GFI Grundwasser-Consulting-Institut
GmbH Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden

Ingenieurtechnische Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch Bewirtschaftung von Kippenflächen Witznitz (Nachsorgephase 2018-2022)

Jahresbericht 2020

links: Luzerne an K5 am 29.06.2020; rechts: Mais an K1 am 29.06.2020

Dresden, den 19.07.2021

Titel	**Ingenieurtechnische Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch Bewirtschaftung von Kippenflächen Witznitz (Nachsorgephase 2018-2022)** **Jahresbericht 2020**
Auftraggeber	**LMBV** Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH Walter-Köhn-Straße 2, 04356 Leipzig LMBV Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
Auftragnehmer	GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden Meraner Str. 10, 01217 Dresden GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden *im Grundwasser-Zentrum Dresden*
Auftragsnummer	45058342 vom 03.12.2018
Bearbeiter	Dipl.-Ing. M. Rumpel Dr. R. Madi Dr.-Ing. R. Giese
Mitarbeit	Prof. Dr.-Ing. H. Mansel — IBGW GmbH Leipzig Dipl.-Hydrol. A. Winkler — BfUL Brandis
Datum	Dresden, den 19.07.2021

Dipl.-Ing. M. Rumpel (Projektleiter) | Dr. F. Bilek (Geschäftsführer) | Dr. R. Giese (Geschäftsführer)

Anschrift:
GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
Meraner Straße 10
01217 Dresden

Fon +49.351.4050660
Fax +49.351.4050669
info@gfi-dresden.de
www.gfi-dresden.de

Bankverbindung:
Deutsche Kreditbank AG
IBAN DE18 1203 0000 1020 0151 43
SWIFT BIC: BYLADEM1001

Handelsregister:
Amtsgericht Dresden
HR B 10748
USt-IdNr. DE 169148266

Geschäftsführer
Dr.-Ing. habil. Th. Luckner
Prof. Dr.-Ing. habil. F. Bilek
Dr.-Ing. R. Giese

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-19633-01-00
Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage aufgeführten Akkreditierungsumfang.

INNOVATIV DURCH FORSCHUNG

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **6**

Tabellenverzeichnis **8**

Anlagenverzeichnis **9**

Abkürzungsverzeichnis **10**

1 Veranlassung **11**

2 Zusammenstellung der Arbeiten **14**

3 Auswertung der Monitoringergebnisse **16**

3.1 Festlegung der Kontrollflächen 16

3.2 Ernteerträge der Kontrollflächen 17

3.3 Ernteerträge der Lysimeter (BfUL) 19

3.4 Vergleich der Ernteerträge 23

3.5 Phänologie 26

3.5.1 Wuchshöhen von Luzerne auf den Kontrollflächen 26

3.5.2 Wuchshöhen auf den Lysimetern 27

3.6 Beschädigung der Lysimeterstation Witznitz 29

3.7 Klima 29

3.8 Bodenwasserhaushalt an den Lysimetern 34

4 Sondermonitoring **40**

4.1 GW-Standsentwicklung und Bodenwassermessstellen 42

5 Laufendhaltung der Modelle **48**

5.1 1D-Wasserhaushaltsmodell 48

5.2 Aufbau des 2D-Modells Witznitz 49

5.2.1 Konzeptionelles Modell 50

5.2.2 Modellaufbau 51

5.2.3 Durchführung der Modellkalibrierung 54

5.2.3.1 Ermittlung der Startbodenparameter mit Hilfe der Versickerungsversuche 55

5.2.3.2 2D-Strukturmodell 56

5.2.3.3 Implementierung der bodenhydraulischen Parameter im Modell 57

5.2.4 Kalibrierungsergebnisse 58

5.2.5 Diskussion und Ausblick 61

5.3 Grundwassermodell 62

5.3.1 Fortschreibung 62

5.3.2 Analyse der Einflüsse Klima und Landnutzung auf die GW-Ganglinien („Ganglinienseparation“) 66

6 Zusammenfassung 68

7 Literatur 71

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1 Lage der Versuchsflächen und der Kontrollpunkte K1 bis K8 auf den Bewirtschaftungsflächen A bis E im Südbereich der Kippe (links: bisherige Lage; rechts: neue Lage) 16

