auch ohne oder mit weniger zusätzlichen Referenzdaten erkennen zu können. Für das im Osten Österreichs gelegene Marchfeld wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Deissenberger 2021) eine derartige, nicht-überwachte (unsupervised) Methode auf Basis von Sentinel-2-Datensätzen zum Monitoring von bewässerten Flächen in einem Teilgebiet des Marchfelds getestet und erreichte in der Erkennung tatsächlich bewässerter Flächen eine Genauigkeit von ca. 70 % bei einer räumlichen Auflösung von ca 20 m.

Globale Karten zum Bewässerungsausmaß (Siebert et al. 2005) greifen häufig auf statistische Erhebungen oder Informationen zur Bewässerungsinfrastruktur zurück und repräsentieren damit eher bewässerbare, als tatsächlich bewässerte Flächen. Erste Ansätze zu einer flächendeckenden satellitengestützten Ausweisung von bewässerten Flächen gibt es beispielsweise in Form der *Global Irrigated Area Map (GIAM)* für das Jahr 2000 (Thenkabail et al. 2009). Die räumliche Auflösung beträgt für Europa 10 km und liefert damit für Österreich keine verwertbaren Informationen. Allerdings wird aktuell intensiv an der Entwicklung von (kommerziellen) Produkten gearbeitet, die sich die Erdbeobachtungsdaten der Copernicus-Satelliten Sentinel-1 und/oder Sentinel-2 zunutze machen und für den Landwirtschaftssektor anstreben, prioritär die Frage nach der Bewässerungsbedürftigkeit (wieviel sollte bewässert werden?) aber auch die Fragen nach dem Bewässerungsausmaß (wo wird bewässert?) und nach der Bewässerungsmenge (wieviel wird bewässert?) zu beantworten. Beispielhaft genannt seien hier der EO4Water-Service der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) oder das in Entwicklung begriffene Startup SPACE-IRR, neben etlichen anderen.

Eine **Bewässerungsbedürftigkeit** besteht, wenn der Kulturpflanzenwasserbedarf größer ist als die für die Kulturpflanze verfügbare Wassermenge. Die bodenabhängigen und fruchtartenspezifischen Ertragspotentiale einer Kulturpflanze können aufgrund von Wasserstress nicht ausgeschöpft werden. Die Bewässerungsbedürftigkeit hängt somit von der klimatischen Wasserbilanz, der Speicherfähigkeit der Böden, der Topografie, der Menge und Qualität des vorhandenen Wassers sowie der angebauten Kulturart am betrachteten Standort ab.

Eine **Bewässerungswürdigkeit** ist gegeben, wenn die berechnungsbedingten Mehrkosten durch Erntemehrerlöse überschritten werden. Die Bewässerung ist wirtschaftlich. Dabei sind nicht zwangsläufig die Kosten für die Beregnung selbst ausschlaggebend. Auch wenn kein Wasserstress vorliegt, kann eine Bewässerung zur Minderung des Produktionsrisikos oder zur Erleichterung des Produktionsprozesses – beispielsweise im Gemüseanbau – sinnvoll und wirtschaftlich sein.

Während insbesondere die Informationen zur **Bewässerungsbedürftigkeit** durch vorhandene hoch aufgelöste Wetterdaten, Bodenfeuchteinformationen und in Kombination mit Satellitendaten in etlichen Regionen bereits verfügbar sind – in Bayern (D) beispielsweise über eine Bewässerungs-App oder im Marchfeld über den EO4Water-Service der BOKU – ist die flächendeckende Erfassung **tatsächlich bewässerter Flächen** nach wie vor schwierig, da hier neben Faktoren der **Bewässerungswürdigkeit** vor allem die vorhandene Bewässerungsinfrastruktur und die praktische Umsetzung des Bewässerungsvorgangs durch die jeweiligen Landwirtinnen und Landwirte eine entscheidende Rolle spielt.

Quantitative Aussagen zum Bewässerungsbedarf werden zukünftig, so lange tatsächliche Entnahmemengen (z. B. durch Aufzeichnungspflichten) nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen, durch die Kombination von Daten zum Bewässerungsausmaß (Flächen) und von Daten zur Bewässerungsbedürftigkeit möglich. Letztere können aus empirischen Kennzahlen oder Modellen zum Kulturpflanzenwasserbedarf (z. B. ARIS – Trockenheitsmonitoring- und Vorhersagesystem) oder beispielsweise aus Informationen zur klimatischen Wasserbilanz (ZAMG SPARTACUS, WINFORE⁸), Bodenkenngrößen (BFW eBOD⁹) oder einem Dürremonitoring abgeleitet werden.

Das gegenständliche Projekt zeigt auf, welche Datensätze und Methoden für eine satellitengestützte Bewässerungskartierung grundsätzlich zur Verfügung stehen und mit welchem Aufwand und Erfolg sich diese im Testgebiet anwenden lassen. Eine Gesamtintegration, wie oben beschrieben, geht über den Projektumfang hinaus. **Die Schätzung von Bewässerungsmengen ist kein Projektgegenstand.**

⁸ [ZAMG Daten Download](#)

⁹ [Digitale Bodenkarte \(eBOD\), BFW](#)

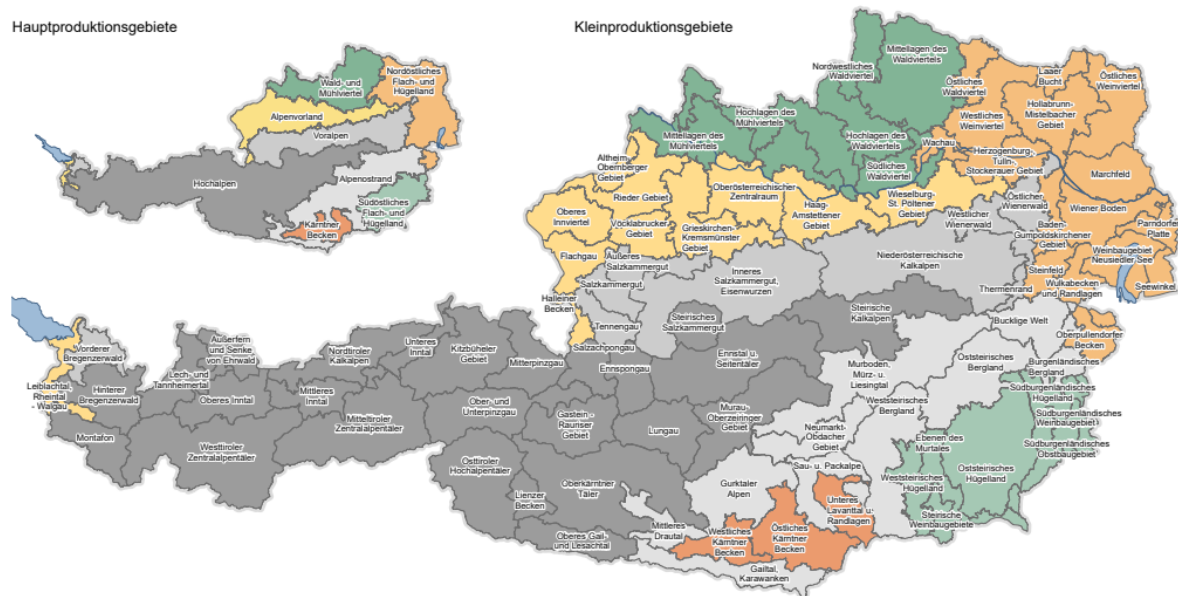
4 Material und Methoden

4.1 Testgebiet

4.1.1 Marchfeld

Österreich lässt sich auf Basis der natürlichen und landwirtschaftlichen Produktionsgegebenheiten in acht landwirtschaftliche Hauptproduktionsgebiete (LHPG) und 87 landwirtschaftliche Kleinproduktionsgebiete (LKPG) untergliedern (Abbildung 1) (STATISTIK AUSTRIA 2021). Das gewählte Testgebiet Marchfeld (Abbildung 2) liegt im Hauptproduktionsgebiet Nördöstliches Flach- und Hügelland östlich von Wien in Niederösterreich und umfasst Teile des gleichnamigen Kleinproduktionsgebietes Marchfeld (Abbildung 1).

Abbildung 1: Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete in Österreich.



Quelle: STATISTIK AUSTRIA 2021, Gebietsstand 01.01.2021

Das LKPG Marchfeld wird im Süden durch die Donau begrenzt, nach Osten durch die March, nach Norden durch das Weinviertler Hügelland und nach Westen durch den Bisamberg und den Verlauf der Donau im Stadtgebiet von Wien. Das Marchfeld lässt sich in die Aubereiche

an Donau und March und – getrennt durch den kleinen Wagram – in eine Niederterrasse und eine Hochterrasse gliedern.

Bodentypen wie Schwarzerdeböden, Auböden, Tschernoseme, Kolluvial- und Schwemmböden mit hohem Humusanteil sowie unterschiedlich hohen Lehm- und Lößanteilen prägen das Gebiet. Die landwirtschaftliche Nutzung in der Region Marchfeld ist vor allem durch den Anbau von Getreide, Feldgemüse (Zwiebeln, Karotten, Bohnen, Gurken), Hackfrüchten (Zuckerrüben, Kartoffeln, Mais), Sojabohnen und Sonnenblumen geprägt. Das Marchfeld gilt sowohl als Kornkammer als auch als wichtiges Gemüseanbauggebiet Österreichs.

Das Marchfeld ist mit mittleren Jahresniederschlägen im Bereich von 489 mm (Gänserndorf, 1971–2010) bis 545 mm (Franzensdorf, 1971–2010) ein klassisches Trockengebiet. In der Vegetationsperiode liegen die Niederschlagsmengen in der Größenordnung von 200 bis 400 mm. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt zwischen 10,2°C (Gänserndorf, 1991–2010) und 10,6°C (Franzensdorf, 1971–2010). Heiße und trockene Sommer, ein hohes Windpotenzial und hohe Verdunstungswerte in dem flachen Gebiet mit nur geringen Erhebungen (max. 178 m) führen insbesondere in der Vegetationsperiode von April bis September zu Defiziten in der mittleren klimatischen Wasserbilanz.

Im Marchfeld befindet sich der Schwerpunkt der landwirtschaftlichen Bewässerung des Bundeslandes Niederösterreich. Für die Ertragssicherung und Effizienzsteigerung in der landwirtschaftlichen Produktion ist eine Bewässerung von Kulturarten mit höherem Wasserbedarf wie Gemüse und anderen hochwertigen Kulturen erforderlich (Stenitzer et al. 2005). Im Bereich der Niederterrasse steht das Grundwasser in geringer Tiefe an. Die Bewässerung erfolgt dort traditionell mit Einzelanlagen aus mehr als 4.000 Feldbrunnen, welche zunehmend elektrifiziert werden. Auf der Hochterrasse, wo die Grundwasserflurabstände höher sind, erfolgt die Verteilung des Beregnungswassers im Rahmen von Bewässerungsgenossenschaften aus zentraler Wassergewinnung und gemeinsamer Verteilung über ortsfeste Bodenleitungen.

Tabelle 1: Bewässerungsgenossenschaften im Bereich der Hochterrasse des Marchfeldes.

Name der Bewässerungsgenossenschaft	Fläche [ha]
BA Schönfeld - Nord	162
BA Stripfing - Zwerndorf	2.190
BA Schönfeld	149
BA Baumgarten	374
BA Breitensee - Oberes Feld	388
BA Angern	291
BA Breitensee - Mitterfeld	150
BA Parbasdorf - Tieffeld	532
BA Marchegg - Breitensee	107
Gesamt	4.344

Quelle: WasserInformationssystem Niederösterreich, Stand April 2022

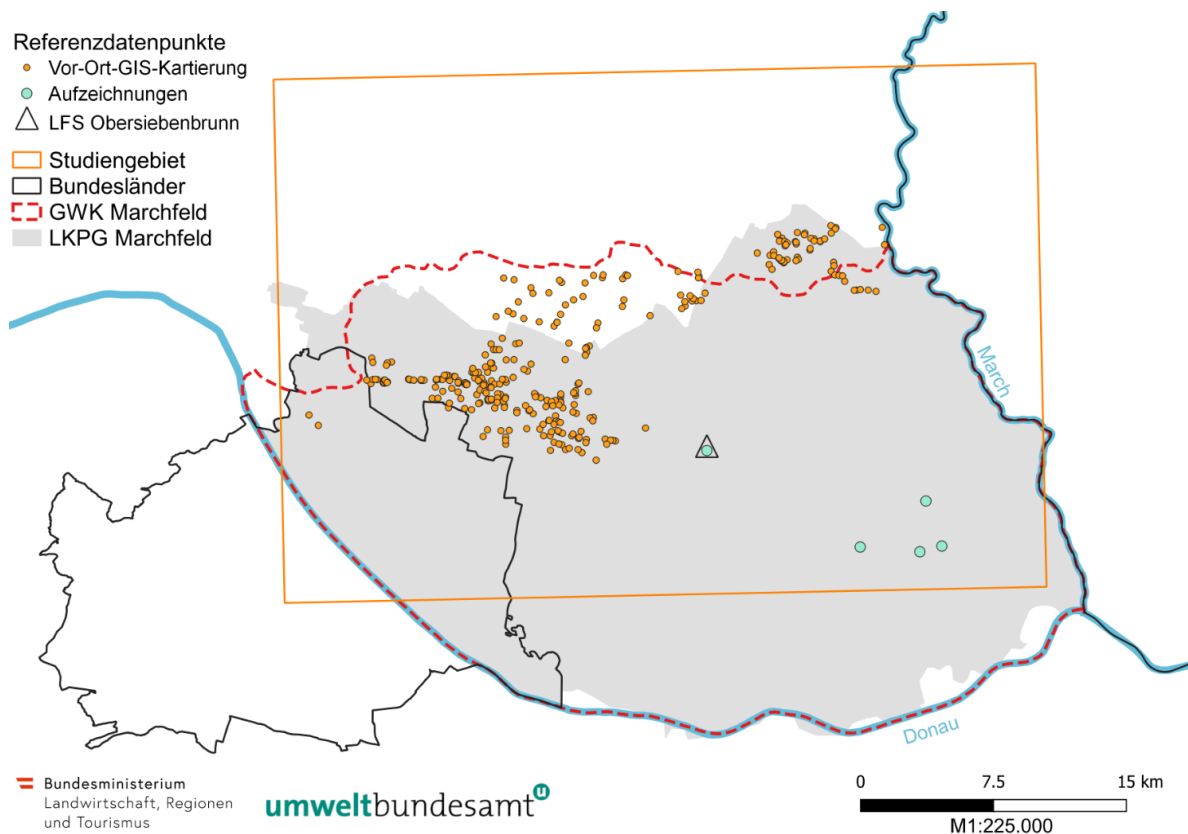
Der Anteil der insgesamt für eine Bewässerung erschlossenen Fläche im Marchfeld beträgt ca. 60.000 ha, davon werden jährlich ca. 20.000 ha (30 %) bewässert. Für die landwirtschaftliche Bewässerung werden in der Region Marchfeld jährlich im Schnitt ca. 25 Mio m³ Wasser fast ausschließlich aus Grundwasservorkommen aufgewendet (Deissenberger 2021).

Am meisten verbreitet sind Über-Kopf-Beregnungsverfahren (*sprinkler irrigation*) bei denen die Verteilung des Beregnungswassers entweder mittels mobilen Beregnungsmaschinen (z. B. „Rainstar“), teilmobil mittels Flügelberegnung im Umlegeverfahren oder als flächendeckend verlegte Netzberegnung (und über Kleinregnerflügel) erfolgt. Gering verbreitet sind bisher ober- oder unterirdische Tropfbewässerungen z. B. bei der Bewässerung von Zwiebelpflanzen.

Die Bewässerung im Marchfeld wird aufgrund steigender Temperaturen, einer Zunahme der Verdunstung, einer Verlängerung der Vegetationsperiode und einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz (Emminger 2017) weiter an Bedeutung gewinnen und der Bewässerungsbedarf zunehmen (APCC 2014).

Das für das gegenständliche Projekt gewählte Testgebiet liegt im nördlichen Teil des Grundwasserkörpers Marchfeld und des gleichnamigen landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebietes (Abbildung 2).

Abbildung 2: Lage der Referenzdatenpunkte im Testgebiet sowie Abgrenzung und Lage des Testgebietes im Verhältnis zum landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiet (LKPG) und Grundwasserkörper (GWK) Marchfeld.



Quelle: BEV, GZÜV, STATISTIK AUSTRIA, Umweltbundesamt

4.1.2 Zissersdorf

Auch im Testgebiet Zissersdorf/Hausleiten im nördlichen Tullnerfeld bzw. südlichen Weinviertel wurden im Jahr 2021 erste Referenzdaten für bewässerte Parzellen mit Unterstützung der Wassergenossenschaft Zissersdorf für die neu errichtete Bewässerungsanlage erhoben, konnten wegen der noch zu geringen Datendichte letztendlich jedoch noch nicht in die Auswertung integriert (siehe auch Kap. 6) werden. Die Aufnahme von Referenzdaten

soll hier im Jahr 2022 fortgesetzt und im Gebiet Tullnerfeld insgesamt verdichtet werden, damit eine effiziente Auswertung der Sentinel-Daten für diesen Bereich erfolgen kann. Im Tullnerfeld wird vor allem der Anbau von Weizen, Mais, Kartoffeln und Zuckerrüben betrieben. Die Böden sind als sandige Schotterstreifen, tiefgründige Lössböden bis hin zu schweren Auböden ausgeprägt.

Die Bewässerungsanlage Zissersdorf¹⁰ ermöglicht die Bewässerung von bis zu 400 ha landwirtschaftlicher Kulturen. Das Wasser wird aus dem Grundwasserkörper des nördlichen Tullnerfelds über vier Brunnen entnommen, von denen das Wasser in einen Speicherteich mit einem Volumen von ca. 10.000 Kubikmeter gepumpt wird. Von dort fördern vier Hauptpumpen mit je 90 kW das Bewässerungswasser in das 17,6 Kilometer lange Leitungsnetz bis hin zu den Entnahmehydranten.

4.2 Datengrundlagen

4.2.1 Wetterdaten

Für die flächendeckende Eingrenzung von Bewässerungszeiträumen und -gebieten sind entsprechende Wetter- und Klimageodatensätze eine Voraussetzung. Im Rahmen des Projektes wurden die Rasterdatensätze SPARTACUS und WINFORE der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet. Damit standen österreichweit regionalisierte Niederschlagssummen (SPARTACUS) und Daten zur potentiellen Verdunstung (ET₀) (WINFORE) mit einer räumlichen Auflösung von 1x1 km auf Basis von Tageswerten zur Verfügung. Ist die räumliche Auflösung dieser regionalisierten Datensätze für einzelne Auswertungen ungenügend, wird auf standortspezifische Messdaten der ZAMG¹¹, des Hydrographischen Dienstes (ehyd.gv.at, mit zeitlichem Verzug) oder anderer Betreiber von Wetterstationen zurückgegriffen.

¹⁰ Bewässerungsanlage Zissersdorf

¹¹ ZAMG Jahrbuch

4.2.2 Betriebliche Bewässerungsbewilligungen

Die Abwicklung von Marktordnungsprämien und Leistungsabgeltungen als Direktzahlungen an landwirtschaftliche Betriebe im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) erfolgt EU-weit nach einheitlichen Vorgaben im Rahmen von INVEKOS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem). In Österreich ist die Agrarmarkt Austria (AMA) mit der Abwicklung der INVEKOS-Zahlungen (EU-, Bundes- und Landesmittel) betraut. Im Rahmen des AMA-Mehrfachantrags Flächen (MFA) wird – neben schlagbezogenen Angaben zu angebauten Kulturen – auf Betriebsebene erhoben, ob eine behördliche Bewilligung zur Bewässerung vorliegt. Entsprechende Daten wurden von der AMA für den Zeitraum 2017–2021 bereitgestellt und zum einen für die Ausweisung von Bewässerungsgebieten (Kap. 5.1), zum anderen in der Klassifikation und Unterscheidung von bewässerten und nicht bewässerten Flächen (Kap. 8) herangezogen.

4.2.3 Schlagnutzungen

Wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, werden zur Abwicklung der INVEKOS-Förderungen im Rahmen des Mehrfachantrags Flächen (MFA) durch die Agrarmarkt Austria (AMA) alle beantragten Schlagnutzungsarten der registrierten Feldstücke in Österreich erfasst. Ein Schlag ist dabei eine zusammenhängende Fläche eines Feldstücks, die für eine Vegetationsperiode mit nur einer Kultur (Schlagnutzungsart) und einheitlicher Bewirtschaftungsaufgabe bewirtschaftet wird. Ein Schlag kann ebenso ein Landschaftselement sein, das lediglich in gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand erhalten wird. Schläge werden im INVEKOS-GIS als Polygone oder als Punkt digitalisiert. Der Datensatz zur Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche ist über das [INSPIRE Geoportal Österreich](#) abrufbar. Im Marchfeld relevante Schlagnutzungsarten des Jahres 2021 sind in Tabelle 13 im Anhang dargestellt. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die für das Marchfeld bedeutende Schlagnutzungsart „Feldgemüse“ im INVEKOS-GIS-Datensatz hinsichtlich einzelner Fruchtarten (z. B. Karotten, Zwiebeln, Gurken etc.) nicht weiter ausdifferenziert wird.

4.2.4 Erdbeobachtungsdaten

Im gegenständlichen Projekt werden Daten der Sentinel-1- und Sentinel-2-Satelliten-missionen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus¹² genutzt.

Sentinel-1-Satelliten liefern räumlich und zeitlich hochaufgelöste **Radardaten**, unabhängig von Witterungsbedingungen und Lichtverhältnissen.

Sentinel-1

- Starttermine: 2014 (Sentinel-1A), 2016 (Sentinel-1B), 2022 (Sentinel-1C), 2024 (Sentinel-1D).
- Instrument: C-Band Radarinstrument mit synthetischer Apertur (SAR).
- Wiederholrate: 6 Tage (mit zwei-Satelliten-Konstellation).
- räumliche Auflösung: je nach Aufnahmemodus 9–40 m.
- Hauptanwendungsgebiete: mariner Bereich (Monitoring von Meereis, Ölteppichen, Wellen, Strömungen etc.), terrestrischer Bereich (Landverformungen, beispielsweise infolge von Erdbeben, Fluten; Landbedeckung; Monitoring von Wäldern, Gewässern und Boden; etc.).

Quelle: ESA Copernicus

Für den Anwendungsbereich der Kartierung von Bewässerungsflächen eignen sich Sentinel-1-Satellitendaten, weil aus ihnen Informationen zur Bodenfeuchte abgeleitet werden können (Paloscia et al. 2013). Der durch den Satelliten erfasste Rückstreuoeffizient des Radars wird neben der Oberflächenrauigkeit und dem Einfallswinkel, also der Topographie des erfassten Gebietes, auch durch den Wassergehalt beeinflusst (Wagner et al. 2008). So kann unter Kenntnis des Geländes, beispielsweise auf Basis von Digitalen Geländemodellen, das Satellitensignal entsprechend korrigiert und die Bodenfeuchte im oberen Bodenbereich abgeleitet werden (Bauer-Marschallinger et al. 2019).

Die Bodenfeuchte wird vor allem im *vertikal kopolarisierten Rückstreuoeffizienten (VV Backscatter)* abgebildet. Vegetationswassergehalt und -struktur wirken sich besonders auf

¹² [Copernicus – Europas Blick auf die Erde](#)

den *vertikal kreuzpolarisierten Rückstreuoeffizienten aus (VH Backscatter)* (Modanesi et al. 2022). Diese beiden werden im gegenständlichen Projekt für die Detektion von bewässerten Flächen genutzt. Es werden nur Sentinel-1-Daten von Nachmittagsüberflügen verwendet, um Azimuth- und Morgentau-Effekte zu reduzieren. Da Sentinel-1-Daten von zum Teil starken Orbiteffekten betroffen sind, wurde außerdem eine Orbit-Biaskorrektur nach (Lievens et al. 2019) durchgeführt.

Sentinel-2-Satelliten liefern räumlich und zeitlich hochaufgelöste **optische und Infrarotdaten**, in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad.

Sentinel-2

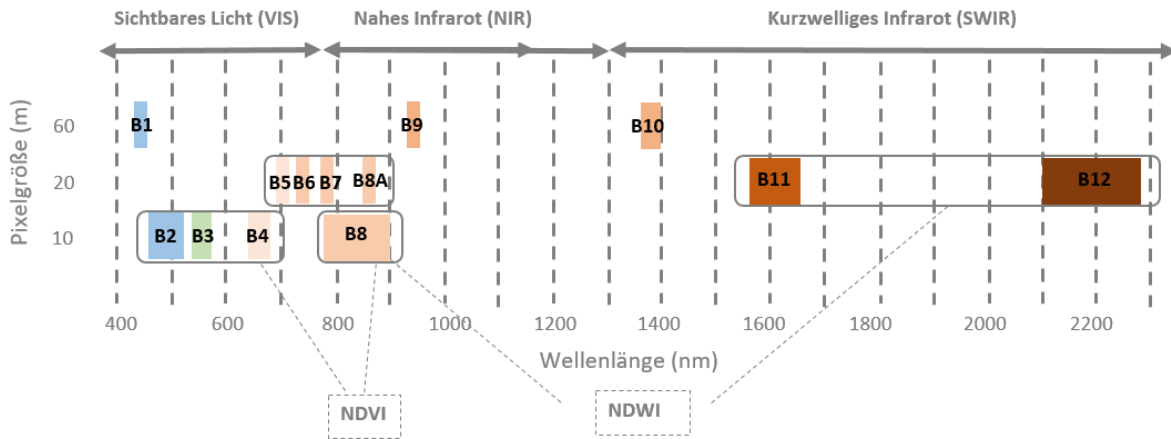
- Starttermine: 2015 (Sentinel-2A), 2017 (Sentinel-2B).
- Instrument: Multispektralsensor (multispectral imager, MSI) für Aufnahmen im sichtbaren und infraroten Spektrum zwischen 443 und 2200 nm in 13 Farbbändern/Spektren (siehe Abbildung 3).
- Wiederholrate: 5 Tage (mit zwei Satellitenkonstellation).
- räumliche Auflösung: in Abhängigkeit vom Farbband/Spektrum 10, 20 oder 60 m.
- Abtastbreite: 290 km.
- Hauptanwendungsgebiete: Monitoring im Bereich Landwirtschaft, Wälder, Landnutzung (Vegetationsveränderungen), Küsten- und Binnengewässer (Algenwachstum) etc.

Quelle: ESA Copernicus

Für den Anwendungsbereich der Kartierung von Bewässerungsflächen eignen sich Sentinel-2-Satellitendaten, weil aus ihnen unter anderem Informationen zur Vitalität und Produktivität von Pflanzen aber auch zum Bodenwassergehalt abgeleitet werden können (Sadeghi et al. 2017; Tucker 1979).

Drei Farbbänder, rot (RED, Sentinel-2 Band 4), nahes Infrarot (NIR, Sentinel-2 Band 8) und kurzwelliges Infrarot (SWIR, Sentinel-2 Band 11), eignen sich besonders gut für die Beobachtung von Vegetationsgesundheit und -wassergehalt (siehe Abbildung 3). Häufig werden diese Bänder in Indizes kombiniert.

Abbildung 3: Die 13 Bänder (B) von Sentinel-2 in den verschiedenen Spektralbereichen (Wellenlängen) und Bandkombinationen für den NDVI (*normalized difference vegetation index*) sowie den NDWI (*normalized difference water index*).



Quelle: Umweltbundesamt

Im gegenständlichen Projekt werden der normalisierte differenzierte Vegetationsindex (NDVI, *normalized difference vegetation index*, Tucker 1979) und der normalisierte Differenzwasserindex (NDWI, *normalized difference water index*, McFeeters 1996) für die Ausweisung von bewässerten Flächen herangezogen:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} = \frac{(B8 - B12)}{(B8 + B12)}$$

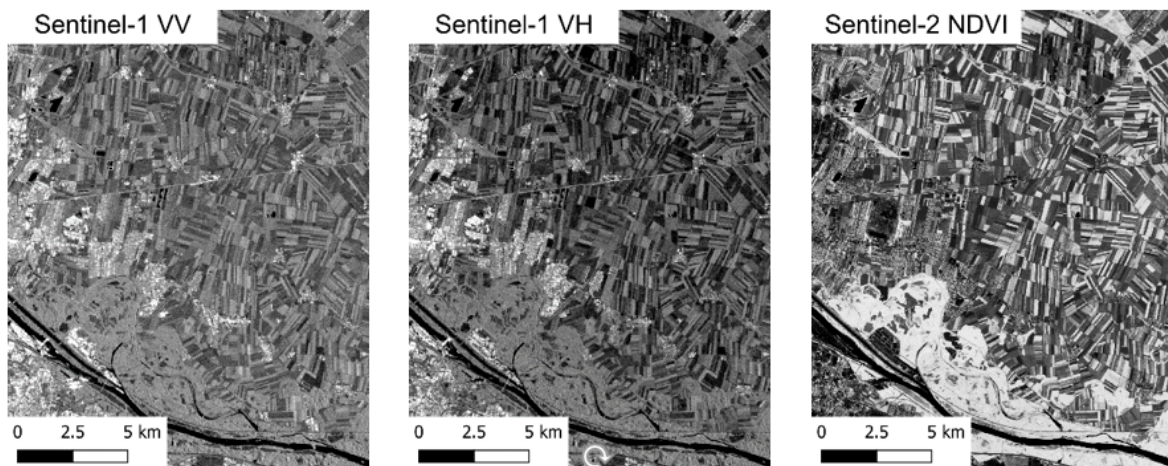
Der Zugriff auf die Sentinel-Daten kann über den [Austrian Data Cube](https://eodc.eu/)¹³ erfolgen, ein Service des [Earth Observation Data Centre \(EODC\)](https://eodc.eu/)¹⁴, welches eine kollaborative IT-Infrastruktur für die Archivierung, die Verarbeitung und den Austausch von Erdbeobachtungsdaten zur Verfügung stellt. Im gegenständlichen Projekt wurden Level-1-Daten des EODC verwendet und

¹³ [Austrian Data Cube \(eodc.eu\)](https://eodc.eu/)

¹⁴ [EODC – Collaboration for Earth Observation](https://eodc.eu/)

unter Verwendung der Sen4CAP-Software der ESA weiterverarbeitet, wie nachfolgend näher erläutert.

Abbildung 4: Exemplarische Darstellung von über den Zeitraum 20.6.–20.7.2021 berechneten Mittelwerten für Sentinel-1 VV-(links) und VH-Rückstreukoeffizienten (Mitte) und den Sentinel-2 NDVI (rechts) eines wolkenfreien Überflugs (6.7.2021). Der Bildausschnitt zeigt Teile des Marchfelds sowie im Südwesten die Ausläufer Wiens und die Lobau.



Quelle: ESA, EODC, Umweltbundesamt

Die Sentinel-1-Daten werden durch das EODC und die TU Wien vorprozessiert und als geländekorrigierte Gamma-Rückstreukoeffizienten (10 m Gitter) bereitgestellt (Abbildung 4 links (VV, VH)). Für den gewählten Zeitraum März–September 2021 standen 103 Bilder für die Auswertung zur Verfügung. Da Radarbeobachtungen unabhängig von Bewölkung und Tageslicht sind, konnten alle Bilder für die weitere Analyse verwendet werden.

Über die Infrastruktur des EODC erfolgte auch die Vorprozessierung der Sentinel-2-Daten Level-1C. Dazu wurde die Sen4Cap-Software (Version 2.0)¹⁵ genutzt, ein von der ESA bereitgestelltes System, das validierte Algorithmen, Produkte, Arbeitsabläufe und bewährte Vorgehensweisen für satellitengestützte Monitorings (z. B. Kulturarten, Vegetationsstatus etc.) zur Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) bereitstellt. Die Atmosphären- und Terrainkorrektur der Sentinel-2-Daten wurde unter Verwendung des in Sen4Cap implementierten MAJA-Algorithmus (Version 3.2.2, (Hagolle et al. 2010)) durchgeführt. Der MAJA-

¹⁵ [Sen4Cap \(esa-sen4cap.org\)](http://esa-sen4cap.org)

Prozessor berechnet eine Maske für Wolken, Wolkenschatten und mit Schnee bedeckte Teile der Aufnahme, um ungeeignete Bildpunkte ausschließen zu können. Für 2021 verbleiben nach entsprechender Vorprozessierung 52 Sentinel-2-Aufnahmen im Zeitraum März bis September für die weitere Auswertung.

Für den VV- und VH-Rückstreukoeffizienten (Sentinel-1) sowie den NDVI und NDWI (Sentinel-2) wurden Zeitreihen extrahiert, indem für jedes verfügbare Satellitenbild alle Pixel jedes Feldpolygons (INVEKOS-Feldstücke) im Testgebiet gemittelt wurden. Jedes Feldpolygon wurde außerdem zuvor um einen 10 m breiten Streifen verkleinert, um Mischpixel (z. B. entlang von Wald, Straßen, Bächen) auszuschließen.

4.2.5 Daten zur Bodenfeuchte

Für die Interpretation der stark von der Bodenfeuchte beeinflussten Sentinel-1-Zeitreihen wurden zusätzlich frei verfügbare Daten zur Bodenfeuchte über das Copernicus Global Land Service (CGLS) bezogen¹⁶. Dieser Datensatz basiert unter anderem auf Sentinel-1-Rückstreukoeffizienten, welche für die Erstellung des CGLS-Bodenfeuchte-Datensatzes allerdings auf eine räumliche Auflösung von 1 km gemittelt werden (Bauer-Marschallinger et al. 2018). Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass die Bodenfeuchte-Zeitreihen nur niederschlagsbedingte (großräumige) Anstiege des Bodenwassergehalts zeigen. Der Einfluss von kleinräumiger Bewässerung wird durch die Mittelung auf 1 km stark reduziert. In dieser Studie wird der Soil Water Index (SWI) mit einem T-Wert von 2 verwendet, was der Feuchtigkeit in der obersten Bodenschicht entspricht.

¹⁶ [CGLS, Soil Water Index](#)

5 Vorauswahl

Die Kartierung bewässerter Flächen auf Basis von Sentinel-Satellitendaten erfordert die Verarbeitung sehr großer, vielfältiger und zum Teil in hoher zeitlicher Auflösung vorliegender Datenmengen (*big data*). Um Speicher- und Rechenkapazitäten, insbesondere zur Verarbeitung der Satellitendaten effizient zu nutzen, sollte für eine österreichweite Umsetzung methodisch auf tatsächlich relevante räumliche und zeitliche Daten und landwirtschaftliche Kulturen eingegrenzt werden. So kann gleichzeitig die Unsicherheit durch Fehlklassifikationen gemindert werden. Das heißt, Gebiete, Zeiträume und Fruchtarten, die für eine landwirtschaftliche Bewässerung unerheblich sind, sollten in einer Vorauswahl abgegrenzt und von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden, um österreichweit bewässerte Flächen zeit- und aufwandseffizient auf Basis von Satellitenauswertungen auszuweisen. In Bezug auf landwirtschaftliche Bewässerungsaktivitäten besonders relevante Gebiete, Zeiträume und Fruchtarten sollten priorisiert werden.

Bewässerung findet in der Praxis dort statt, wo es einerseits aufgrund klimatischer, naturräumlicher und kulturartenabhängiger Faktoren einen Bedarf für eine Beregnung gibt (Bewässerungsbedürftigkeit) und wo es andererseits ökonomisch sinnvoll ist, zu bewässern (Bewässerungswürdigkeit). Die Bewässerungsbedürftigkeit lässt sich regional modellieren und der Bewässerungsbedarf abschätzen, insbesondere, wenn flächendeckende Informationen zur Wasserbilanz sowie zu Bodenkennwerten und Kennzahlen zum kulturartenabhängigen Pflanzenwasserbedarf vorliegen. Für Österreich liegt für den Zeitraum 2007–2009 eine Studie zur flächendeckenden Abschätzung der bewässerungsbedürftigen Flächen in Österreich vor (BMLFUW 2011).

5.1 Bewässerungsgebiete

Für die Ausweisung von Gebieten mit hoher Relevanz hinsichtlich landwirtschaftlicher Bewässerungsaktivitäten wurde auf Datensätze der Agrarmarkt Austria (AMA, siehe 4.2.2) zu landwirtschaftlichen Bewässerungen für die Jahre 2017–2021 zurückgegriffen. In den Datensätzen werden jährlich landwirtschaftliche Betriebe mit Bewilligungen für eine Bewässerung erfasst. Lag für eine Gemeinde im Zeitraum 2017–2021 die maximale **Anzahl** von Bewilligungen für eine Bewässerung, unabhängig vom Ausmaß der bewässerbaren Flächen oder Betriebsgröße, über einer bestimmten Schwelle (Tabelle 2) wird Bewässerung in der

Gemeinde als „hoch relevant“, „mittel relevant“, „niedrig relevant“ oder „unerheblich eingestuft“.

Tabelle 2: Ausweisung der Relevanz landwirtschaftlicher Bewässerung auf Ebene der Gemeinden (Gemeindecodes), landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiete (LKPG) und Grundwasserkörper (GWK); n.a. (nicht angegeben).

Relevanz von Bewässerung auf Gemeindeebene	Anzahl Bewilligungen	Gemeindecodes	Anzahl LKPG	Anzahl GWK, n
hoch	≥ 50	18 →	5	6
mittel	≥ 10	83 →	13	14
niedrig	≥ 2	293 →	32	n.a.
unerheblich	< 2	1.719 →	37	n.a.

Quelle: Umweltbundesamt

Landwirtschaftliche Kleinproduktionsgebiete (LKPG) oder Grundwasserkörper (GWK) mit wesentlichem Anteil von Gemeinden, die für die Bewässerung als „hoch relevant“ klassifiziert wurden, werden hinsichtlich landwirtschaftlicher Bewässerungsaktivitäten automatisch ebenfalls als „hoch relevant“ eingestuft. Analog gilt das für die weiteren Klassen des Relevanzkriteriums „Bewässerung auf Gemeindeebene“ (Tabelle 2).

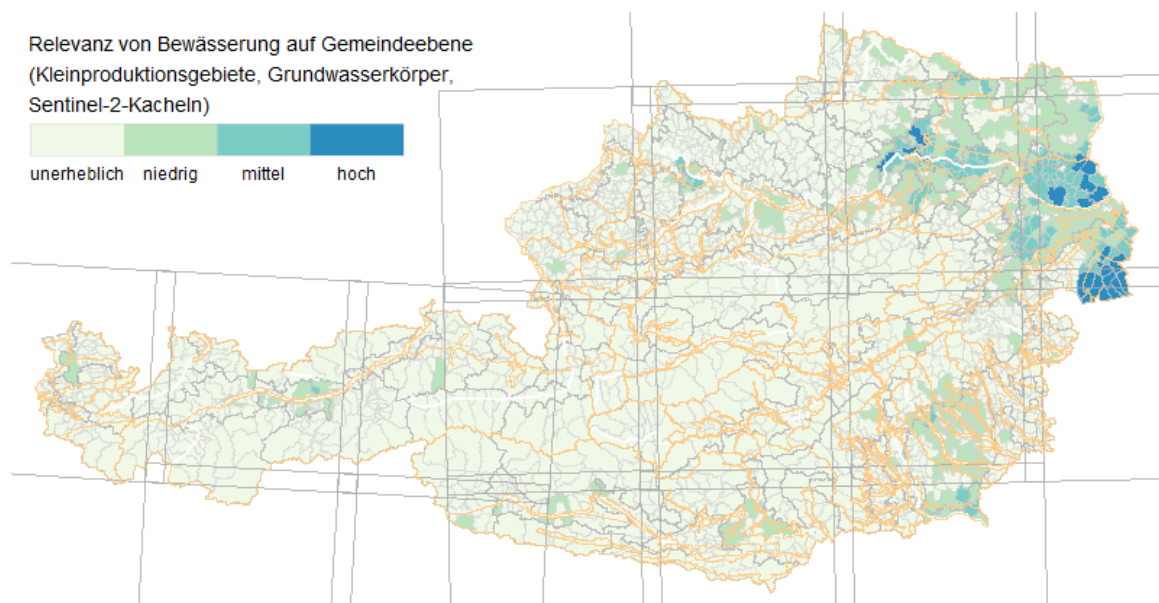
Dieser Vorgangsweise liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Der Datensatz des AMA-Mehrfachantrags spiegelt die Schwerpunktgebiete der landwirtschaftlichen Bewässerung in Österreich in Bezug auf Feldfrüchte, Obst- und Gemüsebau sowie Weinproduktion wider.
- Im Umfeld von in dieser Form erfassten Bewässerungsbewilligungen finden aufgrund der natürlichen und landwirtschaftlichen Produktionsgegebenheiten mit hoher Wahrscheinlichkeit weitere Bewässerungsaktivitäten statt.
- Etwaige bestehende Bewässerungen von Grünland werden durch diesen Datensatz nicht repräsentiert.

Tabelle 2 und die Kartendarstellung in Abbildung 5 geben die Anzahl der hinsichtlich ihrer Relevanz für die landwirtschaftliche Bewässerung als „hoch“, „mittel“ oder „niedrig“ eingestuft Gemeinden, landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiete und Grundwasserkörper

wieder. Die in Bezug auf eine landwirtschaftliche Bewässerung von Feldfrüchten, Obst-, Gemüse- oder Weinbau als „unerheblich“ eingestuftem Raumeinheiten sind ebenfalls ersichtlich. Zum Vergleich sind die Sentinel-2-Kacheln (*tiles*, 100 x 100 km² Aufnahmen) dargestellt, für die auf dieser Grundlage eine entsprechend priorisierte Auswertung erfolgen kann.

Abbildung 5: Relevanz von Bewässerung auf Ebene der Gemeinden, Grundwasserkörper und landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebieten im Verhältnis zur Abdeckung durch Sentinel-2-Kacheln.



Quelle: AMA, BEV, STATISTIK AUSTRIA, ESA, GZÜV, Umweltbundesamt

Tabelle 3 nennt die hinsichtlich einer Bewässerung von Feldkulturen, Gemüse, Obst und Wein relevantesten Kleinproduktionsgebiete und Grundwasserkörper in Österreich. Diese Abgrenzung stimmt gut mit den Ergebnissen des Projektes „Wasserschatz Österreichs“ (BMLRT 2021a, 2021b) überein.

Tabelle 3: Hinsichtlich der Relevanz für die landwirtschaftliche Bewässerung als „hoch“ und „mittel“ eingestufte Kleinproduktionsgebiete und Grundwasserkörper.

Relevanz Bewässerung	Kleinproduktionsgebiete	Grundwasserkörper
hoch	Marchfeld, Seewinkel, Westliches Weinviertel, Weinbaugebiet Neusiedlersee, Wachau	Böhmische Masse [DUJ], Marchfeld [DUJ], Tullnerfeld [DUJ], Parndorfer Platte [LRR], Weinviertel [MAR], Seewinkel [LRR]
mittel	Wiener Boden, Herzogenburg/Tulln/Stockerau, Östliches Weinviertel, Oststeirisches Hügelland, Baden/Gumpoldskirchen, Parndorfer Platte, Oberösterreichischer Zentralraum, Mittleres Inntal, Wieselburg/St. Pölten, Steinfeld, Ebenen des Murtales, Steirische Weinbaugebiete, Mittellagen des Mühlviertels	Hügelland Raab West [LRR], Südl. Wiener Becken [DUJ], Inntal [DBJ], Tullnerfeld [DUJ], Böhmische Masse [MAR], Eferdinger Becken [DUJ], Unteres Murtal [MUR], Weinviertel [DUJ], Traisental [DUJ], NÖ Alpenvorland [DUJ], Hügelland zwischen Mur und Raab [MUR], Schlierhügelland [DUJ], Nördliche Kalkalpen [DBJ], Heideboden [DUJ]

Quelle: Umweltbundesamt

Alternativ stehen für eine entsprechende Eingrenzung/Abgrenzung von Gebieten bzw. Gemeinden, die für die Bewässerung besonders relevant sind, Daten aus dem Projekt „Wasserschatz Österreich“ auf Ebene der Teilgrundwasserkörper (BMLRT 2021a, 2021b) bzw. zukünftig die Informationen der Agrarstrukturerhebung 2020¹⁷ aggregiert auf Gemeindeebene zur Verfügung.

Die dargestellten Datengrundlagen würden als räumliche Maske bzw. Geodatenlayer „Bewässerungsgebiete“ eine priorisierte Prozessierung von Sentinel-Satellitendaten hinsichtlich landwirtschaftlicher Bewässerungsaktivitäten bei einer österreichweiten Betrachtung erlauben.

5.2 Bewässerungskulturen

Ziel des gegenständlichen Projektes war die satellitengestützte Erfassung von Bewässerungsaktivitäten im Anbau von Feldfrüchten. Die Kartierung von Bewässerungen im Wein-

¹⁷ [STATISTIK AUSTRIA, Agrarstrukturerhebung 2020](#)

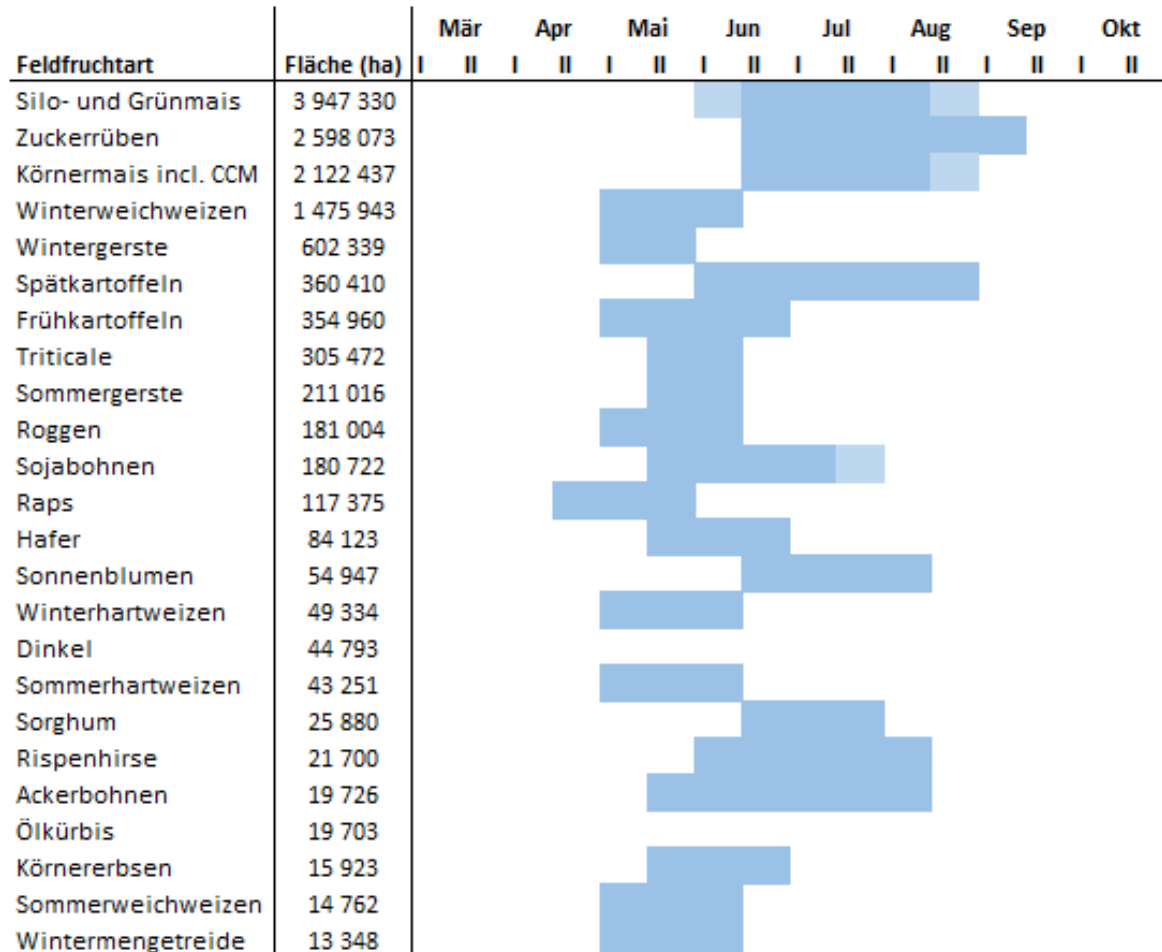
und Obstbau sowie von Grünland war kein Projektziel, da mit stark abweichenden methodischen Rahmenbedingungen (Bewässerungstechniken, Vegetationsstruktur, Berechnungszeiträumen) zu rechnen war.

Um in Bezug auf landwirtschaftliche Bewässerungsaktivitäten besonders relevante Feldfrüchte im Ackerbau einzugrenzen, können entweder:

- Informationen zur Bewässerungsbedürftigkeit und Bewässerungswürdigkeit bestimmter Kulturarten aus dem ÖWAV-Regelblatt 407 „Empfehlungen für die Bewässerung“ oder
- Angaben zu Betrieben und Flächennutzungen im Abgleich mit Angaben zu Bewässerungsbewilligungen oder einer Bewässerungsinfrastruktur,
- Daten aus der Agrarstrukturerhebung 2010 und
- Referenzdaten für tatsächliche Bewässerungsvorgänge herangezogen werden.