Abb. 3-2 Luzerneaufwuchs im Mai 2020 auf den Lysimetern 14/2 (links) und 14/4 (rechts) an der Station Brandis nach Neuaussaat im Oktober 2019 (Foto: Frau Winkler, BfUL) 20

Abb. 3-3 Darstellung der Frischmassenerträge von Luzerne, Knaulgras bzw. Luzerne/Knaulgras auf den Lysimetern in [dt FM/ha] der Station Brandis 21

Abb. 3-4 Ernteerträge Knaulgras bzw. Knaulgras/Luzerne auf den Versuchsflächen und Lysimetern 23

Abb. 3-5 Ernteerträge Luzerne auf den Versuchsflächen und den Lysimetern 24

Abb. 3-6 Ernteerträge Luzerne auf den Bewirtschaftungsflächen (K1 bis K8) 24

Abb. 3-7 Wuchshöhe Luzerne auf den Kontrollflächen K5 und K7-K8 (Mittelwert) 26

Abb. 3-8 Wuchshöhe für Mais auf den Kontrollflächen K1/K2 (Fläche A), K4/K6 (Fläche C) und K3 (Fläche D) 26

Abb. 3-9 Wuchshöhen für verschiedene Kulturen auf den Lysimetern von 2009 – 2020 28

Abb. 3-10 Niederschläge (korrigiert) in Brandis und Witznitz 29

Abb. 3-11 Lufttemperatur in Brandis und Witznitz (BfUL) 31

Abb. 3-12 Thermopluviogramm der Jahreszeiten im Zeitraum 2018 bis 2020 (Quelle: BfUL) 31

Abb. 3-13 Potenzielle Verdunstung in Brandis und Witznitz nach Turc-Wendling 32

Abb. 3-14 Klimatische Wasserbilanz in Brandis und Witznitz 33

Abb. 3-15 Darstellung der realen Verdunstung auf den 12er Lysimetern 34

Abb. 3-16 Darstellung der realen Verdunstung auf den 14er Lysimetern 35

Abb. 3-17 Darstellung der Bodenwasserausschöpfung der 12er Lysimeter 36

Abb. 3-18 Darstellung der Bodenwasserausschöpfung der 14er Lysimeter 37

Abb. 3-19 Darstellung der Sickerwassermengen auf den 12er Lysimetern 37

Abb. 3-20 Darstellung der Sickerwassermengen auf den 14er Lysimetern 38

Abb. 4-1 Lage der alten und neu errichteten GWM 7642 und 7645 auf der Kippe Witznitz 40

Abb. 4-2 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate i_f) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate i_f in mm/h während des Versuchs [9] ... 41

Abb. 4-3 Entwicklung der GW-Stände an den Standorten der drei Sondermessstellen ... 43

Abb. 4-4 Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte am Standort 1 in 1m und 2,5 m Tiefe ... 44

Abb. 4-5 Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte am Standort 2 in 1m und 2,5 m Tiefe ... 45

Abb. 4-6 Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte am Standort 3 in 1m und 2,5 m Tiefe ... 47

Abb. 5-1 Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen kumulierten Sickerwassermengen für das Knaulgras bzw. Knaulgras/Luzerne-Lysimeter 14/2 sowie der korrigierte Niederschlag (Tageswert Station Brandis) ... 48

Abb. 5-2 Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen kumulierten Sickerwassermengen für das Knaulgras bzw. Luzerne-Lysimeter 14/4 sowie der korrigierte Niederschlag (Tageswert Station Brandis) ... 49

Abb. 5-3 Konzeptionelles 2D-Modell der Kippe Witznitz ... 50

Abb. 5-4 Diskretisierung und Lage der Überwachungspunkte (rot), Maße in Meter ... 51