Auf der Grundlage von Ernteerhebungen der STATISTIK AUSTRIA im Zeitraum 2015–2020 ausgewiesene flächenstarke **Feldfrüchte und Feldgemüse** in Österreich sowie ihre theoretischen, potenziellen Bewässerungszeiträume sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 zusammengefasst. Die in Abbildung 6 dargestellten Feldfrüchte umfassen einen Großteil der gesamten für den Feldfruchtanbau genutzten Fläche, die in Abbildung 7 dargestellten Gemüsearten ca. 75 % der für den Feldgemüsebau genutzten Fläche in Österreich.

Abbildung 6: Flächenstarke Feldfrüchte in Österreich entsprechend Ernteerhebung der STATISTIK AUSTRIA (Mittelwert 2015–2020) und charakteristische, potentielle Bewässerungszeiträume aus Regelblättern und Kulturanleitungen.

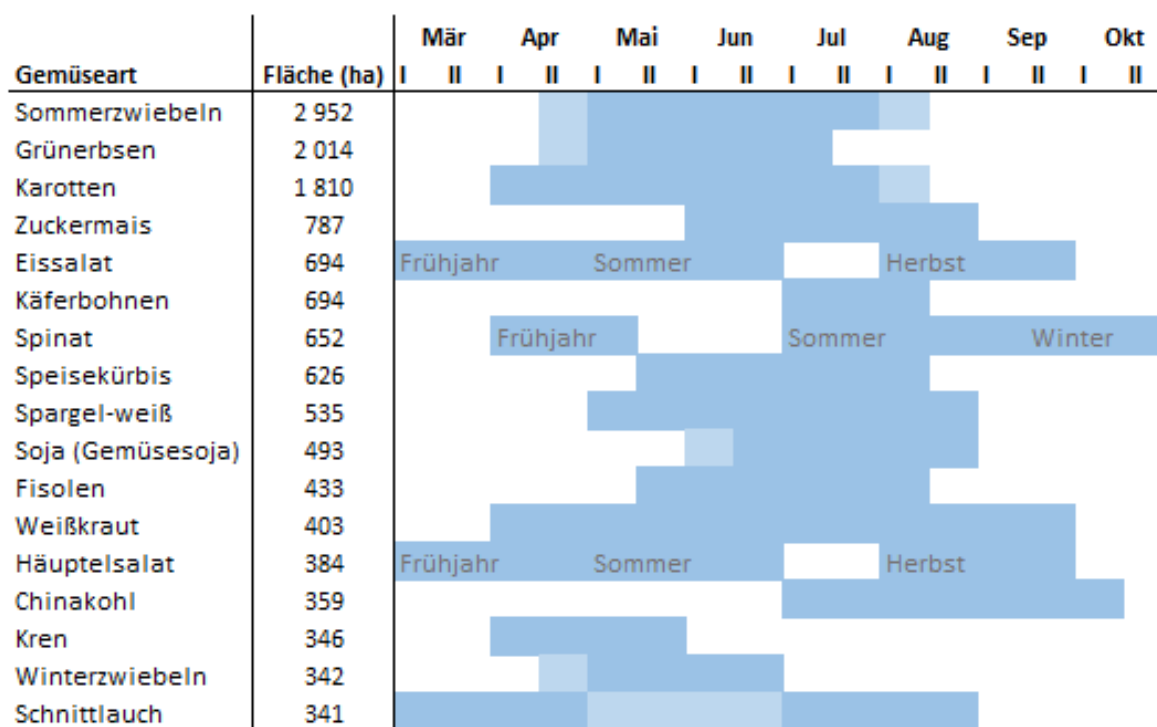


Quelle: STATISTIK AUSTRIA Ernteerhebungen 2015–2020, Umweltbundesamt

Aus den INVEKOS-GIS-Datensätzen zu Schlagnutzungen und Bewässerungsbewilligungen der AMA-Betriebe lassen sich flächenmäßig relevante, aufgrund einer Bewässerungsbewilligung **bewässerbare** Kulturen für Österreich weiter eingrenzen. Dazu werden mehrjährige INVEKOS-Datensätze ausgewertet, da der landwirtschaftliche Anbau in einer Fruchtfolge erfolgt, also dem jährlichen Wechsel von Fruchtarten (z. B. in der Reihenfolge Karotten, Mais, Weizen, Zuckerrüben, Weizen, Karotten). Betriebe mit einer Bewässerungsbewilligung werden diese nur in jenem Anbaujahr nutzen, in dem die Bewässerung für die jeweilige Frucht-/Kulturart wirtschaftlich und für die Produktion erforderlich ist.

Als besonders relevante bewässerbare **Feldkulturen** in den Bewässerungsgebieten Österreichs wurden **Getreide, Körnermais, Feldgemüse, Sojabohnen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Luzerne, Raps, Körnererbsen, Silomais, Hirse**; außerdem Spezialkulturen wie Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen, Blumen und Zierpflanzen und Erdbeeren identifiziert.

Abbildung 7: Flächenstarke Feldgemüse in Österreich entsprechend Ernteerhebung der STATISTIK AUSTRIA (Mittelwert 2015–2019, 2021) und charakteristische, potentielle Bewässerungszeiträume aus Regelblättern und Kulturanleitungen.



Quelle: STATISTIK AUSTRIA Ernteerhebungen 2015–2019, 2021, Umweltbundesamt

Feldgemüse lassen sich auf Basis des INVEKOS-Datensatzes nicht weiter in einzelne Gemüsearten ausdifferenzieren. Die Ergebnisse der Ernteerhebungen der STATISTIK AUSTRIA (Abbildung 7) zeigen jedoch, dass Sommerzwiebeln, Grünerbsen und Karotten die flächenstärksten Feldgemüse in Österreich sind, mit dem Hauptanbaugebiet Marchfeld. Für das Marchfeld charakteristische Feldgemüse (Zwiebel, Grünerbse, Karotte, Spargel, Spinat, Schnittbohnen, Kraut) werden zur Ertragssicherung und Absicherung des Produktionszyklus fast immer bewässert.

Für eine flächendeckende, satellitengestützte Erhebung von bewässerten Feldfrucht- und -gemüseflächen sollte die Erhebung von Referenzdaten zur Etablierung der Methoden deshalb vorrangig auf die in Abbildung 6 und Abbildung 7 angeführten, flächenstarken Feldfrucht- und Feldgemüsearten mit besonderem Fokus auf die bewässerungswürdigen Kulturarten Getreide, Körnermais, Feldgemüse, Sojabohnen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Luzerne, Raps, Körnererbsen, Silomais und Hirse abzielen.

5.3 Bewässerungszeiträume

Der Bewässerungsbedarf einzelner Kulturarten an spezifischen Standorten lässt sich für die Bewässerungssteuerung mittlerweile modellieren und zeitnah vorhersagen. Insbesondere, wenn flächendeckende, zeitlich hoch aufgelöste Informationen zur Wasserbilanz sowie räumlich hoch aufgelöste Bodenkennwerte und langjährige Erfahrungen, bzw. aus Anbauversuchen gewonnene Kennzahlen, zum kulturartenabhängigen Pflanzenwasserbedarf vorliegen. Wie in Kap. 3 erläutert, ist dies in Bayern (D) beispielsweise über eine Bewässerungs-App oder im Marchfeld über den EO4Water-Service der BOKU möglich.

Für die flächendeckende Erfassung tatsächlich bewässerter Flächen ist jedoch, neben ökonomischen Faktoren wie der Bewässerungswürdigkeit, vor allem die vorhandene Bewässerungsinfrastruktur und die praktische Umsetzung des Bewässerungsvorgangs durch die jeweiligen Landwirtinnen und Landwirte entscheidend. Robuste Daten zu tatsächlich bewässerten Flächen lassen sich daher nur durch Aufzeichnungspflichten oder, wie im gegenständlichen Projekt getestet, durch alternative fernerkundliche Verfahren erheben.

Für die satellitengestützte Erfassung tatsächlich bewässerter Flächen sollten kulturartenspezifische, bewässerungsrelevante Zeiträume betrachtet werden. Eine möglichst präzise Vorhersage wie für die Bewässerungssteuerung ist nicht notwendig. Zu einer entsprechenden zeitlichen Eingrenzung können kulturartencharakteristische, potentielle Bewässerungsperioden (Abbildung 6, Abbildung 7) in Kombination mit klimatischen Wasserbilanzen oder Dürreindikatoren wie dem *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI; Vicente-Serrano et al. 2010) oder dem *Palmer Drought Severity Index* (PDSI; Palmer 1965) herangezogen werden.

Im gegenständlichen Projekt wurde die Auswertung der Satellitendaten auf den Zeitraum 1. Juni bis 31. Juli 2021 begrenzt. Das Testgebiet Marchfeld war in diesen beiden Sommermonaten durch eine Trockenphase mit negativer Wasserbilanz gekennzeichnet, zudem

wurde die Mehrzahl der Stichproben in diesem Zeitraum erhoben. Größte Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern sowie zwischen niederschlags- und bewässerungsbedingten Änderungen des Vegetationsstatus und der Bodenfeuchte waren in diesem Zeitraum zu erwarten.

5.4 Bewässerungstechniken

Wie in Kap. 4.1.1 erläutert, kommen in der Region Marchfeld vor allem Über-Kopf-Beregnungsverfahren (*sprinkler irrigation*) zur Anwendung. Die Verteilung des Beregnungswassers erfolgt entweder mittels mobiler Beregnungsmaschine (z. B. „Rainstar“), teilmobil mittels Flügelberegnung im Umlegeverfahren oder als flächendeckend verlegte Netzberegnung (und über Kleinregnerflügel). Ober- oder unterirdische Mikrobewässerungsverfahren sind weniger verbreitet; sie werden bei der Tröpfchenbewässerung im Weinbau und beispielsweise auch beim Anbau von Zwiebeln im Marchfeld verwendet.

Im gegenständlichen Projekt wurde daher der Schwerpunkt auf die Erhebung von Referenzdaten für im Über-Kopf-Verfahren beregnete Felder gelegt.

Grundsätzlich können aber auch Unterflurbewässerungsverfahren wegen ihrer Auswirkungen auf die Pflanzengesundheit und Bodenfeuchte durch satellitengestützte Auswertungsverfahren erfasst werden, so lange die räumliche Auflösung der verfügbaren Satelliteninformationen mit den charakteristischen Feld- und Vegetationsstrukturen einer Kulturart in Einklang gebracht werden können. Inwieweit sich beispielsweise Charakteristika des Weinbaus durch satellitengestützte Auswertungen erfassen lassen, wird aktuell in einem DAFNE-Projekt¹⁸ der Universität für Bodenkultur erhoben.

5.5 Vorauswahl – Fazit

Auf Grundlage von Informationen zu Bewässerungsgebieten-, -kulturen, -zeiträumen und -techniken können satellitengestützte Verfahren zur Kartierung von Bewässerungsflächen entsprechend fokussiert werden.

¹⁸ dafne.at/projekte/wein-ernte-prognose

Im vorliegenden Projekt wurde deshalb ein Testgebiet in der Region **Marchfeld** ausgewählt, um in der **Bewässerungsperiode 2021** Referenzdaten zu tatsächlich **im Über-Kopf-Verfahren berechneten Feldern** mit Fokus auf die **Feldfrüchte** Körnermais, Feldgemüse, Getreide, Sojabohnen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Luzerne, Raps, Körnererbsen, Silomais und Hirse zu erheben.

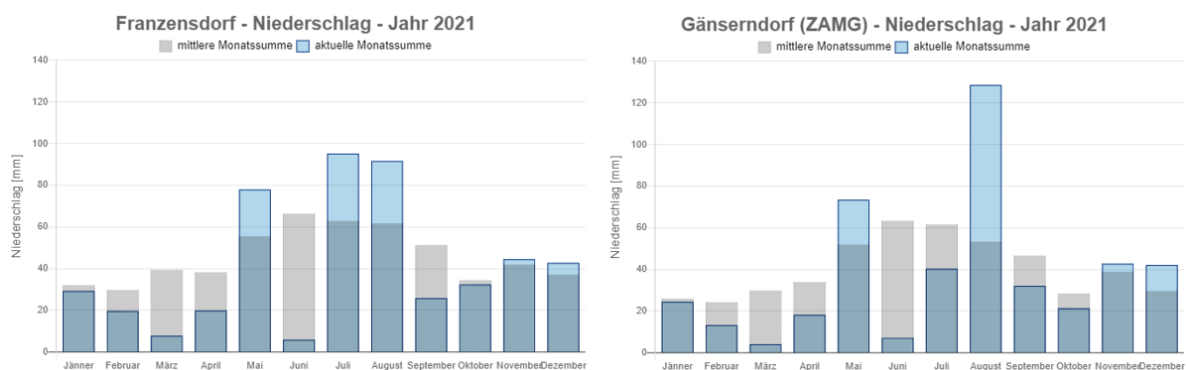
6 Referenzdatenerhebung

Für die Entwicklung von Modellansätzen zur satellitengestützten Ausweisung tatsächlich bewässerter Flächen werden Referenzdaten zur Bestimmung der Modellparameter benötigt. Diese werden in Form von Stichproben tatsächlich bewässerter Flächen über andere Kartierungsverfahren als Satellitenfotos erhoben. Auf Basis der Referenzdaten können die flächendeckend vorliegenden Satelliteninformationen mit Informationen zu tatsächlichen Bewässerungsvorgängen beim Anbau einzelner Kulturarten verknüpft werden und das Modell trainiert werden.

Im gegenständlichen Projekt wurden im Zeitraum 1. Juni – 31. Juli 2021 entsprechende Referenzdaten zu tatsächlichen Bewässerungsvorgängen im Marchfeld erhoben.

Die Vegetationsperiode 2021 war im Marchfeld durch einen vorangegangenen nassen Herbst und eine entsprechende Regeneration der Grundwasservorräte gekennzeichnet. Der Zeitraum Februar bis Ende April 2021 war durch markante Trockenheit geprägt, der nachfolgende Mai war sehr feucht und kühler als im Durchschnitt. Insbesondere der heiße Juni wies ein auffallendes Niederschlagsdefizit auf (Abbildung 8).

Abbildung 8: Niederschlagssummen der ZAMG-Messstationen Franzensdorf und Gänsersdorf im Marchfeld im Jahr 2021.



Quelle: ZAMG, Amt der NÖ Landesregierung

Für die Entwicklung von Modellansätzen zur satellitengestützten Ausweisung tatsächlich bewässerter Flächen wurden Referenzdaten aus drei Quellen herangezogen:

- Betriebliche Bewässerungsbewilligungen aus dem AMA-Mehrfachantrag Flächen (INVEKOS-GIS);
- Digitale Vor-Ort-GIS-Kartierungen von Bewässerungen;
- Aufzeichnungen von Bewässerungsvorgängen durch Wasser- oder Bewässerungsgenossenschaften und die Landwirtschaftliche Fachschule Obersiebenbrunn.

Eine vierte Datenquelle wurde getestet:

- Detektion von tatsächlich bewässerten Flächen mittels Orthofotos (Luftbilder).

Die Erhebung wurde auf die Kartierung von Bewässerungsvorgängen im Acker- und Freilandgemüsebau eingegrenzt. Erhebungen von Bewässerungsvorgängen im Wein- und Obstbau, im Grünland sowie als Unterflur-Tropfbewässerung wurden im Rahmen der gegenständlichen Projektdefinition explizit ausgenommen. **Die derzeitige Auflösung der Sentinel-Erdbeobachtungsdaten erfordert eine Mindestgröße der für die Referenzdaten erhobenen Felder bzw. Schläge von ca. 0,25 ha bzw. einer Feldbreite von ca. 30 m.** Die Aufnahmezeitpunkte der Referenzdaten sollten den Befliegungsplänen der Satellitendaten angepasst sein.

Folgende Informationen wurden – soweit möglich – erhoben:

- Bewässerungsareal (Welche Fläche wurde bewässert?); eindeutige Erfassung des Schlages;
- Bewässerungszeitpunkt (Wann wurde bewässert?); in Hinblick auf die zeitliche Regulierung von Bewässerungsvorgängen ist zumindest die Erhebung des Datums und der Tageszeit (morgens/abends) erforderlich, im Optimalfall Datum und Uhrzeit;
- bewässerte Kultur (Welche Frucht/Kulturart wurde bewässert?); der Fokus lag auf der Erhebung für Mais, Getreide, Soja, Feldgemüse (Karotten, Zwiebeln, Spargel), Kartoffeln, Zuckerrüben, Kürbis, Hirse, Erbsen, Sonnenblumen, Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen, Erdbeeren, Spinat und Bohnen (siehe 5.5);
- Art der Bewässerung (Welche Bewässerungstechnik wurde eingesetzt?), insbesondere mobile Flächenregner, mobile Regenkanone oder fixe Rohr-Sprinkleranlage;

- Besonderheiten der Bewässerung: Erhebung von Zusatzinformationen (nur Teilschlag bewässert, Feld ohne Niederschlag nass/feucht bei gleichzeitig installiertem Beregnungsgerät etc.);
- Bewässerungsmenge, optional (nicht Projektbestandteil).

Wenn möglich wurden im Umfeld „bewässerter Flächen“ nicht bewässerte Felder der gleichen Kulturart erhoben.

6.1 Betriebliche Bewässerungsbewilligungen

Die auf Betriebsebene erhobenen Daten zu behördlichen Bewilligungen für eine Bewässerung (s. Kap. 4.2.2) wurden verwendet, um Felder als „nicht bewässert“ oder „eventuell bewässert“ zu klassifizieren. Als „eventuell bewässert“ wurden alle Schläge klassifiziert, die Betrieben mit Bewässerungsbewilligungen zugeordnet werden konnten. Für diese Felder ist vor der Klassifizierung unklar, ob und welcher Schlag letztendlich tatsächlich im Erhebungsjahr bewässert wurde. Als „nicht bewässert“ wurden alle Felder ausgewiesen, die Betrieben ohne Bewässerungsbewilligungen zugeordnet wurden. Es wird angenommen, dass diese mit ausreichend hoher Genauigkeit tatsächlich nicht bewässerte Felder repräsentieren.

6.2 Vor-Ort-GIS-Kartierungen

Im Zeitraum Juli bis September 2021 wurden hauptsächlich im Marchfeld, versuchsweise auch in der Gegend Laa an der Thaya, im Seewinkel und im Bereich Tullnerfeld stichprobenartig bewässerte und nicht bewässerte Flächen mittels Vor-Ort-GIS-Kartierung erhoben. Der Erhebungsbereich wurde letztendlich auf das nördliche Marchfeld fokussiert, da hier im Erhebungszeitraum und unter den gegebenen Wetterbedingungen die Kartierungen am effizientesten durchgeführt werden konnten. Für die Erhebung der Referenzdaten wurden die zuvor genannten Merkmale hinterlegt und konnten vor Ort, angepasst an die Befliegungspläne der Sentinel-Satelliten, bei gleichzeitiger Georeferenzierung erhoben werden:

- Zeitpunkt der Beobachtung,
- Foto des Feldes und der Umgebung,
- Kulturart,
- Art der Bewässerung,
- Anmerkungen,

- Bewässerungsanlage in Betrieb.

Der Großteil der tatsächlich beobachteten bewässerten Felder wurde im Marchfeld kartiert. In Bereich Laa an der Thaya wurden im Spätsommer vor allem negative Beobachtungen dokumentiert („keine Bewässerungsanlage vorhanden“).

Die erhobenen Daten wurden einer Qualitätskontrolle, z. B. hinsichtlich ihrer korrekten Verortung, unterzogen. Eintragungen, bei denen die erhobene Kulturart von der INVEKOS-Schlagnutzungsart abwich, wurden anhand der verfügbaren Fotos überprüft und gegebenenfalls dem korrekten (meist benachbarten) Feld zugewiesen. Alle so erfolgten Änderungen wurden mittels eines Qualitätsindikators (*quality flag*) dokumentiert. Stichproben, deren Lage beispielsweise aufgrund fehlender Fotos nicht korrigiert werden konnte, wurden von weiteren Analysen ausgeschlossen.

Abbildung 9: Aktive Regenkanone im Marchfeld.



© Markus Ausserleitner/Umweltbundesamt

In Tabelle 4 sind die schlagnutzungs- bzw. kulturartenabhängigen Referenzdaten zur Bewässerung aus der Vor-Ort-GIS-Kartierung und den Aufzeichnungen im Marchfeld zusammengefasst. Nicht gelistet sind jene Kulturarten, von denen nur ein Feld beobachtet wurde: Dies

betraff die Kulturart Erdbeeren, Frühkartoffeln, Körnererbsen, Mais/Käferbohnen in getrennten Reihen, Silomais, Speisekürbis, Wechselwiese (Egart, Ackerweide), Winterdinkel (Spelz), Wintergerste.

Tabelle 4: Schlagnutzungs- bzw. kulturartenabhängige Referenzdatendichte zur Bewässerung aus der Vor-Ort-GIS-Kartierung und den Aufzeichnungen im Marchfeld.

INVEKOS-Schlagnutzung	Anzahl tatsächlich bewässerter Schläge	Anzahl Schläge gesamt	Anteil tatsächlich bewässerter Schläge an der Gesamtanzahl (%)
Feldgemüse einkulturig	48	628	7,6
Zuckerrüben	43	629	6,8
Sojabohnen	23	715	3,2
Feldgemüse – Verarbeitung einkulturig	17	421	4,0
Speisekartoffeln	11	231	4,8
Speiseindustriekartoffeln	10	134	7,5
Saatmaisvermehrung	9	430	2,1
Körnermais	8	933	0,9
Winterweichweizen	3	3.089	0,1
Sonstige Ackerkulturen	3	38	7,9
Frühkartoffeln	3	30	10,0
Rollrasen	3	20	15,0
Ölkürbis	2	253	0,8
Feldgemüse - Verarbeitung mehrkulturig	2	56	3,6
Silomais	2	49	4,1
Gewürzpflanzen	2	35	5,7
Σ	189	7.691	2,5

Quelle: INVEKOS, Umweltbundesamt

Insgesamt wurde für 2,5 % der Schläge im Testgebiet eine tatsächliche Bewässerung dokumentiert (Tabelle 4). Für den Modellaufbau und die statistische Validierung der Ergebnisse ist sowohl eine kulturartenspezifische Mindestanzahl als auch ein gewisser Anteil kulturartenspezifischer Referenzdaten im Testgebiet (Abdeckung) erforderlich. Dies konnte für Zuckerrüben, Sojabohnen, Kartoffeln und Mais zum Teil erreicht werden, wie in Kap. 8 gezeigt wird. Auch für Feldgemüse wurde eine gute Referenzdatenabdeckung erreicht. Allerdings sind für Feldgemüse, wegen der fehlenden Unterscheidung der einzelnen Feldgemüsearten im INVEKOS-Datensatz, momentan noch keine kulturarten-spezifischen Auswertungen der Satellitendaten möglich (siehe Kap. 6.5).

Die insgesamt geringe Referenzdatendichte verhinderte allerdings die Anwendung komplexerer statistischer Verfahren und Methoden des maschinellen Lernens, welche insbesondere die flächendeckende Umsetzung der Klassifizierung des Bewässerungsstatus und die entsprechende statistische Absicherung ermöglichen würden.

6.3 Aufzeichnungen

Im Projektverlauf wurden landwirtschaftliche Betriebe, Versuchsanstalten oder Bewässerungsgenossenschaften als Kooperationspartner für eine Stichprobenerhebung kontaktiert. Die landwirtschaftliche Fachschule Obersiebenbrunn, die Wassergenossenschaft Zissersdorf und einige Landwirtinnen und Landwirte stellten für das Jahr 2021 dankenswerter Weise Daten zu Bewässerungsvorgängen zur Verfügung. Diese wurden im gegenständlichen Projekt genutzt bzw. stehen für eine Ausweitung der entwickelten Methode auf weitere Testgebiete wie das Tullnerfeld zur Verfügung.

6.4 Luftbilder

Luftbilder (Orthofotos) werden vielerorts genutzt, um Informationen über die landwirtschaftliche Praxis und landwirtschaftliche Entwicklungen zu gewinnen. In den USA werden beispielsweise über das National Agriculture Imagery Program (NAIP)¹⁹ regelmäßig Luftbilder in den landwirtschaftlichen Kernzonen erhoben. Diese Erhebung wird seit 2009 in einem

¹⁹ NAIP, National Agriculture Imagery Program

dreijährigen Zyklus (davor im 5-Jahres-Zyklus) innerhalb der landwirtschaftlichen Vegetationsperiode durchgeführt. Auch zur Unterstützung der Kartierung bewässerter Flächen mittels Erdbeobachtungsdaten werden Luftbilder herangezogen. Wegen ihrer charakteristischen Form und Größe lassen sich insbesondere Kreisberechnungen (*center-pivot irrigation*) z. T. sogar automatisiert aus Luft- und Satellitenbildern gut erfassen. In semiariden Gebieten zeichnen sich Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern dabei besonders gut ab (Zurqani et al. 2021).

Inwieweit sich Luftbilder in Österreich für eine derartige Erfassung nutzen lassen, wurde in der Studie von Deissenberger (2021) zur satellitengestützten Detektion von Bewässerungsereignissen im Marchfeld und auch im gegenständlichen Projekt stichprobenartig geprüft.

Abbildung 10: Detektion von beregneten Flächen in einem Luftbild (Stadt Wien, 2017).

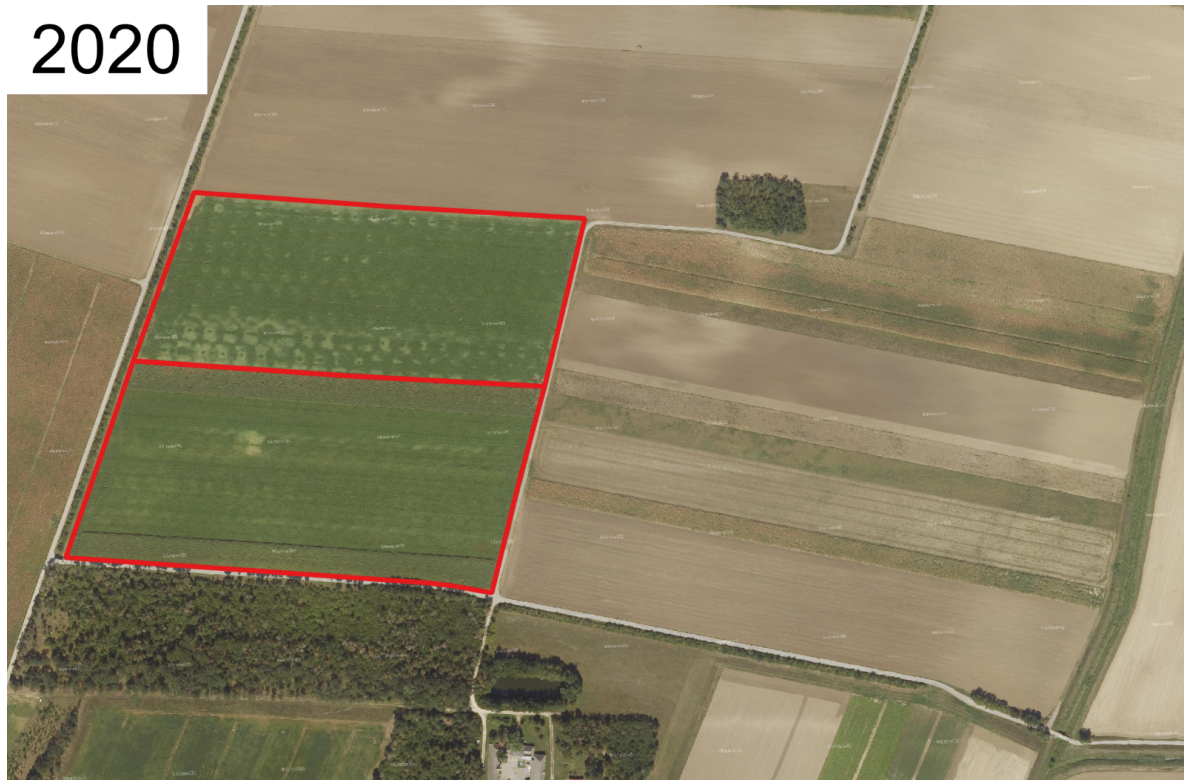


Quelle: Stadt Wien – data.wien.gv.at

In Österreich unterscheiden sich die Aufnahmezeitpunkte der Orthofotos in Abhängigkeit vom Bundesland. Orthofotos stehen beispielsweise über das Geodatenportal der österreichischen Länder (geoland.at) oder die *open data* Portale der Bundesländer zur Verfügung.

In Luftbildern der Stadt Wien sind die typischen Kreisformen von Kleinregnern in der Netzberechnung gut erkennbar (Abbildung 10, Abbildung 11).

Abbildung 11: Detektion von beregneten Flächen in einem Luftbild (Stadt Wien, 2020).



Quelle: Stadt Wien – data.wien.gv.at

Aus Google Maps (google.at/maps/) Luftbildern des Jahres 2021 wurden im gegenständlichen Projekt im Marchfeld ca. 132 bewässerte Flächen identifiziert. Im Abgleich mit den INVEKOS-Schlagnutzungen wurden diese vorwiegend als Feldgemüseflächen zugeordnet.

6.5 Weitere Aufbereitung der Referenzdaten

Alle Referenzdaten wurden in Geodatensätze überführt. Da verschiedene Kulturarten aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften (Wachstumsphasen, Pflanzenhöhe, Vegetationsstruktur) unterschiedliche Satellitensignale hervorrufen, wie sie auch für die satellitengestützte Klassifizierung von Kulturarten genutzt werden (Reuß et al. 2021; Vuolo et al.

2018), wurden im gegenständlichen Projekt **alle Analysen kulturartenspezifisch** durchgeführt. Felder mit Schlagnutzungsarten (INVEKOS-GIS), die mehrere unterschiedliche Kulturarten beinhalten, mussten daher von den Satellitendaten-Analysen ausgeschlossen werden. Das betraf in erster Linie Felder mit der INVEKOS-Schlagnutzungsart „Feldgemüse“ (u. a. Zwiebeln, Karotten, Gurken, Sellerie, Spargel). Schläge, auf denen Feldgemüse angebaut wird, wurden aufgrund der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraxis im Marchfeld (ÖWAV 2016) als „grundsätzlich bewässert“ ausgewiesen.

Für die satellitengestützte Modellentwicklung wurden außerdem Kulturarten mit bisher geringer Bewässerungswahrscheinlichkeit (Winterweichweizen) und wenig oder keinen Referenzdaten aufgrund des späten Erhebungszeitraumes (ab Juli) sowie relativ seltene Kulturarten ausgeschlossen. Im weiteren Verlauf wurden die Analysen fokussiert auf die Feldkulturen Mais, Kartoffeln, Sojabohnen und Zuckerrüben durchgeführt.

6.6 Repräsentativität der Referenzdaten für den Grundwasserkörper Marchfeld

Bezieht man die vorhandenen INVEKOS- und Referenzdaten auf den Grundwasserkörper Marchfeld mit einer Gesamtfläche von 942 km², lässt sich auf Basis der INVEKOS-Daten und der zuvor erwähnten Bewässerungspraxis eine Feldgemüsefläche von insgesamt ca. 88 km² als „grundsätzlich bewässert“ ableiten (Abbildung 12).

Abbildung 12: Flächenabdeckung (Jahr 2021) „grundsätzlich bewässerter“ Kulturarten (Feldgemüse – blau), im Projekt klassifizierter Kulturarten (Mais, Kartoffeln, Sojabohnen, Zuckerrüben – grün), und anderer häufiger Kulturarten (hauptsächlich Winterweizen – rot) im Grundwasserkörper Marchfeld.

Feldgemüse - grundsätzl. bewässert
Gesamtfläche: 87.96 km²



Klassif. Kulturarten
Gesamtfläche: 148.96 km²



Häufige, nicht klassif. Kulturarten
Gesamtfläche: 191.76 km²



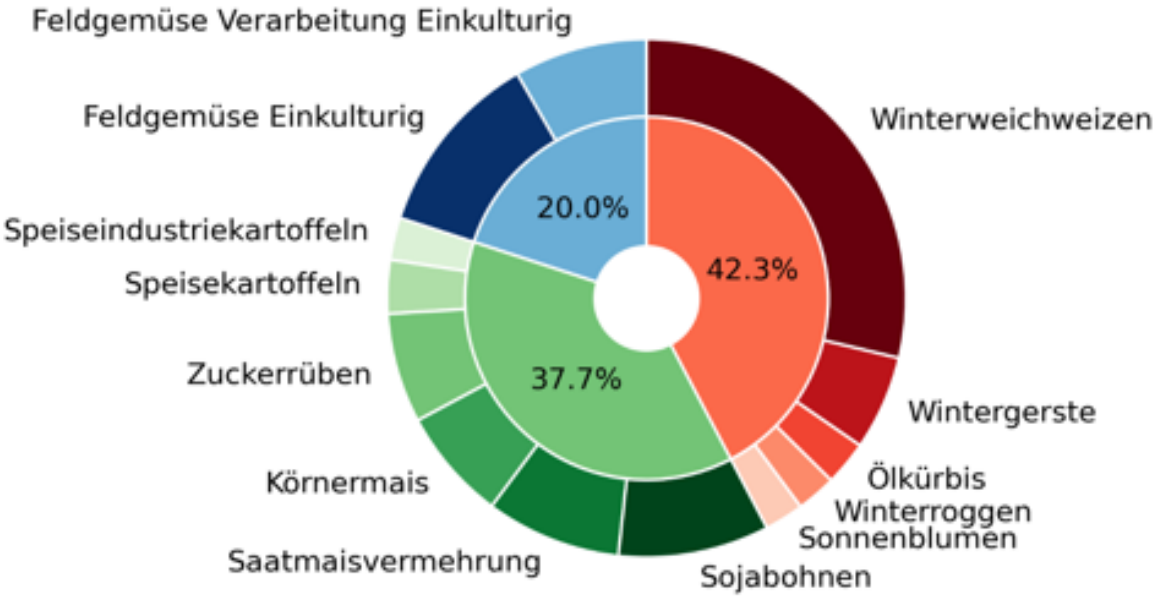
Quelle: INSPIRE Geoportal Österreich, Agrarmarkt Austria (INVEKOS), Umweltbundesamt.

Die Kulturarten Mais, Kartoffeln, Sojabohnen und Zuckerrüben nehmen im Marchfeld ca. 149 km² der Fläche ein. Für diese Kulturarten wird eine satellitengestützte Klassifizierung von bewässerten und nicht bewässerten Flächen im Testgebiet (einem Teil des Grundwasserkörpers Marchfeld) angestrebt. Zu weiteren landwirtschaftlichen Kulturen auf einer Fläche von ca. 192 km² im Grundwasserkörper Marchfeld, bei denen wiederum Winterweizen den größten Flächenanteil einnimmt, können auf Grundlage der vorliegenden Referenzdaten bisher keine Aussagen getroffen werden (Abbildung 12). Der verbleibende Flächenanteil umfasst nicht-landwirtschaftliche Gebiete und Felder mit seltenen Kulturarten.

Bezogen auf die über das INVEKOS-GIS erfasste landwirtschaftliche Fläche (rund 580 km²) im Grundwasserkörper Marchfeld lassen sich 20 % als „grundsätzlich bewässerte“ Feldgemüseflächen klassifizieren. Für 42,3 % der landwirtschaftlichen Fläche können aufgrund der

geringen Referenzdatendichte oder der bisher geringen Bewässerungswahrscheinlichkeit im gegenständlichen Projekt keine Aussagen zum Bewässerungsstatus erfolgen. Für Kulturarten die ca. 37,7 % der landwirtschaftlichen Fläche im Grundwasserkörper Marchfeld einnehmen, wurden Methoden zur satellitengestützten Klassifizierung bewässerter und nicht bewässerter Flächen erarbeitet und getestet (Abbildung 13).

Abbildung 13: Flächenvergleich (Jahr 2021) grundsätzlich bewässerter Kulturarten (blau), im Projekt klassifizierter Kulturarten (grün), und anderer häufiger Kulturarten (rot) für den Grundwasserkörper Marchfeld.



Quelle: INSPIRE Geoportal Österreich, Agrarmark Austria (INVEKOS), Umweltbundesamt.

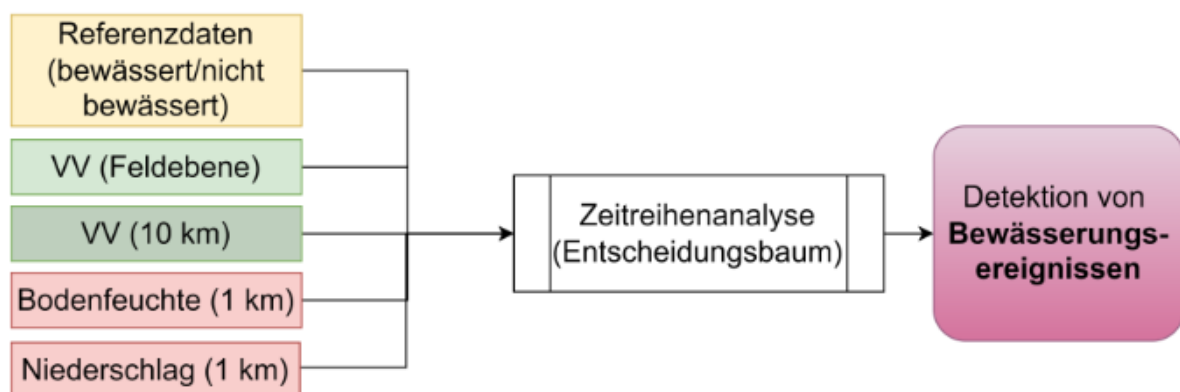
7 Satellitengestützte Detektion von Bewässerungsereignissen

7.1 Standort Landwirtschaftliche Fachschule Obersiebenbrunn

Basierend auf den detaillierten Aufzeichnungen, die für den Standort Obersiebenbrunn (Landwirtschaftliche Fachschule, LFS) zur Verfügung standen, wurde im Rahmen des Projektes zunächst überprüft, inwieweit sich **einzelne** Bewässerungs**ereignisse** in den Sentinel-Daten nachvollziehen lassen.

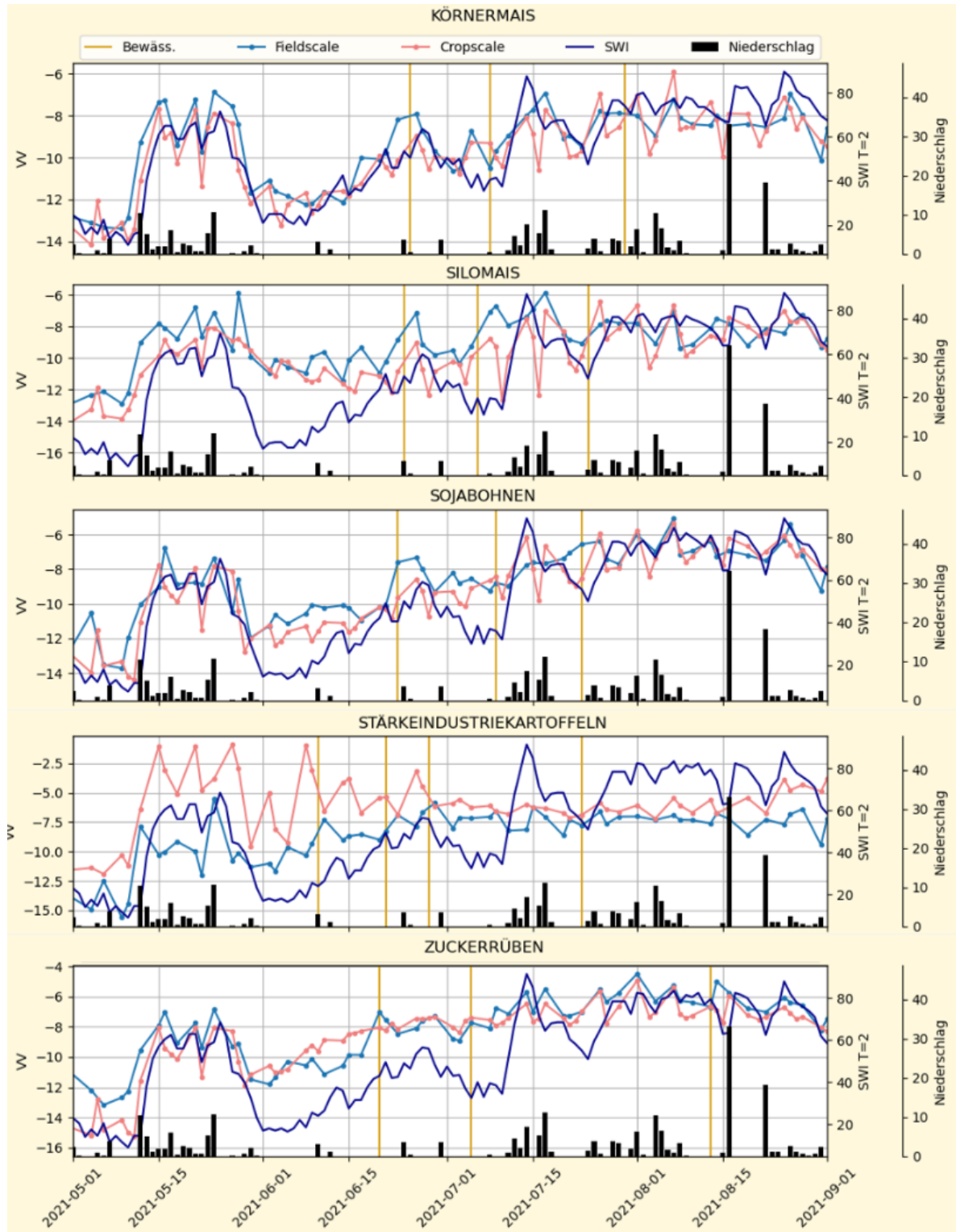
Es wurden dazu ausschließlich Sentinel-1-Daten herangezogen, da angenommen wurde, dass die auf Sentinel-2-Daten basierenden Indizes des Vegetationsstatus (NDVI) und des Pflanzenwassergehaltes (NDWI) eher längerfristige Entwicklungen der Pflanzendecke (z. B. aufgrund von Beregnung) widerspiegeln, während Sentinel-1-Daten und hier insbesondere der VV-Rückstreukoeffizient (siehe 4.2.4) unmittelbarer auf Änderungen der Bodenfeuchtigkeit reagieren und sich daher gut für die Detektion von Bewässerungsereignissen eignen.

Abbildung 14: Eingangsdaten für die qualitative Detektion von Bewässerungsereignissen.



Quelle: Umweltbundesamt

Abbildung 15: Kulturartenspezifische Zeitreihen des VV-Rückstreukoeffizienten auf der Feldebene am Standort LFS Obersiebenbrunn im Vergleich zum Kulturartenmittel im Testgebiet (*fieldscale vs. cropscale*) basierend auf Nachmittags- und Morgenüberflügen.



Quelle: Umweltbundesamt

Um Niederschlags- von Beregnungsereignissen abgrenzen zu können, wurden Sentinel-1-1-Zeitreihen (VV-Rückstreukoeffizient) einzelner tatsächlich bewässerter Felder (*fieldscale*) mit gemittelten Zeitreihen aller Felder derselben Kulturart im Umkreis von 10 km (*cropscale*) und dem mit einer räumlichen Auflösung von 1 km verfügbaren Bodenfeuchte-Index SWI (*Soil Water Index*, T2) verglichen (Abbildung 15).

Kulturarten-Zeitreihen (*cropscale*) zeigen die durchschnittliche Entwicklung der jeweiligen Kulturart im Gebiet. Für acht Felder der Kulturarten Mais, Sojabohnen, Kartoffeln und Zuckerrüben standen im Bereich Obersiebenbrunn detaillierte Daten zu Bewässerungszeitpunkten und -mengen zur Verfügung. In Abbildung 12 sind Daten von zwei ausgewählten Mais-, einem Sojabohnen-, einem Kartoffel- und einem Zuckerrübenfeld dargestellt. Bewässerungsereignisse mit Bewässerungsgaben von 25 mm sind durch vertikale, gelbe Linien gekennzeichnet. Die dunkelblaue Zeitreihe zeigt die Bodenfeuchte (SWI) im 1 km-Umkreis um das Feld, und schwarze Balken zeigen den täglichen Niederschlag im 1 km-Umkreis.

Die qualitativen Beobachtungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Mais: Sowohl nach dem ersten als auch dem zweiten Bewässerungsereignis steigt der VV-Rückstreukoeffizient im Körner- und Silomaisfeld an. Gleichzeitig bleibt die Bodenfeuchte aber niedrig. Das dritte Bewässerungsereignis fällt mit mehreren Regentagen zusammen, was zu einem generellen Anstieg des VV-Rückstreukoeffizienten führt. Auffallend ist die unterschiedliche Zeitreihenentwicklung der beiden Felder mit einer ähnlichen Kulturart: das zweite Bewässerungsereignis im Silomaisfeld führt zu einem sehr starken Anstieg der VV-Rückstreukoeffizienten-Zeitreihe in der ersten Julihälfte, der im Körnermaisfeld nicht findet.

Sojabohnen: Besonders beim ersten und dritten Bewässerungsereignis ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem VV-Rückstreukoeffizienten auf Feldebene zu dem auf Kulturartenebene zu erkennen. Zur selben Zeit sinkt die Bodenfeuchte (SWI) oder steigt erst später, bedingt durch Niederschlag, an.

Kartoffeln: Das ausgewählte Stärkeindustriekartoffelfeld wurde 2021 vier Mal bewässert. Nach jedem dieser Ereignisse ist ein Anstieg des VV-Rückstreukoeffizienten ersichtlich, obwohl die Bodenfeuchte (SWI) im 1 km-Umkreis erst später ansteigt (1. Ereignis) oder sogar sinkt (2.–3. Ereignis). Gleichzeitig sinkt der VV-Rückstreukoeffizient im 10 km-Umkreis (*cropscale*) während der ersten drei Bewässerungsereignisse. Das vierte Bewässerungsereignis fällt wiederum mit mehreren Regentagen zusammen; der folgende Anstieg im VV-Rückstreukoeffizienten lässt sich daher nicht sicher auf Bewässerung zurückführen.

Zuckerrüben: Auch im Zuckerrübenfeld kommt es zu steigenden VV-Rückstreukoeffizienten nach Bewässerungsereignissen. Besonders gut erkennbar ist das dritte Ereignis, nach dem der VV-Rückstreukoeffizient steigt, während Bodenfeuchte (SWI) und VV-Rückstreukoeffizient auf Kulturartenebene (*cropscale*) sinken (und wenige Tage später aufgrund von starkem Regen ansteigen).

Für die betrachteten Felder sind Effekte von Bewässerungsereignissen im zeitlichen Verlauf des VV-Rückstreukoeffizienten nach Beregnungsereignissen erkennbar. Allerdings können sich Beregnungs- und Niederschlagsereignisse überlagern. Kulturartenspezifische Zeitreihen (*cropscale*, 10 km Umkreis) spiegeln nicht zwangsläufig den „nicht bewässerten“ Zustand wider, insbesondere nicht in einer bewässerungsintensiven Region wie dem Marchfeld. Komplette Referenzzeitreihen, das heißt die Dokumentation aller Bewässerungsereignisse eines beregneten Referenzfeldstücks im Vergleich zu einem Feldstück gleicher Kulturart ohne Beregnung standen im Projekt nicht zur Verfügung.

Im weiteren Projektverlauf wurde deshalb auf die Entwicklung von Methoden abgezielt, mit deren Hilfe sich bewässerte Flächen auf Basis von Sentinel-Satellitendaten auch ohne die Detektion des gesamten Bewässerungsverlaufes kartieren lassen, um als Grundlage für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs zur Verfügung zu stehen.

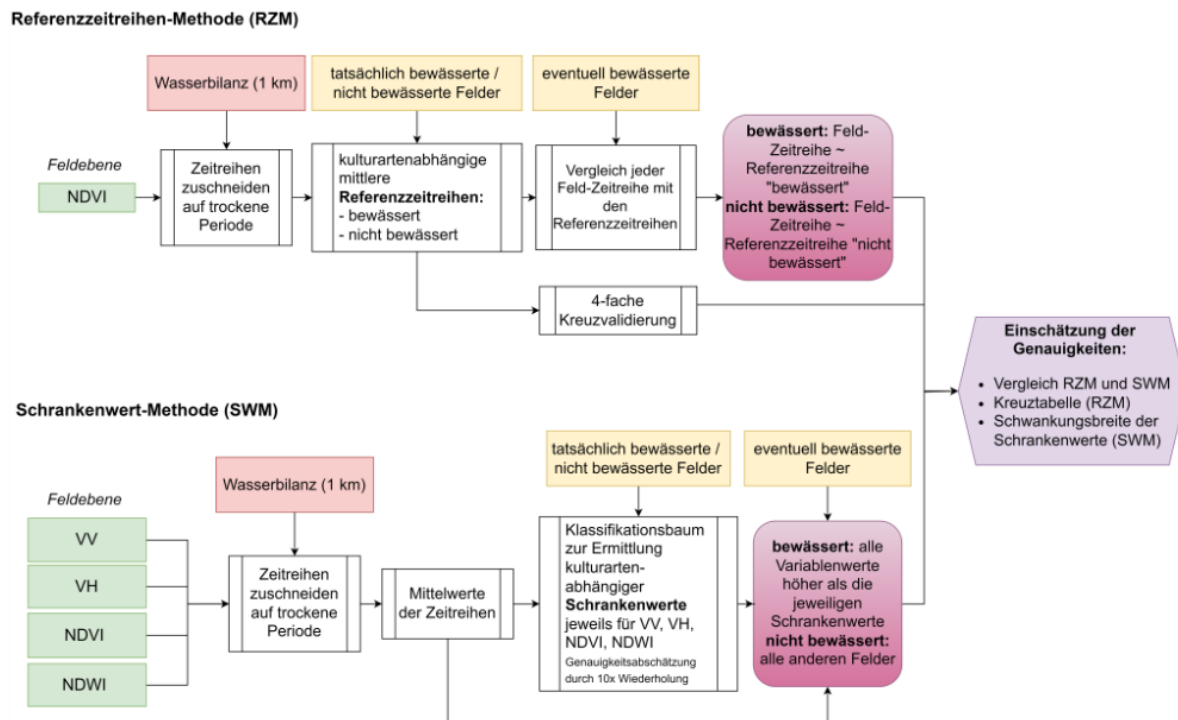
Für eine Methodik zur Detektion einzelner Bewässerungsereignisse wird beispielsweise auf die Untersuchungen von Deissenberger (2021) hingewiesen. Im Rahmen der Masterarbeit wurde im Marchfeld getestet, inwieweit sich auf Basis von Sentinel-2-Daten und dem sogenannten OPTRAM-Model (Sadeghi et al. 2015, 2017) kleinräumig Änderungen der Bodenfeuchte und somit Bewässerungsereignisse detektieren lassen.