Abb. 5-5 Darstellung der Randbedingungen des Strömungsmodells (hellgrün: RB Atmosphäre; blau: RB zeitabhängige Druckhöhe; rot: konstante Druckhöhe; weiß: keine Flüsse) ... 52

Abb. 5-6 Klimatische und hydraulische Eingangsdaten in dem Zeitraum 22.5.2019 bis 15.05.2020 ... 53

Abb. 5-7 schematische Darstellung das für die Kalibrierung verwendete geologische Strukturmodell ... 56

Abb. 5-8 Modell- und Messwerte der pF-Werte und Bodenfeuchte im Zeitraum zwischen 07/2019 und 05/2020 am Standort 1 (GWM 4269) in 1,0 und 2,5 m Tiefe sowie der korrigierte Tagesniederschlag und die potentielle Grasreferenzverdunstung der Lysimeterstation Witznitz ... 59

Abb. 5-9 Modell- und Messwerte der pF-Werte und Bodenfeuchte im Zeitraum zwischen 07/2019 und 05/2020 am Standort 2 (GWM 7642) in 1,0 und 2,5 m Tiefe sowie der korrigierte Tagesniederschlag und die potentielle Grasreferenzverdunstung der Lysimeterstation Witznitz ... 60

Abb. 5-10 Modell- und Messwerte der pF-Werte und Bodenfeuchte im Zeitraum zwischen 07/2019 und 05/2020 am Standort 3 (GWM 7645) in 1,0 und 2,5 m Tiefe sowie der korrigierte Tagesniederschlag und die potentielle Grasreferenzverdunstung der Lysimeterstation Witznitz 61

Abb. 5-11 Detaildarstellung, Berechneter Hydroisohypsenplan für die Jahresscheibe 2020 (1/2020), neu errichtete Pegel sind rot markiert 63

Abb. 5-12 Berechneter Hydroisohypsenplan für die Jahresscheibe 2019 (1/2019) mit neu errichteten Pegeln 7642 und 7645 (farblich markierte Messstellen: s. Abb. 5-13 und Abb. 5-14)..... 64

Abb. 5-13 Ganglinien ausgewählter Grundwassermessstellen im Kippengebiet Witznitz; 3641 und 5234 im Südanstrom zur Pleiße, 4661 und 4121 im Nordanstrom zur Pleiße, 7642, 7645 und 4269 auf der Kippe während des Kalibrierungszeitraums 65

Abb. 5-14 Ganglinien ausgewählter Grundwassermessstellen im Kippengebiet Witznitz; 3641 und 5234 im Südanstrom zur Pleiße, 4661 und 4121 im Nordanstrom zur Pleiße, 7642, 7645 und 4269 auf der Kippe; Kalibrierungs- und Prognosezeitraum bis zur Einstellung stationärer Strömungsverhältnisse 65

Abb. 5-15 Lage der GW-Messtellen im Gebiet, Isohypsen für Herbst 2019 67

Abb. 5-16 Vergleich der GW-Ganglinien 42691 (orange, Luzerne) und 52341 (blau, ohne Luzerne) mit jeweiligen Trenddarstellungen sowie Jahresniederschläge für 2014-2019; grau zeigt die Ganglinie 52341 verschoben auf das Niveau von 42691..... 67

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Übersicht zur Bewirtschaftung der Lysimeter in Brandis und Witznitz von 2009 bis 2021 14

Tab. 3-1 Ernteerträge bezogen auf die Frischmasse von Luzerne (grün) und Mais (gelb) im Jahr 2020 in [dt FM/ha] 17

Tab. 3-2 Ernteerträge bezogen auf die Trockenmasse von Luzerne (grün) und Mais (gelb) im Jahr 2020 in [dt TM/ha] 17

Tab. 3-3 Bewirtschaftung der Lysimeter 12/1 bis 12/3 19

Tab. 3-4 Bewirtschaftung der Lysimeter 14/2 und 14/4 19

Tab. 3-5 Frischmasse-Erträge auf den Lysimetern in dt FM/ha von 2009 bis 2020 für Knaulgras, Luzerne bzw. Knaulgras/Luzerne 20

Tab. 3-6 Trockenmassenerträge für Luzerne im Jahr 2020 auf den 14er Lysimetern in [dt TM/ha] (Quelle: Lysimeterstation Brandis) 21

Tab. 3-7 Korrigierte Niederschlagsmengen an den Stationen Brandis und Witznitz im Jahr 2020 sowie die Abweichung der Station Brandis zum langjährigen Mittelwert (1981 – 2010) 30

Tab. 3-8 Klimatische Wasserbilanz an den Stationen Brandis und Witznitz von 2014 bis 2020 33

Tab. 3-9 Reale Verdunstungshöhen auf den Lysimetern für die verschiedenen Anbaukulturen von 2010 bis 2020 35

Tab. 4-1 Dimensionierung der Versickerungsversuche sowie ermittelte stationäre Infiltrationsrate und Bodenart [9] 41

Tab. 5-1 Jahrgang der Interzeption in Prozent von N_{korr} 54

Tab. 5-2 Startbodentypen, Modellschichten und die ermittelte bodenhydraulische Parameter für den Standort 1 und Standort 3 55

Tab. 5-3 allgemeine Beschreibung der Modellschichten des geologischen Strukturmodelles 57

Tab. 5-4 optimierte Parameter der Modellschichten 58

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Prüfberichte für die Bestimmung der Ernteerträge

Anlage 2 Bilddokumentation

Anlage 3 Dokumentation zu den Infiltrationsversuchen mittels Einzelring-Infiltration am Sondermessprofil auf der Kippe Witznitz

Abkürzungsverzeichnis

BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
FM	Frischmasse
GW	Grundwasser
GWN	Grundwasserneubildung
h	Grundwasserspiegellage in m NHN
HGMS	Hydrogeologisches Großraummodell Süd des IBGW
HYDRUS	Bodenwasserhaushaltsmodell
IBGW	Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH
K	Kontrollflächen 1-8 auf den Bewirtschaftungsflächen der Kippe Witznitz
KAS	Kalkammonsalpeter (Stickstoffdünger)
Kg	Knaulgras
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
Lu	Luzerne
Lys	Lysimeter
M	Mais
Mg	Magnesium
MIBRAG	Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH
n	Van-Genuchten-Paramter (charakterisiert die Weite der Porengrößenverteilung)
NPK	Stickstoff-Phosphor-Kalium-Dünger
PK	Phosphor-Kalium-Dünger
RB	Randbedingung
SSA	Ammoniumsulfat (reiner Ammoniumdünger)
SW	Sickerwassermenge
TM	Trockenmasse
VF	Versuchsfläche 1-1 bis 1-3 (Knaulgras-Luzerne) und 1-4 bis 1-6 (Luzerne)
Wg	Wintergerste
WH	Wasserhaushalt
WISKI	Wasserwirtschaftliches Informationssystem der Firma Kisters
Wr	Winterraps
WS	Wassersäule
Ww	Winterweizen

1 Veranlassung

Im Zeitraum von ***2008 bis 2011*** wurde im Auftrag der LMBV das Vorhaben

> *„Durchführung eines Pilotversuches zur Reduzierung der Exfiltration von eisenbelastetem Grundwasser aus den Kippen des ehemaligen Tagebaues Witznitz in die Fließgewässer Pleiße und Wyhra“*

in den Bearbeitungsetappen 1 und 2 durchgeführt.