8 Satellitengestützte Kartierung bewässerter Flächen

Für die satellitengestützte Klassifizierung des Bewässerungsstatus von Feldern im Testgebiet und Untersuchungszeitraum wurden auf Basis der erhobenen Referenzdaten zwei Methoden (Modelle) zur halbautomatischen Ausweisung des Bewässerungsstatus entwickelt und getestet. Die zwei Vorgangsweisen wurden der insgesamt geringen Referenzdatendichte (Tabelle 4) angepasst. Entwickelt wurden:

- eine Klassifizierung basierend auf NDVI-Zeitreihen (nur Sentinel-2-Daten), nachfolgend als „Referenzzeitreihen-Methode“ (RZM) bezeichnet und
- eine Klassifizierung basierend auf NDVI-, NDWI-, VH- und VV-Mittelwerten (sowohl Sentinel-1- als auch Sentinel-2-Daten), nachfolgend als „Schrankenwert-Methode“ (SWM) bezeichnet.

Abbildung 16: Ablaufschema der Referenzzeitreihen- und Schrankenwert-Methode.



Quelle: Umweltbundesamt

8.1 Referenzzeitreihen-Methode

Die nachfolgend als Referenzzeitreihen-Methode (RZM) bezeichnete Vorgangsweise basiert auf der Annahme, dass einzelne Kulturarten im Vergleich bewässerter und nicht bewässerter Felder über die Zeit deutliche Unterschiede im Wachstumsverlauf der Vegetation aufweisen, die sich auf Feldstückebene in den Zeitreihen des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) widerspiegeln.

Deshalb wurden für diese Methode zunächst die NDVI-Zeitreihen aus den Sentinel-2-Satellitendaten berechnet (siehe Kap. 4.2.4). Anschließend wurden den Zeitreihen die entsprechenden Schlagnutzungen (INVEKOS-GIS) und, soweit vorhanden, die Informationen zur Bewässerung (bewässert, nicht bewässert) aus den Referenzdatensätzen (Stichproben, Aufzeichnungen) zugeordnet.

Danach wurden für die durch Stichproben abgedeckten Kulturarten (Körnermais, Sojabohnen, Speisekartoffeln, Saatmaisvermehrung, Speiseindustriekartoffeln und Zuckerrüben) jeweils zwei gemittelte NDVI-Referenzzeitreihen für den Beregnungsstatus „bewässert“ oder „nicht bewässert“ gebildet. Im mittleren Verlauf der NDVI-Zeitreihen sind hier die erwarteten Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern der einzelnen Kulturarten im Wachstumsverlauf zum Teil deutlich ersichtlich (Abbildung 17). Unsicherheiten ergeben sich allerdings aus der Diskrepanz der Referenzdatendichte für bewässerte und nicht bewässerte Felder.

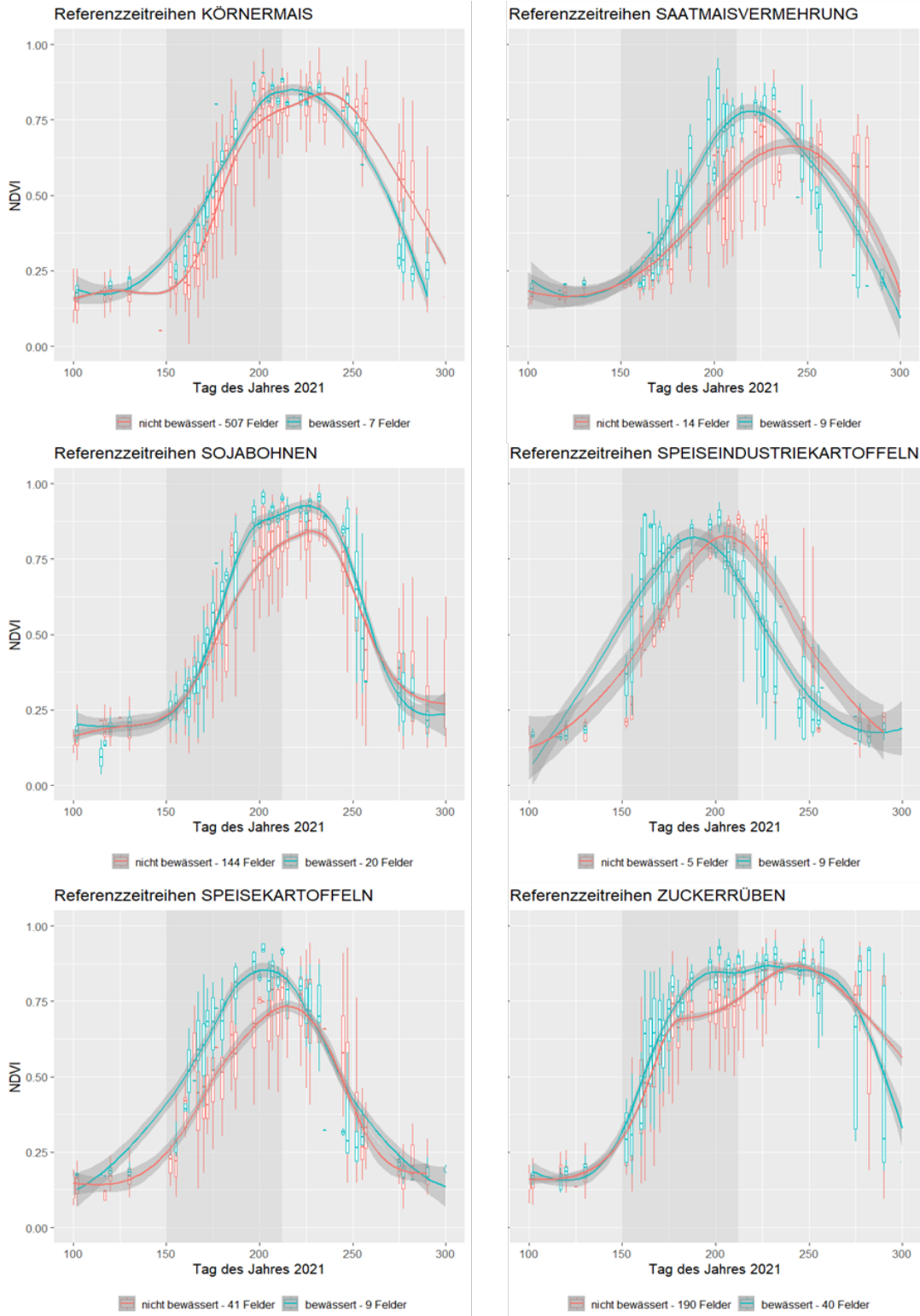
Um Felder ohne Referenzdaten zum Bewässerungsstatus zu klassifizieren, werden diese mit den Referenzzeitreihen verglichen und die NDVI-Differenz für jeden vorliegenden Zeitpunkt der Sentinel-2-Aufnahmen gebildet:

Formel 1: Berechnung der NDVI-Differenz zwischen einzeltem Feldstück und Referenzzeitreihe.

$$\left(\text{NDVI}_{\text{Feldstück}(k,t)} - \text{NDVI}_{\text{Referenzzeitreihe bewässert}(k,t)} \right) < \left[\text{NDVI}_{\text{Feldstück}(k,t)} - \text{NDVI}_{\text{Referenzzeitreihe nichtbewässert}(k,t)} \right]$$

Anmerkung: k – Kulturart, t – Aufnahmezeitpunkt

Abbildung 17: NDVI-Referenzzeitreihen für bewässerte (blau) und nicht bewässerte (rot) Kulturarten (Boxplots = Wertebereich aller Stichproben ohne Ausreißer, Linien = geglättete NDVI-Kurven über alle Stichproben mit Standardabweichung in grau).



Quelle: Umweltbundesamt

Resultierend aus der obigen Formel entsteht eine Matrix je Feldstück (Zeilen) und Zeitpunkte (Spalten) mit den Werten:

- TRUE: NDVI-Wert für das vorliegende Feldstück liegt näher an der Referenzzeitreihe „bewässert“,
- FALSE: NDVI-Wert für das vorliegende Feldstück liegt näher an der Referenzzeitreihe „nicht bewässert“,
- NA: NDVI-Wert für das vorliegende Feldstück ist aufgrund von Bewölkung oder Schatten nicht vorhanden.

Im Endergebnis werden alle TRUE-Werte (+1) und alle FALSE-Werte (-1) für jeden Sentinel-2-Aufnahmezeitpunkt im gewählten Untersuchungszeitraum summiert. Der Untersuchungszeitraum wurde mit 1. Juni bis 31. Juli 2021 festgelegt und kann bei Bedarf je Kulturart und Wetter angepasst werden. Ist das Endergebnis >3 wird das Feldstück als „bewässert“ klassifiziert, liegt das Endergebnis <-3 als „nicht bewässert“. Liegt die Bewertung zwischen -3 und 3, lässt sich keine eindeutige Zuordnung für das jeweilige Feldstück treffen, die Felder werden hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus in der Kartendarstellung als „unsicher“ klassifiziert.

Um die Genauigkeit der Methode zu überprüfen, wurde eine 4-fache Kreuzvalidierung durchgeführt. Dafür wurden die verfügbaren Stichproben für „bewässert“ und „nicht bewässert“ in vier gleich große Teildatensätze unterteilt. Drei der vier Teildatensätze wurden für die Erstellung der Referenzzeitreihen verwendet. Der verbleibende Teildatensatz wird zur Abschätzung des Klassifikationsfehlers verwendet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis jedes Set sowohl für die Erstellung der Referenzzeitreihe als auch für die Validierung verwendet wurde und somit eine Abschätzung der Genauigkeit für den gesamten Datensatz in Form einer Konfusionsmatrix (Tabelle 5) vorliegt. Zur Erstellung der Referenzzeitreihen für bewässerte Felder wurden 94 Stichproben verwendet. Für die Referenzzeitreihe nicht bewässerter Felder wurde aus den in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Daten zu betrieblichen Bewässerungsbewilligungen ($n=901$) eine zufällig gezogene Teilmenge ($n=127$) entnommen, um die Klassen auszubalancieren.

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung sind in Tabelle 5 aufbereitet. Die Bewertung des Klassifikationsmodells erfolgt dabei über die drei Kenngrößen Gesamtgenauigkeit, Produzenten- und Anwendergenauigkeit. Die Gesamtgenauigkeit entspricht dem Anteil an richtig klassifizierten Datensätze für die Klassen „bewässert“ und „nicht bewässert“. Die Produzenten-

tengengenauigkeit entspricht dem Anteil an richtig klassifizierten Stichproben. Die Anwendergenauigkeit entspricht der Zuverlässigkeit der Klassifikation und gibt den Anteil der klassifizierten Proben wieder, die mit den Stichproben der zugewiesenen Klasse tatsächlich übereinstimmen.

Tabelle 5: Kreuzvalidierungstabelle zur Darstellung der Qualität der Klassifikation auf Basis der Referenzzeitreihen-Methode.

	Referenzdaten bewässert	Referenzdaten nicht bewässert	Anwendergenauigkeit
Klassifikation: bewässert	82	39	67,8 %
Klassifikation: nicht bewässert	12	88	88,0 %
Summe	94	127	-
Produzentengenauigkeit	87,2 %	69,3 %	-
Genauigkeit	-	-	76,9 %
Kappa	-	-	54,5 %

Quelle: Umweltbundesamt

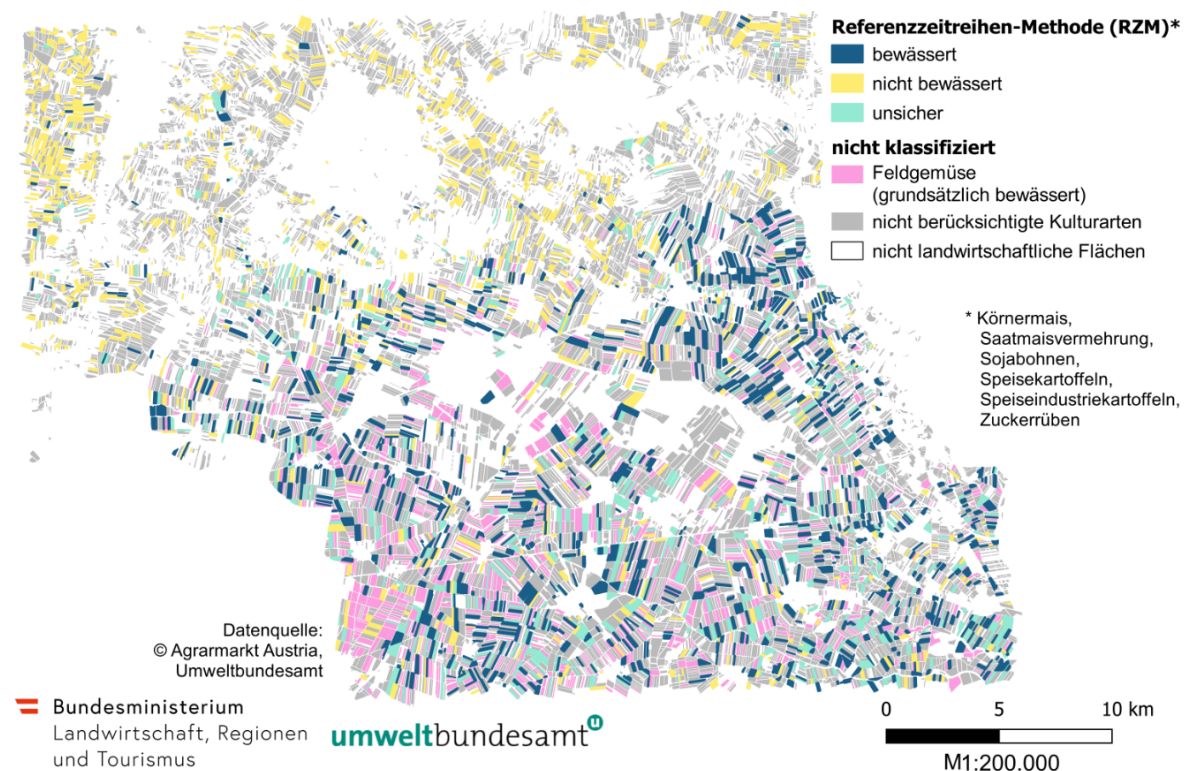
Insgesamt werden 82 von 94 Feldern mit Referenzdaten korrekt als „bewässert“ klassifiziert, die Produzentengenauigkeit liegt bei 87,2 %. Die Anwendergenauigkeit liegt bei 67,8 %, da 39 im Referenzdatensatz als „nicht bewässert“ ausgewiesene Felder in der Klassifikation fälschlicherweise als „bewässert“ identifiziert werden (Tabelle 5). Die genauen Gründe für diese Abweichung lassen sich aufgrund der insgesamt zu geringen Stichprobenanzahl nicht herausarbeiten, theoretisch kann aber natürlich auch der Referenzdatensatz oder die zugrundeliegenden Annahmen hinsichtlich des Bewässerungsstatus fehlerhaft oder ungenau sein. Beispielsweise, wenn das Fehlen einer Bewässerungsbewilligung nicht mit der Zuordnung „nicht bewässert“ gleichzusetzen ist.

In der Klasse „nicht bewässert“ werden 88 von 127 Feldern korrekt klassifiziert (Produzentengenauigkeit=69,3 %). Zwölf im Referenzdatensatz als „bewässert“ ausgewiesene Felder wurden in der Klassifikation falsch als „nicht bewässert“ erkannt. Die Anwendergenauigkeit für die „nicht bewässerten“ Felder liegt damit bei 88 % (Tabelle 5). Mögliche Gründe für diese fehlerhafte Zuordnung können auf Ungenauigkeiten zurückzuführen sein, die durch

die Vorprozessierung in den Datensatz gelangen (Wolkenmaske, weitere Aufbereitung) oder die Bewässerung hat zwar stattgefunden, spiegelt sich aber im Untersuchungszeitraum im Vegetationsstatus nicht wider. **Auf Basis der verfügbaren Referenzdaten erfolgt die Klassifikation der sechs ausgewählten Kulturarten in bewässerte und nicht bewässerte Flächen mit einer Gesamtgenauigkeit von 76,9 % und liegt damit in einer Größenordnung der in vergleichbaren Studien derzeit erreichten Genauigkeit.**

Auf das Testgebiet angewendet, ergibt sich die in Abbildung 18 dargestellte Kartierung des Bewässerungsstatus auf Basis der kulturartenspezifischen NDVI-Referenzzeitreihen-Methode.

Abbildung 18: Kartierung des Bewässerungsstatus ausgewählter Kulturarten im Testgebiet Marchfeld basierend auf der Referenzzeitreihen-Methode (Sentinel-2-Daten).



Quelle: Umweltbundesamt

Das Testgebiet, welches teilweise mit dem Grundwasserkörper Marchfeld überlappt (Abbildung 18), umfasst insgesamt landwirtschaftliche Nutzflächen von ca. 67840 ha. Feldgemüse kann in der Analyse aufgrund der fehlenden Unterscheidung einzelner Gemüsearten der

„Feldgemüse“-Klassen im INVEKOS-GIS, derzeit mit dieser kulturartenspezifischen, satellitengestützten Methode **nicht** klassifiziert werden. Um diese Informationslücke zu umgehen, ist in nachfolgenden Projekten der Klassifikation des Bewässerungsstatus eine ebenfalls auf Referenzdaten und Satellitenauswertungen beruhende Kulturartenklassifikation für die einzelnen relevanten Feldgemüse voranzustellen. Im gegenständlichen Projekt und Testgebiet kann Feldgemüse aufgrund der Bewässerungspraxis im Marchfeld als „grundsätzlich bewässert“ ausgewiesen werden. Felder, die bei einem Vergleich der einzelnen Sentinel-2-Aufnahmezeitpunkte mit den Referenzzeitreihen nicht eindeutig zuordenbar waren (Punktebewertung zwischen -3 und 3) wurden hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus in der Kartendarstellung (Abbildung 18) als „unsicher“ klassifiziert. Felder mit Kulturarten, für die keine ausreichende Abdeckung mit Referenzdaten erreicht werden konnte, wurden nicht klassifiziert.

Tabelle 6: Größe klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Referenzzeitreihen-Methode).

Kulturart	Fläche (ha)				
	bewässert	nicht bewässert	Bewässerungsstatus unsicher	nicht erfasst	gesamt
Körnermais	440	1.890	1.046	795	4.171
Saatmaisvermehrung	1.109	286	700	140	2.235
Sojabohnen	1.970	766	441	535	3.711
Speiseindustriekartoffeln	322	139	294	62	817
Speisekartoffeln	507	311	222	184	1.223
Zuckerrüben	1.203	973	364	381	2.921

Quelle: Umweltbundesamt

In Tabelle 7 ist dargestellt, welcher Anteil an Flächen für die betrachteten Kulturarten auf Basis der Referenzzeitreihen-Methode im Testgebiet als „bewässert“ oder „nicht bewässert“ klassifiziert werden konnte und für welchen Anteil keine sichere Aussage zum Bewässerungsstatus möglich war. Ein Teil der Flächen im Testgebiet kann für eine satellitenge-

stützte Klassifizierung nicht herangezogen werden, weil die räumliche Auflösung der Satellitendaten für die Erfassung kleinerer Feldstücke derzeit nicht ausreicht. Diese werden in Tabelle 6 und Tabelle 7 als „nicht erfasst“ ausgewiesen.

Tabelle 7: Anteil klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Referenzzeitreihen-Methode).

Kulturart	Fläche (%)				
	bewässert	nicht bewässert	Bewässerungsstatus unsicher	nicht erfasst	gesamt
Körnermais	11	45	25	19	100
Saatmaisvermehrung	50	13	31	6	100
Sojabohnen	53	21	12	14	100
Speiseindustriekartoffeln	39	17	36	8	100
Speisekartoffeln	41	25	18	15	100
Zuckerrüben	41	33	12	13	100

Quelle: Umweltbundesamt

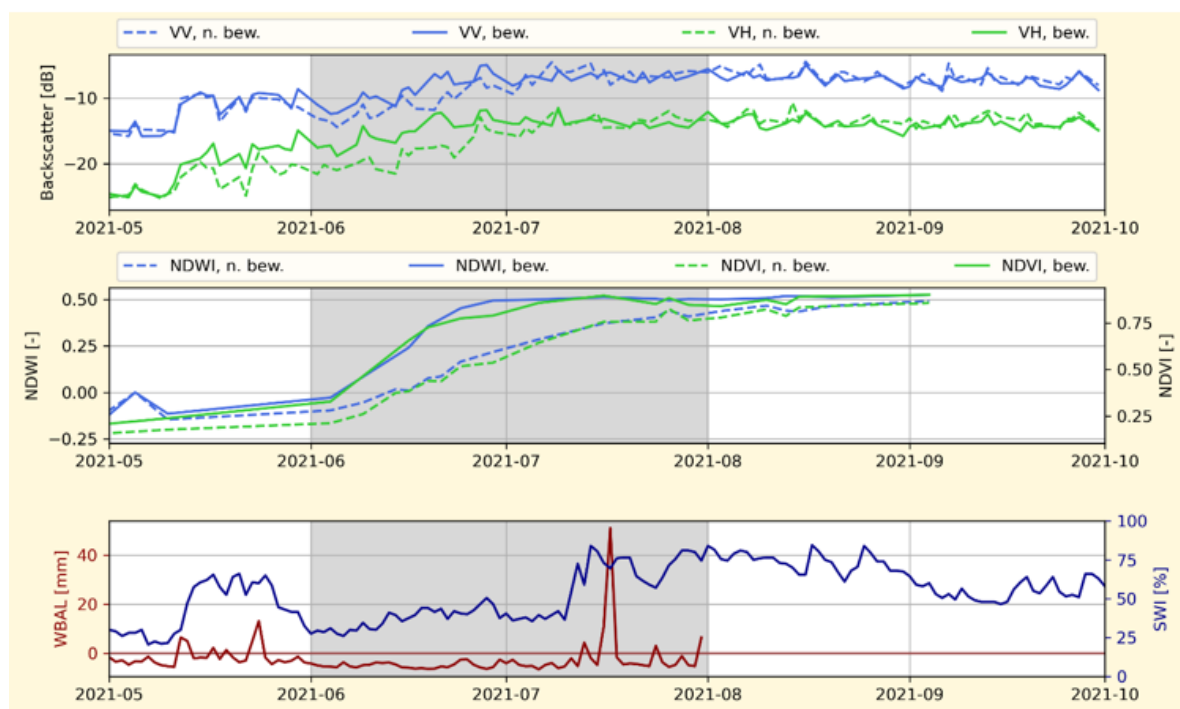
Für Körnermais wurden im Testgebiet und Untersuchungszeitraum aufgrund der NDVI-Referenzzeitreihen-Methode 11 % der Flächen als bewässert ausgewiesen, 45 % als nicht bewässert. 19 % der Flächen konnten durch die geringe Feldgröße, mit der zur Verfügung stehenden räumlichen Auflösung der Satellitendaten, nicht klassifiziert werden, für 25 % konnte der Bewässerungsstatus nicht sicher ausgewiesen werden (Tabelle 7).