Der Pilotversuch hat gezeigt, dass mit Dauergrünland aus Luzerne, durch eine Verbesserung der Kippenböden mittels Tiefenlockerung und Kalkung sowie mit einer optimalen Bewirtschaftung und Düngung der Bestände eine starke Reduzierung der Grundwasserneubildung und damit der Eisen-, Sulfat- und Aciditätseinträge in Pleiße und Wyhra erreicht werden kann. Die Ergebnisse der umfangreichen Wasserhaushaltsuntersuchungen an den Versuchsparzellen auf der Kippe Witznitz und den Lysimetern in der Lysimeterstation Brandis sind im Abschlussbericht vom 31.01.2012 nachvollziehbar dokumentiert worden und bilden damit die Grundlage für die großtechnische Umsetzung der Ergebnisse in der Phase 3.

In der Ergebnisniederschrift des ***17. Vorhabensbegleitenden Arbeitskreises*** wird dazu ausgeführt (TOP4, E2):

„Es wird empfohlen, Verhandlungen mit dem Grundstückseigentümer zur Ausweitung und langfristigen Sicherstellung des Dauergrünlandanbaus auf der Kippe Witznitz aufzunehmen. Der technische Pilotversuch könnte dadurch in einen „Großversuch“ zur Bestätigung und Erweiterung der Grundlagenkenntnisse mit Sanierungswirksamkeit überführt werden.“

Auch auf der ***82. Sitzung des Regionalen Sanierungsbeirates Westsachsen/Thüringen*** am 26.04.2012 wird das Vorhaben nachdrücklich unterstützt.

„Maßnahmen zur Optimierung der Wasserhaushaltsschicht und Dauergrünlandanbau als nachhaltige Sanierungslösung sind nur über die Einbeziehung und Steuerung privatwirtschaftlicher Unternehmen möglich.“

„Es ist daher sinnvoll das Pilotprojekt Kippe Witznitz zwecks Einstieg in die Bearbeitungsetappe 3 als Großversuch unter Einbeziehung des Flächeneigentümers fortzuführen, da keine Möglichkeiten gesehen werden, über regionalplanerische Instrumente steuernd die Sicherung von Flächen zur Dauergünlandbewirtschaftung zu erwirken.“

Bereits ***ab 2012*** wurde in Kooperation mit der ***Osterland Agrar GmbH*** zur schadlosen Überbrückung der Zeit zwischen dem Ende des Pilotversuches und dem Beginn des großtechnischen Versuches ein minimiertes Versuchs- und Monitoringprogramm zur Gewinnung von Wasserhaushaltsgrößen und pflanzen-physiologischen Parametern sowie zur Erhaltung der Versuchsflächen durchgeführt.

Im ***Jahr 2013*** wurde das GFI durch die LMBV mit den Leistungen zur ingenieurtechnischen Begleitung und Auswertung des sanierungswirksamen Feldversuchs zur Reduzierung der Grundwasserneubildung auf den Flächen der Kippe Witznitz im Sinne einer Fortführung des o. g. Pilotprojektes beauftragt, um bei den Lysimeteruntersuchungen und der Bewertung der Versuchsfläche 1 einen lückenlosen Anschluss an die im Herbst 2014 begonnene großtechnische Umsetzung zu gewährleisten. Die großtechnische, flächenhafte Umsetzung der Erfahrungen des Pilotversuches beinhaltet den Luzerneanbau auf 225 ha auf dem südlichen Teil der Kippe Witznitz, der ingenieurtechnisch mit den Untersuchungen auf den Feldversuchsflächen und den Lysimetern zu begleiten und auszuwerten ist. Die vorliegenden Berichte vom 04.08.2015, 25.05.2016 und 30.03.2017 dokumentieren die Aktivitäten und wichtigsten Monitoringergebnisse der Jahre 2014, 2015 und 2016.