Für die Felder mit Saatmaisvermehrung wurden 50 % der Flächen im Testgebiet und Untersuchungszeitraum als „bewässert“ ausgewiesen, 13 % als „nicht bewässert“. Für 31 % der Flächen bleibt der Bewässerungsstatus unsicher, 6 % der Saatmaisflächen konnten mit der Methode nicht erfasst werden. Felder mit Sojabohnen wurden zu 53 % als bewässert und 21 % als nicht bewässert ausgewiesen, für 12 % der Flächen konnte der Bewässerungsstatus aufgrund der methodischen Unsicherheiten, für 14 % aufgrund der räumlichen Auflösung der Satellitendaten nicht bestimmt werden. Die Hackfrucht-Felder (Speiseindustriekartoffeln, Speisekartoffeln, Zuckerrüben) wurden in einer ähnlichen Größenordnung (zu jeweils 39 und 41 %) als bewässert klassifiziert. Der Anteil nicht bewässerter, nicht erfasster und hinsichtlich des Bewässerungsstatus unsicherer Felder variierte entsprechend Tabelle 7.

8.2 Schrankenwert-Methode

Für die Schrankenwert-Methode (SWM) werden im Unterschied zur Referenzzeitreihen-Methode (RZM) neben Sentinel-2-Daten auch Sentinel-1-Daten herangezogen. Es wird angenommen, dass sich Beregnung auf den Wachstumsverlauf, den Pflanzenwassergehalt und die Bodenfeuchte auswirkt und sich deshalb sowohl in den NDVI- und NDWI-Zeitreihen (Sentinel-2) als auch in den Zeitreihen der VV- und VH-Rückstreukoeffizienten (Sentinel-1) erfassen lässt. Bewässerte Felder sollten in Bezug auf diese Kenngrößen kulturartenabhängig signifikante Unterschiede zu nicht bewässerten Feldern aufweisen.

Abbildung 19: Vergleich der VV-, VH-, NDVI- und NDWI-Zeitreihen eines bewässerten (durchgezogene Linien) und eines nicht bewässerten Zuckerrübenfeldes (strichlierte Linien); sowie Wasserbilanz (WBAL) und Bodenfeuchte (SWI) in der Umgebung (ca. 1x1 km). Grau hinterlegt ist die Trockenphase im Juni–Juli.



Quelle: Umweltbundesamt

Am Beispiel zweier Zuckerrübenfelder (bewässert/nicht bewässert) dargestellt in Abbildung 19 ist ersichtlich, dass vor allem der Juni 2021 und die erste Hälfte des Julis 2021 durch eine negative Wasserbilanz und geringe Bodenfeuchte (unteres Diagramm) im Bereich der beiden Felder gekennzeichnet waren. Das bewässerte Feld (durchgezogene Linien)

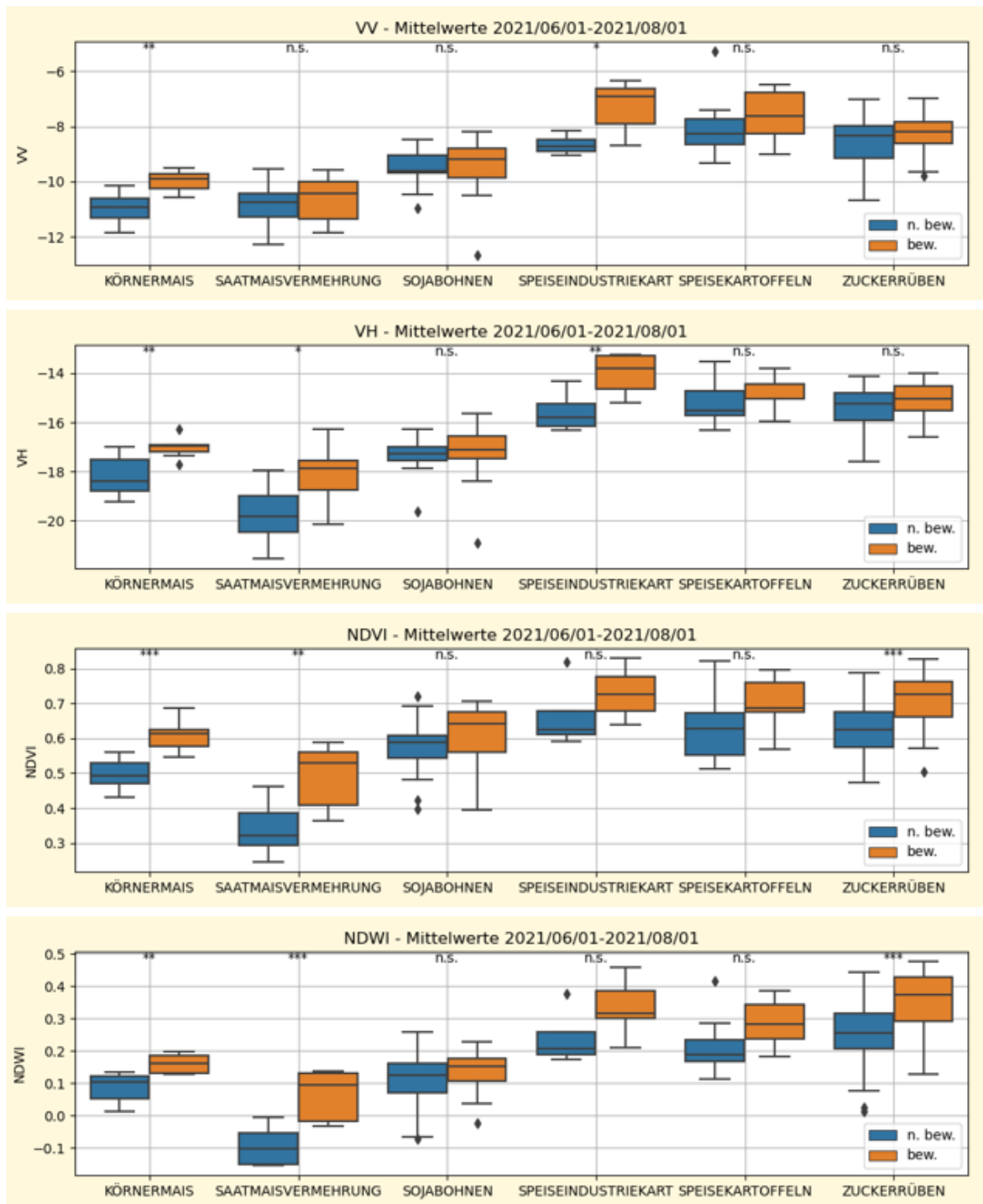
weist für diesen Zeitraum deutlich höhere Werte der VV- und VH-Rückstreukoeffizienten auf (oberes Diagramm) als das nicht bewässerte Zuckerrübenfeld (strichlierte Linien). Noch deutlicher ist der Beregnungseffekt im NDVI und NDWI (mittleres Diagramm) im Vergleich von bewässertem und nicht bewässertem Feld ersichtlich (Abbildung 19).

Die Zeitreihen der VV- und VH-Rückstreukoeffizienten (Abbildung 19, oberes Diagramm) weisen kurzfristige – nicht auf die Bewirtschaftung zurückzuführende – Schwankungen auf. Deshalb werden für die Schrankenwert-Methode im Unterschied zur Referenzzeitreihen-Methode nicht die Zeitreihen selbst, sondern **kulturartenabhängige zeitliche Mittelwerte der Sentinelvariablen und -indizes** herangezogen. Das Signalrauschen in den Zeitreihen der VV- und VH-Rückstreukoeffizienten soll auf diese Weise ausgemittelt werden.

Die Mittelwerte werden aus den Datenpunkten der vermuteten Beregnungsperiode und ausgewiesenen Trockenphase (Abbildung 19 unten, Kap. 5.3) (1. Juni bis 31. Juli 2021) gebildet. Dies ist gleichzeitig der Zeitraum mit der besten Referenzdatenlage in Bezug auf tatsächlich beobachtete Bewässerungsvorgänge. Bewässerungseffekte sollten sich im Vergleich von bewässerten und nicht bewässerten Feldern im **Gesamtniveau** der betrachteten Variablen und Indizes widerspiegeln. Gleichzeitig besteht bei Mittelwertbildung die Gefahr des Verlustes von in der Zeitreihe vorhandenen Informationen.

Die kulturartenspezifischen Verteilungen der VV-, VH-, NDVI- und NDWI-Mittelwerte aller bewässerten Felder wurden anhand von Boxplots (Abbildung 20) mit benachbarten nicht bewässerten Feldern verglichen. Mittels Zweistichproben-t-Tests wurde überprüft, ob sich die Verteilungen der Mittelwerte (VV, VH, NDVI, NDWI) bewässerter und nicht bewässerter Felder signifikant unterscheiden.

Abbildung 20: VV-, VH-, NDVI-, NDWI-Mittelwerte im Zeitraum Juni–Juli 2021 für alle bewässerten und benachbarten nicht bewässerten Felder der angegebenen Kulturarten.



Erläuterung: Signifikanz (p-Wert aus Zweistichproben-t-Test): (***) <0,001; (**) <0,01; (*) <0,05; n. s. = nicht signifikant.

Quelle: Umweltbundesamt

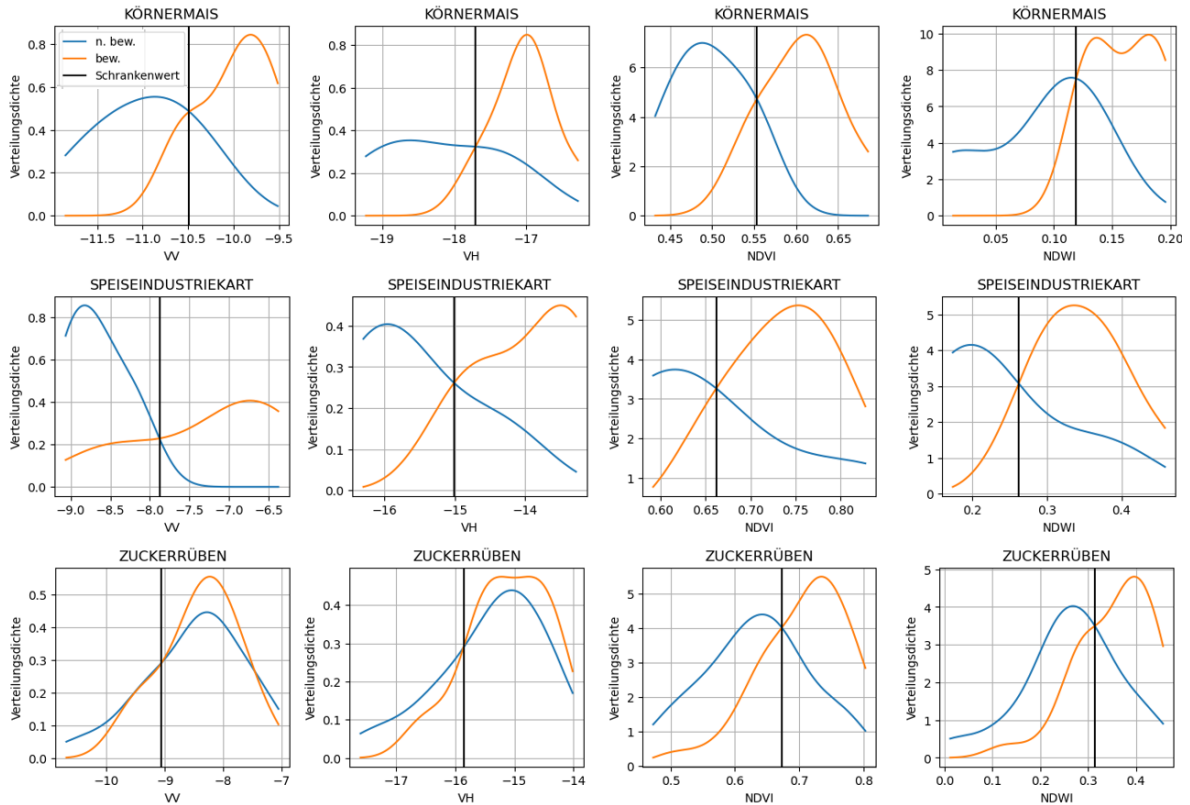
Im Vergleich bewässerter und nicht bewässerter **Körnermaiser**felder zeigen sowohl Sentinel-1-Variablen (VV, VH) als auch Sentinel-2-Indikatoren (NDVI, NDWI) signifikante Unterschiede, während für **Zuckerrüben** nur Sentinel-2-Indikatoren signifikante Unterschiede aufweisen (Abbildung 20). Für **Sojabohnen**-Felder lassen sich auf Basis der Mittelwerte für keine der untersuchten Variablen und Indikatoren signifikante Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern feststellen. Für Kartoffelfelder ergibt der t-Test nur für die Sentinel-1-Variablen (VV- und VH-Rückstreukoeffizienten) signifikante Unterschiede. Die Sentinel-2-Indikatoren der Speiseindustriekartoffeln sind allerdings von Datenausreißern beeinflusst; grundsätzlich zeigen die Verteilungen der Mittelwerte (besonders der NDWI) wenig Überlappung (Abbildung 20), erlauben also eine gute Unterscheidung bewässerter und nicht bewässerter Felder.

Unterschiede zwischen den Kulturarten in der Sensitivität der einzelnen Messgrößen lassen sich unter anderem durch die Wachstumseigenschaften der Pflanzen erklären. Während Sojabohnen und Zuckerrüben im Juni und Juli schon relativ dichten Bewuchs aufweisen und die Blätter den Boden verdecken, kann das Satellitensignal zwischen den Mais- und Kartoffelreihen den Boden noch leichter erreichen. Sentinel-1-Daten mit ihren Informationen zur Bodenfeuchtigkeit sind damit für Mais und Kartoffeln aufgrund der hier analysierten Referenzdaten aussagekräftiger als für Sojabohnen und Zuckerrüben.

Nach diesem Vergleich wurden für die Kulturarten Körnermais, Saatmaisvermehrung, Speiseindustriekartoffeln und Zuckerrüben sogenannte Schrankenwerte abgeleitet. Diese sind die Grundlage für die spätere automatische Zuordnung von Feldern mit unbekanntem Bewässerungsstatus zu den Klassen „bewässert“ oder „nicht bewässert“ mittels Entscheidungsbäumen (=Klassifikationsbäumen).

Dafür werden die Verteilungsfunktionen der VV-, VH-, NDVI- und NDWI-Mittelwerte berechnet, getrennt für „bewässerte“ und „nicht bewässerte“ Referenzdaten. Der jeweilige optimale Schrankenwert wird als Schnittpunkt der beiden Verteilungsfunktionen definiert, wie in Abbildung 21 beispielhaft für Körnermais, Speiseindustriekartoffeln und Zuckerrüben dargestellt. Für eine möglichst robuste Schätzung der Schrankenwerte sowie die Abschätzung der Schwankungsbreite der Schrankenwerte wurde der Vorgang zehn Mal mit je 75 % der Daten wiederholt.

Abbildung 21: Kulturartenspezifische Verteilungsfunktionen der VV-, VH-, NDVI- und NDWI-Mittelwerte bewässerter (orange Linien) und nicht bewässerter (blaue Linien) Felder sowie abgeleitete Schrankenwerte (schwarze Linien).



Quelle: Umweltbundesamt

Die resultierenden Schrankenwerte aller untersuchten Kulturarten sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Da die Ableitung der Schrankenwerte insgesamt auf Basis einer relativ kleinen Zahl an Referenzdaten (n, siehe Tabelle 8) erfolgte, ist die automatische Ausweisung des Bewässerungsstatus mit Unsicherheiten behaftet, was bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt beachtet werden muss.

Tabelle 8: Schrankenwerte (\pm Standardabweichung aus 10 Durchläufen) für die automatisierte Unterscheidung bewässerter (B) und nicht bewässerter (NB) Felder.

Kulturart	n	VV [dB]		VH [dB]		NDVI [-]		NDWI [-]	
		NB \leq ... < B	*	NB \leq ... < B	*	NB \leq ... < B	*	NB \leq ... < B	*
Körnermais	14	-10,56 \pm 0,14	*	-17,75 \pm 0,14	*	0,54 \pm 0,01	*	0,12 \pm 0,01	*
Saatmais- vermehrung	18	-10,70 \pm 0,60		-18,59 \pm 0,38	*	0,43 \pm 0,03	*	-0,02 \pm 0,01	*
Sojabohnen	40	-10,91 \pm 0,92		-18,54 \pm 1,34		0,53 \pm 0,10		0,07 \pm 0,06	
Speiseindustrie- kartoffeln	13	-8,00 \pm 0,23	*	-14,96 \pm 0,27	*	0,67 \pm 0,08		0,24 \pm 0,01	
Speisekartoffeln	17	-7,52 \pm 1,06		-14,54 \pm 0,72		0,64 \pm 0,01		0,25 \pm 0,06	
Zuckerrüben	80	-8,38 \pm 0,71		-15,61 \pm 0,71		0,66 \pm 0,02	*	0,31 \pm 0,02	*

Erläuterung:

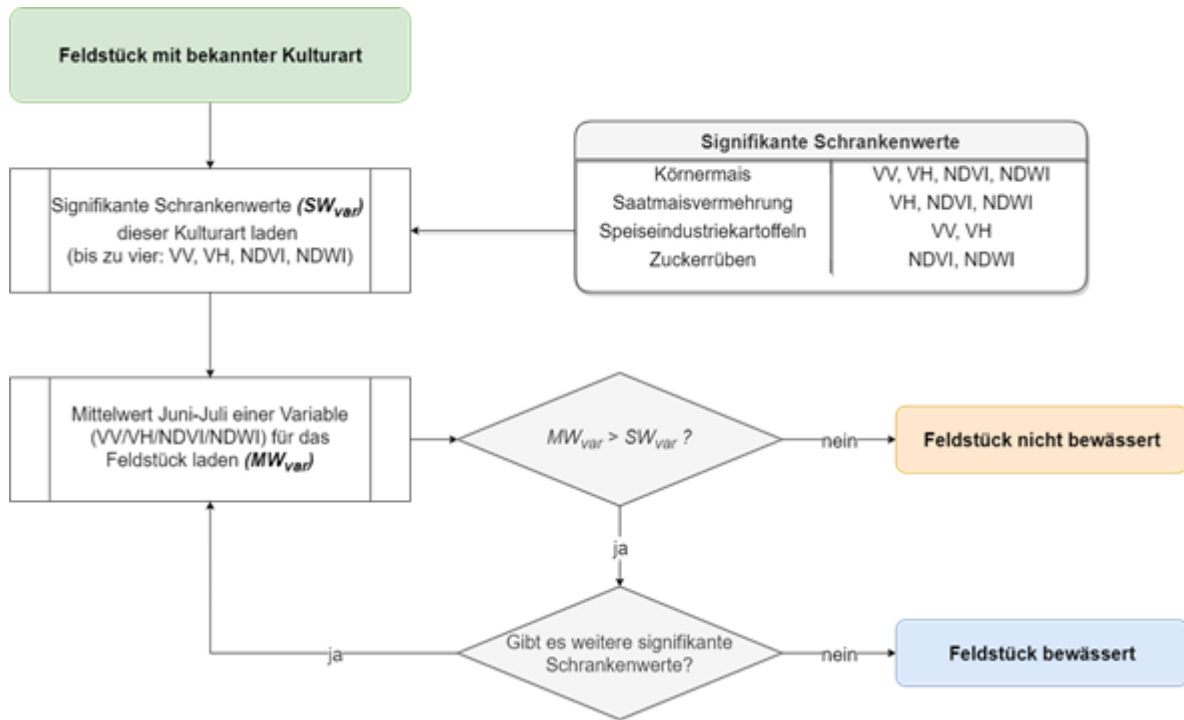
n... Anzahl der Werte, anhand derer die Schrankenwerte abgeleitet wurden.

*...signifikant (p-Wert aus Zweistichproben-t-Test \geq 0,05); dB...Dezibel.

Quelle: Umweltbundesamt

Für die Klassifizierung des Bewässerungsstatus (Abbildung 22) wurden die für den Zeitraum Juni–Juli 2021 berechneten Mittelwerte der Sentinelvariablen und -indizes der Felder mit unbekanntem Bewässerungsstatus mit den ermittelten Schrankenwerten (Tabelle 8) verglichen.

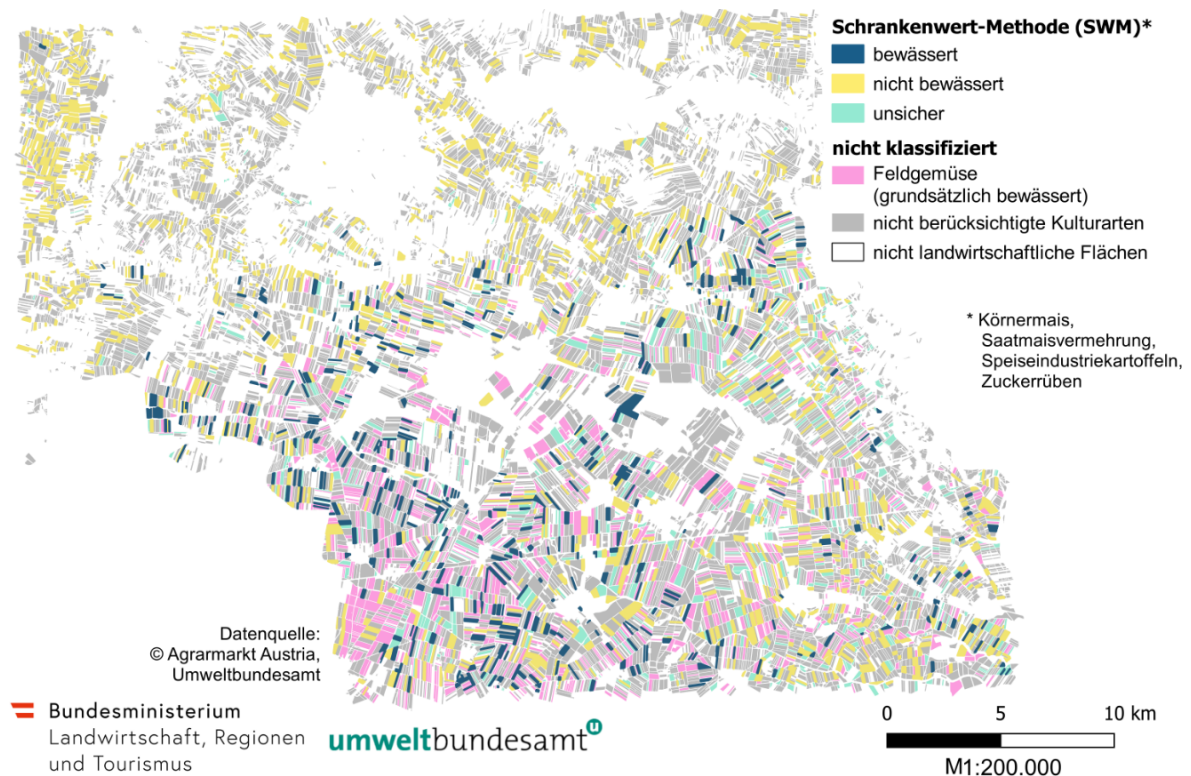
Abbildung 22: Schrankenwertmethode – kulturartenspezifische Ausweisung bewässerter Flächen.



Quelle: Umweltbundesamt

Ein Feld wurde als bewässert klassifiziert, wenn bei **allen** Sentinel-Variablen und -indizes, die in Bezug auf eine Bewässerung signifikante Unterschiede aufwiesen, der Schrankenwert überschritten wurde. Dieser konservative Ansatz wurde gewählt, um die Wahrscheinlichkeit, ein Feld fälschlicherweise als bewässert zu klassifizieren, so minimal wie möglich zu halten. Die Sentinel-1- und Sentinel-2-Variablen, für die signifikante Schrankenwerte abgeleitet werden konnten, wurden mit gleicher Gewichtung kombiniert, um die Vorteile der jeweiligen Variablen zu nützen. Wird die Klassifizierung auf Basis der Schrankenwerte auf das Testgebiet angewendet, ergibt sich der in Abbildung 23 dargestellte und in Tabelle 9 zusammengefasste Bewässerungsstatus.

Abbildung 23: Kartierung des Bewässerungsstatus im Testgebiet Marchfeld basierend auf der Schrankenwert-Methode (Kombination aus Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten).



Quelle: Umweltbundesamt

Bei Körnermais wurden im Testgebiet aufgrund der Schrankenwert-Methode (SWM) und unter Berücksichtigung der Verteilungen der VV-, VH-, NDVI-, und NDWI-Mittelwerte 10 % der Flächen als bewässert ausgewiesen, 69 % als nicht bewässert. 21 % der Flächen konnten durch die im Vergleich zur räumlichen Auflösung der Satellitendaten geringe Feldgröße nicht klassifiziert werden (Tabelle 10). Für die Saatmaisvermehrung wurden mittels SWM auf der Grundlage von VV-, NDVI- und NDWI-Schrankenwerten 21 % der Flächen als bewässert und 69 % als nicht bewässert ausgewiesen, 10 % konnten aufgrund der Feldgrößen nicht klassifiziert werden. Bei den Speiseindustriekartoffeln wurden 37 % der Felder auf Basis von VV- und VH-Schrankenwerten als bewässert klassifiziert, 57 % als nicht bewässert, 10 % waren nicht auswertbar. 34 % der Zuckerrübenfelder im Testgebiet wurden auf Basis von NDVI- und NDWI-Schrankenwerten als bewässert ausgewiesen, 50 % als nicht bewässert; 16 % konnten nicht klassifiziert werden (Tabelle 10).