Im ***Jahr 2018*** wurde das GFI durch die LMBV mit der Bestellung 45058342 vom 03.12.2018 mit dem Vorhaben *„Ingenieurtechnische Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch Bewirtschaftung von Kippenflächen Witznitz, Nachsorgephase 2018-2022“* beauftragt. Das Vorhaben umfasst die ***Maßnahmen 5.1-1 Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Kippenbewirtschaftung Witznitz zur Reduzierung der Eiseneinträge in die Pleiße (2018 – 2022)*** mit folgenden Teilleistungen:

- Weiterführung der Felduntersuchungen auf der Kippe Witznitz an den bestehenden Kontrollflächen K1-K8,
- Betrieb der Lysimeter der Station Brandis(Lys 14/2 und 14/4) und Witznitz (13/1),
- Koordination der Nachsorgemaßnahmen,
- Grundwassermodellierung sowie Bodenwasserhaushaltsmodellierung (1D + 3D).

Im Jahr 2019 wurde die ***Maßnahme 5.1-2 „Erweitertes Monitoring zur Erfolgskontrolle der Wirkungsprognosen der Minderung der GW-Neubildung“*** ergänzt**.** Hierbei wird die Wirkung des Sickerwassereinflusses auf die GW-Neubildung im Hydrotop 1 (Fläche A) an einem Längsprofil (Sondermessprofil) von der GW-Hochlage im Kippenzentrum zum GW-Übertritt zur Pleiße untersucht. Dazu wurden im Jahr 2019 entlang des Sondermessprofils zwei neue GW-Messstellen (GWM) auf der GW-Hochlage errichtet und an diesen sowie an der bestehenden GWM WIT42691 Sondermessstellen (Bodenwassermessstellen) mit jeweils zwei Vertikalprofilen eingerichtet. Dafür wurden in 1,0 m und 2,5m Tiefe Sensoren (Feuchtprofil mit Wassergehalt, Saugspannung, Temperatur) verbracht.

Die Dokumentation zum Sondermessprofil vom 30.10.2019 wurde der LMBV übergeben. Zudem erfolgte der Aufbau eines 2D-Bodenwasserhaushaltsmodells, welches anhand der Messdaten der Sondermessstellen von Juli 2019 bis Februar 2020 vorkalibriert wurde. Eine

Feinkalibrierung konnte bisher nur bedingt erfolgen, da aufgrund der Trockenheit insbesondere die tiefen Messpunkte keine bzw. nur wenig, schlechte auswertbar Messsignale lieferten. Daher wurden im Jahr 2020 Versickerungsversuche an allen Standorten durchgeführt, um eine temporäre Durchfeuchtung der ungesättigten Bodenzone bis 2,5 m Tiefe zu induzieren. Anhand der Messdaten erfolgte im Anschluss über eine inverse Modellierung die Berechnung der bodenhydraulischen Parameter. Diese Auswertung ist Teil des Jahresberichts 2020. Die Dokumentation der Versickerungsversuche widerspiegelt der Bericht vom 01.10.2020.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Aktivitäten und wichtigsten Monitoringergebnisse des Jahres 2020 hinsichtlich Ernteerträge und Bewirtschaftung der Kippenflächen sowie der Lysimeter, Klimadaten, die Messergebnisse des Sondermonitorings und den Stand der Modellbearbeitung.

Die Bewertung der Minderung der GW-Neubildung durch die gezielte Luzernebewirtschaftung auf den Flächen der Kippe Witznitz (Erfolgskontrolle) erfolgt zum Projektabschluss 2022.

2 Zusammenstellung der Arbeiten

Zum besseren Verständnis der Bewirtschaftung aller Lysimeter sind in ***Tab. 2-1*** die landwirtschaftlichen Kulturen vom Versuchsbeginn 2009 bis 2021 angegeben.