Tabelle 9: Größe klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Schrankenwert-Methode).

Kulturart	Fläche (ha)				
	bewässert	nicht bewässert	Bewässerungsstatus unsicher	nicht erfasst	gesamt
Körnermais	433	2.871	-	866	4.171
Saatmaisvermehrung	466	1.535	-	234	2.235
Sojabohnen*	93	457	2.609	552	3.711
Speiseindustriekartoffeln	302	436	-	79	817
Speisekartoffeln*	36	139	860	188	1.223
Zuckerrüben	992	1.474	-	455	2.921

Erläuterung: * ... nur Referenzdaten, keine Klassifizierung

Quelle: Umweltbundesamt

Für die Kulturarten Sojabohnen und Speisekartoffeln konnten keine Schrankenwerte bestimmt werden, auf Basis derer sich die bewässerten von den nicht bewässerten Feldern dieser Kulturarten eindeutig unterscheiden ließen. Für Felder dieser beiden Kulturarten wurde nur den Feldern mit erhobenen Referenzdaten ein Bewässerungsstatus zugewiesen (Tabelle 9).

Tabelle 10: Anteil klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Schrankenwert-Methode).

Kulturart	Fläche (%)				
	bewässert	nicht bewässert	Bewässerungsstatus unsicher	nicht erfasst	gesamt
Körnermais	10	69	0	21	100
Saatmaisvermehrung	21	69	0	10	100
Sojabohnen	-	-	-	-	-
Speiseindustriekartoffeln	37	53	0	10	100

Kulturart	Fläche (%)				
	bewässert	nicht bewässert	Bewässerungsstatus unsicher	nicht erfasst	gesamt
Speisekartoffeln	-	-	-	-	-
Zuckerrüben	34	50	0	16	100

Quelle: Umweltbundesamt

Beim Vergleich der Referenzzeitreihen- und der Schrankenwert-Methode zeigte sich, dass Zuckerrüben-Felder und Felder mit Saatmaisvermehrung ähnlich häufig (zu 89 bzw. 99 %) als bewässert klassifiziert wurden (Tabelle 11). Für Körnermais und Speiseindustriekartoffeln wurden mit der Schrankenwert-Methode weniger Felder als mit der NDVI-Referenzzeitreihen-Methode als bewässert ausgewiesen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Übereinstimmung der Klassifizierung bewässerter Felder im Vergleich von Referenzzeitreihen-Methode (RZM) und Schrankenwert-Methode (SWM).

Kulturart	bewässerte Felder (RZM)	Bewässerte Felder (SWM)	SWM (% RZM)
Zuckerrüben	185	181	89
Körnermais	73	48	66
Saatmaisvermehrung	78	77	99
Speiseindustriekartoffeln	41	29	71

Quelle: Umweltbundesamt

8.3 Vergleich der Methoden

Zur satellitengestützten Ermittlung bewässerter Flächen im Testgebiet Marchfeld wurden basierend auf Referenzdatenerhebungen tatsächlich bewässerter oder tatsächlich nicht bewässerter Felder zwei methodische Ansätze geprüft. Zwei unterschiedliche Ansätze wurden gewählt, weil aufgrund der insgesamt noch zu geringen kulturartenspezifischen Referenzda-

tenmenge für tatsächlich bewässerte oder nicht bewässerte Felder methodische Kompromisse getroffen werden mussten, um dennoch eine Beschreibung der statistischen Unsicherheiten bzw. eine statistische Absicherung der Ergebnisse vornehmen zu können.

Der als „Referenzzeitreihen-Methode“ (RZM) bezeichneten Vorgangsweise liegt die Annahme zugrunde, dass sich bewässerte Felder von nicht bewässerten Feldern der gleichen Kulturart anhand der zeitlichen Entwicklung des Vegetationsstatus, auf Basis des NDVI, eindeutig von einander unterscheiden lassen. Referenzzeitreihen der nicht bewässerten“ Felder spiegeln die Vegetationsentwicklung eines Testgebietes auf Basis der gängigen Bearbeitungspraxis und natürlicher Witterungsbedingungen wider. Die Referenzzeitreihen der „bewässerten“ Felder reflektieren Veränderungen in der Vegetationsentwicklung aufgrund von Bewässerung. Felder ohne Referenzdaten können auf Basis von statistischen Ähnlichkeitsmaßen der einen oder anderen Gruppe zugeordnet werden oder bleiben, wenn aufgrund des Ähnlichkeitsmaßes keine eindeutige Unterscheidung getroffen werden kann, hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus „unsicher“ und können keiner der zwei Gruppen zugeordnet werden.

Durch die Betrachtung der NDVI-Zeitreihen liegt über den Bewässerungszeitraum eine hohe Informationsdichte vor. Über den Untersuchungszeitraum von 1. Juni bis 31. Juli 2021 konnten insgesamt 22 geeignete Sentinel-2-Aufnahmen (ca. im Abstand von 2 bis 3 Tagen) für die Ableitung der NDVI-Zeitreihen ausgewertet werden. Bewässerungseffekte wirken sich im Vegetationsstatus mit zeitlicher Verzögerung und über einen längeren Zeitraum aus und können auf Basis von Zeitreihen deutlicher erfasst werden. Einzelne Zeitpunkte des Vegetationsstatus können für bewässerte und nicht bewässerte Felder der gleichen Kulturart in der Referenzzeitreihen-Methode mehrfach verglichen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass Felder mit bewässerten Kulturen und daraus resultierendem verbesserten Vegetationsstatus detektiert werden, erhöht sich. Eine Echtzeitdokumentation von Bewässerungsereignissen in den Satellitenaufnahmen ist nicht zwangsläufig notwendig.

Um basierend auf den Sentinel-Zeitreihen ein statistisch robustes Modell zu entwickeln, das mit sehr hoher Treffsicherheit die automatische kulturartenspezifische Unterscheidung bewässerter und nicht bewässerter Felder erlaubt, lagen insgesamt noch zu wenig Referenzdaten von Stichproben tatsächlich bewässerter Felder vor. Die vorhandene Referenzdatendichte erlaubt aber die Abschätzung der Genauigkeit der mittels Ähnlichkeitsanalysen vorgenommenen Klassifizierung. Die Flächen für die **sechs klassifizierten Kulturarten** Körnermais, Speisekartoffeln, Speiseindustriekartoffeln, Saatmaisvermehrung, Zuckerrüben und Sojabohnen wurden ihrem Bewässerungsstatus mit einer Gesamtgenauigkeit von 76,9 %

richtig zugeordnet. Die Genauigkeit variierte je Kulturart in Abhängigkeit von der Referenzdatendichte.

Die mittels NDVI-Referenzzeitreihen-Methode kartierten bewässerten Flächen repräsentieren für die untersuchten Kulturarten die obere Grenze (Maximalvariante) des Ausmaßes der Bewässerungsflächen im Testgebiet und basieren auf der durch Bewässerungseffekte veränderten Vegetationsentwicklung.

In der hier als „Schrankenwert-Methode“ bezeichneten zweiten Vorgangsweise werden über den relevanten Bewässerungszeitraum sowohl aus Sentinel-1-Daten als auch aus Sentinel-2-Daten generierte, gemittelte Variablen (VV-, VH-Rückstreukoeffizienten) und Indizes (NDVI, NDWI) mit Informationen zum Boden- und Pflanzenwassergehalt sowie zum Vegetationsstatus kombiniert.

Im Gegensatz zur Referenzzeitreihen-Methode werden nicht die Zeitreihen selbst, sondern zeitliche Mittelwerte herangezogen. Auf diese Weise sollen charakteristische, kurzfristige Schwankungen in den Zeitreihen der VV- und VH-Rückstreukoeffizienten ausgemittelt werden. Bewässerungseffekte sollten sich im Vergleich zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern im Gesamtniveau der betrachteten Variablen voneinander unterscheiden.

In der Methode werden für jede Kulturart in der Klassifikation von vornherein nur statistisch signifikante Variablen oder Indizes herangezogen, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit von Fehlklassifikationen verringert und Felder eindeutig als bewässert oder nicht bewässert klassifiziert werden können, die Methode aber im Vergleich zur Referenzzeitreihen-Methode insgesamt konservativer bei der Ausweisung bewässerter Flächen ist. Dazu kommt ein möglicher Informationsverlust bei der Mittelwertbildung, so dass die Schrankenwert-Methode im Vergleich zur Referenzzeitreihen-Methode auch weniger sensitiv in Bezug auf die Detektion von Bewässerungsvorgängen ist. Im Falle von Sojabohnen und der Saatmaisvermehrung sind die statistischen Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Feldern zu gering, um sie einer automatisierten Klassifizierung zugrundezulegen. Hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus klassifiziert werden, konnten die **vier Kulturarten** Körnermais, Speiseindustriekartoffeln, Saatmaisvermehrung und Zuckerrüben.

Die mittels Schrankenwert-Methode kartierten bewässerten Flächen repräsentieren für die untersuchten Kulturarten die untere Grenze (Minimalvariante) des Ausmaßes der Bewässerungsflächen im Testgebiet.

Tabelle 12: Methodenabhängiger, kulturartenspezifischer Anteil bewässerter, nicht bewässerter, nicht erfasster und hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus unsicherer Felder im Testgebiet.

Kulturart	Bewässerte Fläche (%)		nicht bewässert		unsicher		nicht erfasst	
	SWM	RZM	SWM	RZM	SWM	RZM	SWM	RZM
Körnermais	10	11	69	45	0	25	21	19
Saatmaisvermehrung	21	50	69	13	0	31	10	6
Sojabohnen	-	53	-	21	-	12	15	14
Speiseindustriekartoffeln	37	39	53	17	0	36	10	8
Speisekartoffeln	-	41	-	25	-	18	15	15
Zuckerrüben	34	41	50	33	0	12	16	13

Erläuterung: SWM...Schrankenwert-Methode, RZM...Referenzzeitreihen-Methode

Quelle: Umweltbundesamt

Für Körnermais kann im Testgebiet auf Basis der angewendeten Methoden von einer Bewässerung von ca. 10 % der Körnermaiskfelder ausgegangen werden, für Speiseindustriekartoffeln von 37 bzw. 39 % bewässerten Feldern. Bei der Saatmaisvermehrung liegt der Anteil bewässerter Felder zwischen jedenfalls 21 % bis zu ca. 50 % der Felder, bei Sojabohnen bei bis zu 53 % der Felder. Der Anteil bewässerter Zuckerrübenfelder liegt im Testgebiet zwischen ca. 34 und 41 % (Tabelle 12).

9 Diskussion der Ergebnisse

Im gegenständlichen Projekt wurden Klassifikationsmethoden zur Ermittlung tatsächlich bewässerter Flächen im Testgebiet Marchfeld erarbeitet und anhand von Referenzdaten aus Stichprobenerhebungen getestet und validiert. Dazu wurde auf hochaufgelöste Satellitendaten (Sentinel-1,-2) aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus und ergänzende, bewässerungsrelevante Datensätze und Informationen zurückgegriffen.

9.1 Vorauswahl

Für eine Vorauswahl grundsätzlich bewässerungsrelevanter Gebiete, Zeiträume und Kulturarten in Österreich wurden statistische Erhebungen, Klimadatensätze, Kulturanleitungen und geeignete Regelblätter genutzt. Auf Basis der Vorauswahl können die mit erheblichen Aufwänden (Speicherkapazitäten, Rechenaufwand) verbundenen Auswertungen der Satellitenbilder entsprechend fokussiert werden.

Gebiete mit hoher Bewässerungsrelevanz in Österreich sind aus dem Projekt „Wasserschatz Österreichs“ BMLRT 2021a, der Auswertung agrarstatistischer Erhebungen Sinabell et al. 2018 und der räumlichen Verteilung wasserrechtlicher Bewilligungen (Wasserinformationssysteme der Bundesländer) bekannt und wurden im gegenständlichen Projekt auf Basis betrieblicher Informationen zu Bewässerungsbewilligungen (siehe Kap. 6.1) im Nordosten Österreichs in Teilbereichen der Grundwasserkörper Böhmisches Masse, Marchfeld, Tullnerfeld, Parndorfer Platte, Weinviertel und Seewinkel abgegrenzt. Auch die Grundwasserkörper Hügelland Raab West, Südliches Wiener Becken, Inntal, Tullnerfeld, Böhmisches Masse, Eferdinger Becken, Unteres Murtals, Weinviertel, Traisental, Niederösterreichisches Alpenvorland, Hügelland zwischen Mur und Raab, Schlierhügelland, Teilbereiche der Nördlichen Kalkalpen und des Heidebodens weisen landwirtschaftlich genutzte Bereiche mit relevanten Bewässerungsaktivitäten auf.

Bewässerungszeiträume können kulturartenspezifisch auf Basis von Kulturanleitungen und Regelblättern sowie basierend auf den klimatischen Bedingungen des Vegetationsjahres und entsprechenden Rasterdatensätzen der ZAMG eingegrenzt werden. Als besonders bewässerungswürdige Feldkulturen in den Bewässerungsgebieten Österreichs wurden Ge-

treide (v. a. Weizen), Körnermais, Feldgemüse, Sojabohnen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Luzerne, Raps, Körnererbsen, Silomais, Hirse und Spezialkulturen wie Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen, Blumen und Zierpflanzen sowie Erdbeeren identifiziert.

9.2 Satellitendaten

Die geeignete technische Infrastruktur zur Prozessierung der Sentinel-Daten steht mit dem Austrian Data Cube, einem Service des Earth Observation Data Centre (EODC) für die Archivierung, die Verarbeitung und den Austausch von Erdbeobachtungsdaten zur Verfügung. Das Abrufen und die weitere Aufbereitung der Daten erfolgte unter Nutzung geeigneter, frei verfügbarer Softwarepakete (Python, R).

Im vorliegenden Projekt wurden jeweils die für das Testgebiet Marchfeld relevanten Sentinel-1 bzw. Sentinel-2-Kacheln (jeweils 1–2 Kacheln) ausgewertet. Für eine flächendeckende Abdeckung Österreichs wäre die Verarbeitung von jeweils etwa 20 Sentinel-Kacheln, multipliziert mit der Anzahl der geeigneten Aufnahmen bzw. Überflüge im bewässerungsrelevanten Zeitraum notwendig (siehe Abbildung 5). Daraus resultieren erforderliche Speicher- und Rechenkapazitäten von etlichen Gigabyte. Alle rechen- und speicherintensiven Schritte der Vorprozessierung erfolgten am EODC. Sentinel-1-Daten bedürfen auf Feldebene (*fieldscale*) einer Orbitkorrektur. Kulturartenspezifische Sentinel-1-Zeitreihen (*cropscale*) benötigen keine Orbitkorrektur, da hier über große Flächen gemittelt wird, was Orbiteffekte reduziert. Für die Kartierung von Bewässerungsflächen wurden Sentinel-1-Zeitreihen außerdem nach Morgen- und Nachmittagsüberflügen getrennt, so können Morgentau- und Azimutheffekte reduziert werden, gleichzeitig wird die Datendichte insgesamt verringert. Für die Detektion von Bewässerungsereignissen ist die hohe zeitliche Auflösung allerdings wichtig, hierbei sind im Gegensatz zur Kartierung Morgen- und Nachmittagsüberflüge zu berücksichtigen.

Die Nutzung optischer Sentinel-2-Datensätze ist im feucht-kühlgemäßigten Klima Österreichs häufig durch Wolkenbedeckung eingeschränkt. Im gegenständlichen Projekt konnten im Zeitraum 1. Juni bis 31. Juli 2021 insgesamt 22 Sentinel-2-Aufnahmen ausgewertet werden. Für die flächendeckende, auf verschiedene Anbaujahre ausgeweitete Methode zur Detektion tatsächlich bewässerter Flächen in Österreich könnten zukünftig aufgrund von Wolkenbedeckung hervorgerufene Datenlücken durch ergänzende Datensätze der Landsat-8 und -9-Missionen mit abweichenden Überfliegungszeitpunkten geschlossen werden.

Eine grundsätzliche Herausforderung bleibt auch die nach wie vor bestehende Diskrepanz zwischen der räumlichen Auflösung von Satellitendaten und der in Österreich sehr kleinräumigen, landwirtschaftlichen Parzellenstruktur. Derzeit ist davon auszugehen, dass ein gewisser Anteil an Flächen (in der vorliegenden Studie kulturartenabhängig zwischen 6 und 21 %) aufgrund der Parzellengröße mit den hier getesteten Methoden für eine Kartierung nicht erfasst werden kann. Allerdings gibt es bereits Ansätze, die diese Limitierungen in der räumlichen Auflösung weiter zu reduzieren versuchen.

Die im Projekt auf Basis der aktuellen wissenschaftlichen Literatur (Bazzi et al. 2020; Massari et al. 2021; Pageot et al. 2020; Zurqani et al. 2021) für eine Unterscheidung von bewässerten und nicht bewässerten Flächen verwendeten Sentinel-1-Variablen (VV-, VH-Rückstreu-koeffizienten) und Sentinel-2-Indizes (NDVI, NDWI) erwiesen sich in Abhängigkeit von der untersuchten Kulturart auch im gegenständlichen Projekt als sensitiv gegenüber Bewässerungsaktivitäten und kulturartenabhängig sehr gut geeignet für die Klassifizierung in bewässerte und nicht bewässerte Felder. In der Weiterentwicklung der Methode könnten zukünftig zusätzliche, satellitenbasierte und in Bezug auf eine Bewässerung eventuell sensitive Eingangsvariablen, wie z. B. der *Greenness Index* (GI; Le Maire et al. 2004), der *Chlorophyll Green Index* (Datt 1999), der Blattflächenindex (z. B. Mourad et al. 2020) oder der *Surrogate Water Content* (SWC; z. B. Deissenberger 2021) berücksichtigt werden.

Die Erweiterung um zusätzliche Variablen aus Satellitenbeobachtungen ist allerdings erst sinnvoll, wenn auch die Dichte der Referenzdaten verbessert werden konnte.

9.3 Klassifikationsmethoden

Die im Projekt angewendeten statistischen Verfahren wurden der Referenzdatendichte angepasst (s. Kap. 8). Der NDVI-Referenzzeitreihen-Methode liegen Ähnlichkeitsmaße zugrunde, Schrankenwerte wurden mittels kulturartenspezifischer Klassifikationsbäume angewandt. Für eine flächendeckende Ausweisung bewässerter und nicht bewässerter landwirtschaftlicher Flächen wird die Verwendung von *Random Forest* Klassifikationsmodellen (Breiman 2001) angestrebt. Diese Modelle erfordern eine Referenzdatendichte, die in geeigneter Relation zur Anzahl der betrachteten Kulturarten (Klassen), dem Bewässerungsstatus (Features), den Eingangsvariablen und der jeweiligen Testgebietsgröße steht.

9.4 Referenzdaten

Für die Entwicklung robuster, halbautomatischer Klassifikationsverfahren zur satellitengestützten Kartierung des Bewässerungsstatus landwirtschaftlicher Flächen in Österreich sind Referenzdaten in ausreichender Datenqualität und -dichte unerlässlich. Diese werden entweder für die Entwicklung des Klassifikationsmodells selbst oder die Validierung der Ergebnisse der entwickelten Klassifikationsmodelle benötigt. Dabei ist eine ausreichende Referenzdatendichte zum Zeitpunkt der Entwicklung und Etablierung der Modelle am wichtigsten. In der weiteren Nutzung der Modelle kann diese auf ein geringeres Maß reduziert werden, dass die regelmäßige Überprüfung der Modellergebnisse in verschiedenen Anbaujahren und den jeweiligen Witterungsbedingungen erlaubt.

Wie oben erläutert, muss die Anzahl der Stichproben für die Referenzdaten in einem geeigneten Verhältnis zur Anzahl der untersuchten Bewässerungsgebiete stehen, wenn diese sich in wesentlichen Eigenschaften wie klimatischen und topographischen Bedingungen sowie boden- oder bewirtschaftungsabhängigen Faktoren unterscheiden. Ferner müssen durch die Referenzdatenerhebung alle bewässerungsrelevanten Kulturarten erfasst werden. Je Kulturart und Bewässerungsstatus (bewässert/nicht bewässert) muss sowohl eine Mindestanzahl an Proben erhoben, als auch ein proportional verhältnismäßiger Anteil kulturartenspezifischer Referenzdaten im Testgebiet erreicht werden. Das heißt die Abdeckung der Referenzdaten sollte die Bedeutung der jeweiligen Kulturart und die Bedeutung der Bewässerung im jeweiligen Testgebiet widerspiegeln. Zudem muss die räumliche Verteilung der Referenzdaten im Testgebiet repräsentativ sein, um Auswirkungen anderer räumlich variabler Faktoren auf die Klassifikation verringern zu können.

Referenzdatendichte Modelletablierung

- je Bewässerungsgebiet (Grundwasserkörper, landwirtschaftliches Kleinproduktionsgebiet),
- mit charakteristischer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsstruktur und charakteristischen klimatischen Bedingungen,
- Erfassung der gebietsspezifischen, bewässerungsrelevanten Kulturarten priorisiert nach ihrem Flächenanteil,
- mit einer Mindestanzahl an Feldern (≥ 8) und einer Abdeckung von $\geq 7,5$ % der kulturartenspezifischen Gesamtanzahl der Felder im Testgebiet,

- unter Einhaltung des (derzeitigen) Mindestkriteriums für die Flächengröße von ca. 0,25 ha bzw. einer Feldbreite von ca. 30 m.

Referenzdatendichte laufende Modellanwendung

- je Bewässerungsgebiet (Grundwasserkörper, landwirtschaftliches Kleinproduktionsgebiet),
- mit charakteristischer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsstruktur und charakteristischen klimatischen Bedingungen,
- Erfassung der gebietsspezifischen, bewässerungsrelevanten Kulturarten priorisiert nach ihrem Flächenanteil,
- in ausgewählten Bewässerungsgenossenschaften oder landwirtschaftlichen Betrieben,
- unter Einhaltung des (derzeitigen) Mindestkriteriums für die Flächengröße von ca. 0,25 ha bzw. einer Feldbreite von ca. 30 m.

10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die im gegenständlichen Projekt durchgeführten Untersuchungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Satellitengestützte Klassifikationsverfahren zur Ausweisung bewässerter Flächen müssen durch eine geeignete Vorauswahl hinsichtlich der betrachteten Gebiete, Zeiträume und Kulturarten eingegrenzt werden, um die speicher- und rechenintensiven Satellitendaten-Auswertungen effizient zu fokussieren.
- Sentinel-1 und -2-Erdbeobachtungsdaten sind geeignet, um landwirtschaftliche Feldfruchtflächen hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus zu klassifizieren und in Karten auszuweisen.
- Bewässerungseffekte spiegeln sich sowohl im Vegetationsstatus der Nutzpflanzen als auch im Boden- und Pflanzenwassergehalt wider. Während der Vegetationsstatus mittels Sentinel-2-Daten in Form des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) abgeleitet werden kann, erlauben Sentinel-1-Daten Rückschlüsse auf die Bodenfeuchte und den Pflanzenwassergehalt, vor allem auf Basis des VV-Rückstreukoeffizienten.
- Auf Basis des NDVI lassen sich charakteristische, durch Bewässerung hervorgerufene Verläufe der Vegetationsentwicklung von Feldfrüchten darstellen. Diese sind kulturartenabhängig und können für eine Unterscheidung bewässerter und nicht bewässerter Felder herangezogen werden. Die Auswertung von NDVI-Zeitreihen des Vegetationsstatus ist unabhängig von der Bewässerungsinfrastruktur, kann aber gegebenenfalls durch die Vegetationsstruktur in Zusammenhang mit der räumlichen Auflösung der Sentinel-Sensoren aber auch durch Wolkenbedeckung im Untersuchungszeitraum limitiert sein.
- Kulturartenabhängige Kombinationen des NDVI, NDWI und der VV- und VH-Rückstreukoeffizienten weisen signifikant unterschiedliche Werteverteilungen im Vergleich bewässerter und nicht bewässerter Flächen auf, welche für eine entsprechende Unterscheidung herangezogen werden können. Der Vergleich verschiedener räumlicher Skalen (Feldskala, Kulturartenskala) erlaubt es, sich die unterschiedliche räumliche Ausdehnung von Niederschlags- (meist großräumiger) und Bewässerungsereignissen

(lokal) zunutze zu machen, sowie kulturartenspezifische, mittlere Referenzzeitreihen zu bilden.

- Die Kombination der Aussagekraft von Sentinel-1- und 2-Daten ist entscheidend für eine valide flächendeckende Ausweisung von Bewässerungsflächen.
- Kulturartenspezifische Referenzdaten in ausreichender Qualität und Dichte sind die wichtigste Voraussetzung für die Modellentwicklung. Referenzdaten wurden aus Aufzeichnungspflichten und Vor-Ort-Kartierungen generiert. Die Eignung von Orthofotos wurde getestet und gezeigt. Diese können zukünftig die Referenzdatendichte und damit die Genauigkeit der Klassifikationen erheblich verbessern.
- Geeignete Arbeitsabläufe und Klassifikationsverfahren wurden getestet und stehen für eine Adaption auf weitere Kulturarten, Bewässerungsgebiete und größere Referenzdatenmengen zur Verfügung.
- Im Testgebiet konnten auf Basis der erhobenen Referenzdaten für die Kulturarten Körnermais, Saatmaisvermehrung, Speiseindustriekartoffeln und Zuckerrüben obere und untere Grenzen des bewässerten Flächenanteils ausgewiesen werden. Für die Kulturarten Sojabohnen und Speisekartoffeln wurden die oberen Grenzen des bewässerten Flächenanteils im Testgebiet ermittelt.
- Feldgemüse lässt sich auf Basis der verfügbaren Informationen (INVEKOS) auf Feldebene nicht für die einzelnen Gemüsearten ausdifferenzieren. Diese Ausdifferenzierung ist Voraussetzung für eine satellitengestützte Klassifikation des Bewässerungsstatus. Im Testgebiet wird Feldgemüse grundsätzlich bewässert.
- Die derzeitige räumliche Auflösung der verwendeten Satellitendaten und die in Österreich örtlich verbreitete kleinräumige, landwirtschaftliche Parzellenstruktur führt dazu, dass ein gewisser Anteil der landwirtschaftlichen Flächen aufgrund der Parzellengröße mit den im Projekt getesteten Methoden derzeit nicht zuverlässig erfasst werden kann. Allerdings gibt es bereits geeignete Forschungsansätze, die diese Limitierungen in der räumlichen Auflösung weiter reduzieren können.

Auf Grundlage der Projektergebnisse lassen sich für eine flächendeckende, satellitengestützte Erhebung tatsächlich bewässerter Flächen in Österreich folgende nächste Schritte ableiten:

- Verdichtung und Ausweitung der Referenzdatenerhebung auf weitere Bewässerungsperioden und -gebiete sowie bisher nicht berücksichtigte Kulturarten unter Nutzung von Aufzeichnungen, Vor-Ort-Kartierungen und Luftbildern.
- Integration einer Gemüseartenklassifizierung (Hauptgemüsearten).

- Schärfung des Klassifikationsmodells durch Integration weiterer bewässerungssensitiver Satellitenvariablen und -indizes und Anpassung der Klassifizierung an die höhere Referenzdatendichte (z. B. Random Forest Klassifikation).
- Nutzung von ergänzender Informationen aus Modellen zur Ausweisung von Trockenheit/Trockenstress und Pflanzenwasserbedarf.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewässerungsgenossenschaften im Bereich der Hochterrasse des Marchfeldes.....	25
Tabelle 2: Ausweisung der Relevanz landwirtschaftlicher Bewässerung auf Ebene der Gemeinden (Gemeindecodes), landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiete (LKPG) und Grundwasserkörper (GWK); n.a. (nicht angegeben).....	35
Tabelle 3: Hinsichtlich Hinsichtlich der Relevanz für die landwirtschaftliche Bewässerung als „hoch“ und „mittel“ eingestufte Kleinproduktionsgebiete und Grundwasserkörper.....	37
Tabelle 4: Schlagnutzungs- bzw. kulturartenabhängige Referenzdatendichte zur Bewässerung aus der Vor-Ort-GIS-Kartierung und den Aufzeichnungen im Marchfeld.	48
Tabelle 5: Kreuzvalidierungstabelle zur Darstellung der Qualität der Klassifikation auf Basis der Referenzzeitreihen-Methode.....	63
Tabelle 6: Größe klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Referenzzeitreihen-Methode).....	65
Tabelle 7: Anteil klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Referenzzeitreihen-Methode).....	66
Tabelle 8: Schrankenwerte (\pm Standardabweichung aus 10 Durchläufen) für die automatisierte Unterscheidung bewässerter (B) und nicht bewässerter (NB) Felder.....	72
Tabelle 9: Größe klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Schrankenwert-Methode).....	75
Tabelle 10: Anteil klassifizierter und nicht-klassifizierter Flächen je untersuchter Kulturart (Schrankenwert-Methode).....	75
Tabelle 11: Übereinstimmung der Klassifizierung bewässerter Felder im Vergleich von Referenzzeitreihen-Methode (RZM) und Schrankenwert-Methode (SWM). ...	76
Tabelle 12: Methodenabhängiger, kulturartenspezifischer Anteil bewässerter, nicht bewässerter, nicht erfasster und hinsichtlich ihres Bewässerungsstatus unsicherer Felder im Testgebiet.....	79
Tabelle 13: Relevante (>50 ha) Schlagnutzungen im Grundwasserkörper Marchfeld (Jahr 2021).....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete in Österreich.....	23
Abbildung 2: Lage der Referenzdatenpunkte im Testgebiet sowie Abgrenzung und Lage des Testgebietes im Verhältnis zum landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiet (LKPG) und Grundwasserkörper (GWK) Marchfeld.....	26
Abbildung 3: Die 13 Bänder (B) von Sentinel-2 in den verschiedenen Spektralbereichen (Wellenlängen) und Bandkombinationen für den NDVI (<i>normalized difference vegetation index</i>) sowie den NDWI (<i>normalized difference water index</i>).	31
Abbildung 4: Exemplarische Darstellung von über den Zeitraum 20.6.–20.7.2021 berechneten Mittelwerten für Sentinel-1 VV-(links) und VH-Rückstreuoeffizienten (Mitte) und den Sentinel-2 NDVI (rechts) eines wolkenfreien Überflugs (6.7.2021). Der Bildausschnitt zeigt Teile des Marchfelds sowie im Südwesten die Ausläufer Wiens und die Lobau.....	32
Abbildung 5: Relevanz von Bewässerung auf Ebene der Gemeinden, Grundwasserkörper und landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebieten im Verhältnis zur Abdeckung durch Sentinel-2-Kacheln.....	36
Abbildung 6: Flächenstarke Feldfrüchte in Österreich entsprechend Ernteerhebung der STATISTIK AUSTRIA (Mittelwert 2015–2020) und charakteristische, potentielle Bewässerungszeiträume aus Regelblättern und Kulturanleitungen.	39
Abbildung 7: Flächenstarke Feldgemüse in Österreich entsprechend Ernteerhebung der STATISTIK AUSTRIA (Mittelwert 2015–2019, 2021) und charakteristische, potentielle Bewässerungszeiträume aus Regelblättern und Kulturanleitungen.	40
Abbildung 8: Niederschlagssummen der ZAMG-Messstationen Franzensdorf und Gänserndorf im Marchfeld im Jahr 2021.....	44
Abbildung 9: Aktive Regenkanone im Marchfeld.	47
Abbildung 10: Detektion von berechneten Flächen in einem Luftbild (Stadt Wien, 2017)...	50
Abbildung 11: Detektion von berechneten Flächen in einem Luftbild (Stadt Wien, 2020)...	51
Abbildung 12: Flächenabdeckung (Jahr 2021) „grundsätzlich bewässerter“ Kulturarten (Feldgemüse – blau), im Projekt klassifizierter Kulturarten (Mais, Kartoffeln, Sojabohnen, Zuckerrüben – grün), und anderer häufiger Kulturarten (hauptsächlich Winterweizen – rot) im Grundwasserkörper Marchfeld.	53

Abbildung 13: Flächenvergleich (Jahr 2021) grundsätzlich bewässerter Kulturarten (blau), im Projekt klassifizierter Kulturarten (grün), und anderer häufiger Kulturarten (rot) für den Grundwasserkörper Marchfeld.....	54
Abbildung 14: Eingangsdaten für die qualitative Detektion von Bewässerungsereignissen.....	55
Abbildung 15: Kulturartenspezifische Zeitreihen des VV-Rückstreukoeffizienten auf der Feldebene am Standort LFS Obersiebenbrunn im Vergleich zum Kulturartenmittel im Testgebiet (<i>fieldscale</i> vs. <i>cropscale</i>) basierend auf Nachmittags- und Morgenüberflügen.....	56
Abbildung 16: Ablaufschema der Referenzzeitreihen- und Schrankenwert-Methode.	59
Abbildung 17: NDVI-Referenzzeitreihen für bewässerte (blau) und nicht bewässerte (rot) Kulturarten (Boxplots = Wertebereich aller Stichproben ohne Ausreißer, Linien = geglättete NDVI-Kurven über alle Stichproben mit Standardabweichung in grau).....	61
Abbildung 18: Kartierung des Bewässerungsstatus ausgewählter Kulturarten im Testgebiet Marchfeld basierend auf der Referenzzeitreihen-Methode (Sentinel-2-Daten).	64
Abbildung 19: Vergleich der VV-, VH-, NDVI- und NDWI-Zeitreihen eines bewässerten (durchgezogene Linien) und eines nicht bewässerten Zuckerrübenfeldes (strichlierte Linien); sowie Wasserbilanz (WBAL) und Bodenfeuchte (SWI) in der Umgebung (ca. 1x1 km). Grau hinterlegt ist die Trockenphase im Juni–Juli.	67
Abbildung 20: VV-, VH-, NDVI-, NDWI-Mittelwerte im Zeitraum Juni–Juli 2021 für alle bewässerten und benachbarten nicht bewässerten Felder der angegebenen Kulturarten.....	69
Abbildung 21: Kulturartenspezifische Verteilungsfunktionen der VV-, VH-, NDVI- und NDWI-Mittelwerte bewässerter (orange Linien) und nicht bewässerter (blaue Linien) Felder sowie abgeleitete Schrankenwerte (schwarze Linien).	71
Abbildung 22: Schrankenwertmethode – kulturartenspezifische Ausweisung bewässerter Flächen.....	73
Abbildung 23: Kartierung des Bewässerungsstatus im Testgebiet Marchfeld basierend auf der Schrankenwert-Methode (Kombination aus Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten).	74

Literatur

Agrarstrukturstatistik-Verordnung 2020 (BGBl. II Nr. 279/2019 idgF): Verordnung der Bundesministerin für Nachhaltigkeit und Tourismus betreffend die Statistik über die Struktur der landwirtschaftlichen Betriebe im Jahr 2020. Online verfügbar unter ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010763.

APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien.

Bauer-Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schaufler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Brocca, L., Wagner, W. (2019): Toward Global Soil Moisture Monitoring With Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57 (1), S. 520–539.

Bauer-Marschallinger, B., Paulik, C., Hochstöger, S., Mistelbauer, T., Modanesi, S., Ciabatta, L., Massari, C., Brocca, L., Wagner, W. (2018): Soil Moisture from Fusion of Scatterometer and SAR: Closing the Scale Gap with Temporal Filtering. In: Remote Sensing, 10 (7), S. 1030.

Bazzi, H., Baghdadi, N., Fayad, I., Zribi, M., Belhouchette, H., Demarez, V. (2020): Near Real-Time Irrigation Detection at Plot Scale Using Sentinel-1 Data. In: Remote Sensing, 12 (9), S. 1456.

Bazzi, H., Baghdadi, N., Ienco, D., El Hajj, M., Zribi, M., Belhouchette, H., Escorihuela, M. J., Demarez, V. (2019): Mapping Irrigated Areas Using Sentinel-1 Time Series in Catalonia, Spain. In: Remote Sensing, 11 (15), S. 1836.

BMLFUW (2011): Bewässerte Flächen in Österreich. Evaluierung des Programms LE07-13 „Abschätzung der bewässerten und bewässerungsbedürftigen Flächen sowie Integration der Daten in die INVEKOS Datenbank. wpa Beratende Ingenieure GmbH.

BMLRT (2021a): Wasserschatz Österreichs. Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers. Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.

BMLRT (2021b): Wasserschatz Österreichs - Zusammenfassung. Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers. Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.

BMLRT (2022): Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021. (GZ. 2022-0.270.788). Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.

Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., Gao, Q., Fanise, P. (2018): Soil Moisture and Irrigation Mapping in A Semi-Arid Region, Based on the Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. In: Remote Sensing, 10 (12), S. 1953.

Brocca, L., Tarpanelli, A., Filippucci, P., Dorigo, W., Zaussinger, F., Gruber, A., Fernández-Prieto, D. (2018): How much water is used for irrigation? A new approach exploiting coarse resolution satellite soil moisture products. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73, S. 752–766.

Bundesstatistikgesetz 2000 (BGBl. I Nr. 163/1999 idgF): Bundesgesetz über die Bundesstatistik. Online verfügbar unter ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10006095.

Chen, Y., Lu, D., Luo, L., Pokhrel, Y., Deb, K., Huang, J., Ran, Y. (2018): Detecting irrigation extent, frequency, and timing in a heterogeneous arid agricultural region using MODIS time series, Landsat imagery, and ancillary data. In: Remote Sensing of Environment, 204, S. 197–211.

Datenschutzgesetz (DSG; BGBl. I Nr. 165/1999 idgF): Bundesgesetz zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten. Online verfügbar unter ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=bundesnormen&Gesetzesnummer=10001597.

Datenschutz-Grundverordnung (RL 95/46/EG): Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG). Abl. 119/1. Online verfügbar unter eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32016R0679.

Datt, B. (1999): A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves. In: Journal of Plant Physiology, 154 (1), S. 30–36.

Deissenberger, F. (2021): Remote monitoring of irrigated areas in the Marchfeld region. Master thesis, Universität für Bodenkultur, Wien.

Emminger, M. (2017): Klimacharakteristik des Weinviertels. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien. Online verfügbar unter permalink.obvsg.at/bok/AC13678778.

Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M., Baghdadi, N., Segui, P. (2018): Irrigation Mapping Using Sentinel-1 Time Series at Field Scale. In: Remote Sensing, 10 (9), S. 1495.

Hagolle, O., Huc, M., Pascual, D. V., Dedieu, G. (2010): A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL-2 images. In: Remote Sensing of Environment, 114 (8), S. 1747–1755.

Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., Bettadpur, S. V., Byun, S. H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fahnstock, E., Harvey, N., Kang, Z., Kruizinga, G. L. H., Loomis, B. D., McCullough, C., Murböck, M., Nagel, P., Paik, M., Pie, N., Poole, S., Strelakov, D., Tamisiea, M. E., Wang, F., Watkins, M. M., Wen, H.-Y., Wiese, D. N., Yuan, D.-N. (2020): Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. In: Geophysical Research Letters, 47 (12).

Le Maire, G., François, C., Dufrêne, E. (2004): Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. In: Remote Sensing of Environment, 89 (1), S. 1–28.

Le Page, M., Jarlan, L., El Hajj, M. M., Zribi, M., Baghdadi, N., Boone, A. (2020): Potential for the Detection of Irrigation Events on Maize Plots Using Sentinel-1 Soil Moisture Products. In: Remote Sensing, 12 (10), S. 1621.

Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H.-P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I., Rosnay, P. de, Dumont, M., Giroto, M., Immerzeel, W. W., Jonas, T., Kim, E. J., Koch, I., Marty, C., Saloranta, T., Schöber, J., Lannoy, G. J. M. de (2019): Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. In: Nature communications, 10 (1), S. 4629.

Massari, C., Modanesi, S., Dari, J., Gruber, A., Lannoy, G. J. M. de, Giroto, M., Quintana-Seguí, P., Le Page, M., Jarlan, L., Zribi, M., Ouaadi, N., Vreugdenhil, M., Zappa, L., Dorigo, W., Wagner, W., Brombacher, J., Pelgrum, H., Jaquot, P., Freeman, V., Volden, E., Fernandez Prieto, D., Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L. (2021): A Review of Irrigation Information Retrievals from Space and Their Utility for Users. In: *Remote Sensing*, 13 (20), S. 4112.

McFeeters, S. K. (1996): The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. In: *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), S. 1425–1432.

Modanesi, S.; Massari, C.; Bechtold, M.; Lievens, H.; Tarpanelli, A.; Brocca, L.; Zappa, L.; Lannoy, G. J. M. de (2022): Challenges and benefits of quantifying irrigation through the assimilation of Sentinel-1 backscatter observations into Noah-MP.

Mourad, R., Jaafar, H., Anderson, M., Gao, F. (2020): Assessment of Leaf Area Index Models Using Harmonized Landsat and Sentinel-2 Surface Reflectance Data over a Semi-Arid Irrigated Landscape. In: *Remote Sensing*, 12 (19), S. 3121.

ÖWAV (2016): ÖWAV-Regelblatt 407. Empfehlungen für die Bewässerung. Überarbeitete Neuauflage des ÖWAV-Arbeitsbehelfs Nr. 11 (2003). Wien: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.

Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., Cervantes, C. (2010): Remote Sensing of Irrigated Agriculture: Opportunities and Challenges. In: *Remote Sensing*, 2 (9), S. 2274–2304.

Pageot, Y., Baup, F., Inglada, J., Baghdadi, N., Demarez, V. (2020): Detection of Irrigated and Rainfed Crops in Temperate Areas Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series. In: *Remote Sensing*, 12 (18), S. 3044.

Palmer, W. (1965): Meteorologic drought. In: U.S. Weather Bureau, Res. Pap., No. 45.

Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., Notarnicola, C., Pasolli, L., Reppucci, A. (2013): Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation. In: *Remote Sensing of Environment*, 134, S. 234–248.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [R-project.org/](https://www.R-project.org/)

Reuß, F., Greimeister-Pfeil, I., Vreugdenhil, M., Wagner, W. (2021): Comparison of Long Short-Term Memory Networks and Random Forest for Sentinel-1 Time Series Based Large Scale Crop Classification. In: Remote Sensing, 13 (24), S. 5000.

Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., Lo, M.-H. (2018): Emerging trends in global freshwater availability. In: Nature, 557 (7707), S. 651–659.

Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., Jones, S. (2017): The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. In: Remote Sensing of Environment, 198, S. 52–68.

Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J.-M., Frenken, K., Feick, S. (2005): Development and validation of the global map of irrigation areas. In: Hydrology and Earth System Sciences, (9), S. 535–547.

Sinabell, F., Henn, D. (2018): Land- und Forstwirtschaft in Österreich. Fachliche Grundlagen für eine differenzierte Bewertung. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.

Stenitzer, E., Hoesch, J. (2005): Grundwasserneubildung im Marchfeld - Lysimetermessungen und Modellrechnungen. In: 11. Gumpensteiner Lysimetertagung 2005, S. 41–44.

Thenkabail, P. S., Biradar, C. M., Noojipady, P., Dheeravath, V., Li, Y., Velpuri, M., Gumma, M., Gangalakunta, O. R. P., Turrall, H., Cai, X., Vithanage, J., Schull, M. A., Dutta, R. (2009): Global irrigated area map (GIAM), derived from remote sensing, for the end of the last millennium. In: International Journal of Remote Sensing, 30 (14), S. 3679–3733.

Tucker, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. In: Remote Sensing of Environment, 8 (2), S. 127–150.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. In: Journal of Climate, 23 (7), S. 1696–1718.

Vuolo, F., D’Urso, G., Michele, C. de, Bianchi, B., Cutting, M. (2015): Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. In: Agricultural Water Management, 147, S. 82–95.

Vuolo, F., Neuwirth, M., Immitzer, M., Atzberger, C., Ng, W.-T. (2018): How much does multi-temporal Sentinel-2 data improve crop type classification? In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 72, S. 122–130.

Wagner, W., Pathe, C., Doubkova, M., Sabel, D., Bartsch, A., Hasenauer, S., Blöschl, G., Scipal, K., Martínez-Fernández, J., Löw, A. (2008): Temporal Stability of Soil Moisture and Radar Backscatter Observed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). In: Sensors (Basel, Switzerland), 8 (2), S. 1174–1197.

Wasserrahmenrichtlinie (RL 2000/60/EG): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Abl. 327/1. Online verfügbar unter eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32000L0060&from=DE.

Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG; BGBl. Nr. 215/1959 idgF): Wasserrechtsgesetz 1959. Online verfügbar unter ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010290.

Zappa, L., Schlaffer, S., Bauer-Marschallinger, B., Nendel, C., Zimmerman, B., Dorigo, W. (2021): Detection and Quantification of Irrigation Water Amounts at 500 m Using Sentinel-1 Surface Soil Moisture. In: Remote Sensing, 13 (9), S. 1727.

Zurqani, H. A., Allen, J. S., Post, C. J., Pellett, C. A., Walker, T. C. (2021): Mapping and quantifying agricultural irrigation in heterogeneous landscapes using Google Earth Engine. In: Remote Sensing Applications: Society and Environment, 23, S. 100590.

Anhang

Tabelle 13: Relevante (>50 ha) Schlagnutzungen im Grundwasserkörper Marchfeld (Jahr 2021).

Schlagnutzung	Fläche (ha)	Schlagnutzung	Fläche (ha)
Winterweichweizen	11.339	Einmähdige Wiese	185
Feldgemüse einkulturig	4.608	Gewürzpflanzen	162
Winterhartweizen (Durum)	3.740	Speisekürbis	158
Sojabohnen	3.723	Sonstiges Feldfutter	154
Saatmaisvermehrung	3.335	Wechselwiese (Egart, Ackerweide)	153
Feldgemüse Verarbeitung einkulturig	3.287	Platterbsen	151
Grünbrache	2.857	Futtergräser	148
Körnermais	2.770	Wicken - Getreide Gemenge	145
Zuckerrüben	2.707	Sonstige Ackerkulturen	143
Wintergerste	2.334	Ackerbohnen / Erbsengemenge	136
Speisekartoffeln	1.317	Ackerbohnen (Puffbohnen)	120
Sommerhartweizen (Durum)	1.239	Grünlandbrache	120
Ölkürbis	1.099	Kichererbsen	105
Luzerne	1.089	Klee	104
Speiseindustriekartoffeln	1.043	Sonstige Ackerflächen	99
Winterroggen	980	Dauerweide	90
Sonnenblumen	970	Senf	88
Sommergerste	705	Sorghum	88
Mähwiese/-Weide zwei Nutzungen	663	Linsen	87
Feldgemüse Verarbeitung mehrkulturig	599	Emmer oder Einkorn (Winterung)	87
Winterraps	590	Stärkeindustriekartoffeln	76
Wintertriticale	563	Feldgemüse ohne Ernte	76

Schlagnutzung	Fläche (ha)	Schlagnutzung	Fläche (ha)
Winterdinkel (Spelz)	528	Sommerweichweizen	74
Zuckermais	444	Sommerhafer	70
Rollrasen	323	Winterkümmel	61
Körnererbsen	269	Erdbeeren	60
Silomais	266	Winterwicken	55
Hirse	209	Sommerwicken	51
Feldgemüse mehrkulturig	205	Schalenfrüchte (Walnüsse, Haselnüsse, ...)	50
Frühkartoffeln	191		

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
AMA	Agrarmarkt Austria
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
AS	Agrarstrukturerhebung
ASCAT	Advanced Scatterometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BFW	Bundesforschungszentrum für Wald
BMLRT	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
CGLS	Copernicus Global Land Service
DSG	Datenschutzgesetz
EODC	Earth Observation Data Centre
EODC	Earth Observation Data Centre
ESA	European Space Agency
ESA	European Space Agency
EU	Europäische Union
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GCOM-W	Global Change Observation Mission – Water
GIAM	Global Irrigated Area Map
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment
Ha	Hektar
idgF	in der geltenden Fassung
INVEKOS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
km	Kilometer
kW	Kilowatt
LHPG	Landwirtschaftliches Hauptproduktionsgebiet
LKPG	Landwirtschaftliches Kleinproduktionsgebiet

Abkürzung	Bezeichnung
AMA	Agrarmarkt Austria
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MFA	Mehrfachantrag
MIRAS	Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	Multispectral imager
NASA	US National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex, Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalisierter Differenzwasserindex, normalized difference water index
NOAA	US National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI	Operational Land Imager
PDSI	Palmer Drought Severity Index
SAR	Synthetic Aperture Radar
SMAP	Soil Moisture Active Passive
SMOS	Soil Moisture Ocean Salinity
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SWI	Bodenfeuchteindex, Soil Water Index
SWIR	Shortwave Infrared, kurzwelliges Infrarotlicht
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TU Wien	Technische Universität Wien
USGS	United States Geological Survey
VH-backscatter	vertikal kreuzpolarisierter Rückstreukoeffizient
VIS-NIR	Visible and near-infrared
VV-backscatter	vertikal kopolarisierter Rückstreukoeffizient
WRG	Wasserrechtsgesetz
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
Stubenring 1, 1010 Wien
bml.gv.at