Tab. 2-1 Übersicht zur Bewirtschaftung der Lysimeter in Brandis und Witznitz von 2009 bis 2021

	Lysimeter						
Jahr	**12_1**	**12_2**	**12_3**	**13_1**	**13_2**	**14_2**	**14_4**
LS-Station	**Brandis**	**Brandis**	**Brandis**	**Witznitz**	**Witznitz**	**Brandis**	**Brandis**
2009	Lu (*500t/ha Kompost)*	Wr	Lu (*125t/ha Kompost)*	Ww	Ww	Kg	Kg (*125 t/ha Kompost)*
2010	Lu	Ww	Lu	Wg	Wg	Kg	Kg
2011	Lu	Wg	Lu	Wr	Wr	Kg	Kg
2012	Lu	Wr	Lu	Lu	Lu	Kg	Kg
2013	Lu (*Kompost entfernt; Neuaussaat)*	Ww	Kg/Lu (*Kompost entfernt; Neuaussaat)*	Lu *(3 l/m² Gärreste)*	Lu *(3 l/m² Gärreste)*	Kg/Lu (80/20)	Lu (*Kompost entfernt; Neuaussaat)*
2014	M	M	M	Lu *(2 l/m² Gärreste)*	Lu *(2 l/m² Gärreste)*	Kg/Lu (80/20)	Lu
2015	Ww	Ww	Ww	M *(3 l/m² Gärreste)*	M *(3 l/m² Gärreste)*	Kg/Lu (60/40)	Lu
2016	Wr	Wr	Wr	Wg	Wg	Kg/Lu (60/40)	Lu
2017	Ww	Ww	Ww	Wr	Wr	Kg/Lu	Lu
2018	M	M	M	Lu	Lu	M	M
2019	Ww	Ww	Ww	Lu	Lu	M	M
2020	Wr	Wr	Wr	Lu	Lu	Lu	Lu
2021	Ww	Ww	Ww	Station eingestellt	Station eingestellt	Lu	Lu

Lu…Luzerne, Wr….Winterraps, Ww…Winterweizen, Wg…Wintergerste, Kg…Knaulgras, M…Mais

Die Lysimeter **12/1**, **12/3**, **14/2** und **14/4** gehörten von Anfang an zum Untersuchungsprogramm.

Das Lysimeter **12/2** war bis 2013 Referenzlysimeter, **aber nur bezüglich der Wasserhaushaltsgrößen**. ***Ab 2014*** wurden nach der Umrüstung alle drei 12er Lysimeter **12/1**, **12/2** und **12/3** gleich bewirtschaftet.

Die Lysimeter **13/1** und **13/2** auf der ***Kippe Witznitz*** wurden von Anbeginn an mit den gleichen Kulturen bewirtschaftet wie die umliegende landwirtschaftliche Nutzfläche. Durch die zum Teil hohen Grundwasserstände (eingestaute GW-Lysimeter) lassen sich hier keine Sickerwassermengen ermitteln, sondern nur einige Elemente des Bodenwasserhaushaltes

und die Ernteerträge. Aus der Station wurden im August 2020 Kabel, Messgeräte und die Stromversorgung entwendet (s. Kapitel 3.6).

Auf den Lysimetern 14/2 und 14/4 wurde aufgrund des schlechten Zustands und des hohen Fremdbewuchses die Luzerne im Frühjahr 2018 entfernt. In den Jahren 2018 und 2019 erfolgte die Bewirtschaftung mit Mais der Sorten Katari und Motivi CS. Seit 2020 werden die Lysimeter erneut mit Luzerne bewirtschaftet.

Die ***Kontrollflächen K1 bis K6*** auf den Bewirtschaftungsflächen besitzen seit 2015 wie auch die 2009 errichteten Versuchsflächen ***VF1-4 bis VF1-6*** einen ***reinen Luzernebestand***. Im Jahr 2016 wurden zwei weitere Kontrollpunkte K7 und K8 auf den Bewirtschaftungsflächen ergänzt. Im Zuge der Errichtung des Sondermessstellen erfolgte eine Verschiebung von zwei Kontrollpunkten auf das Sondermessprofil (vgl. Abb. 3-1). Auf den Versuchsflächen ***VF1-1 bis VF1-3*** befand sich bis 2016 ein ***Knaulgras-Luzerne-Bestand***. 2017 wurden die Versuchsflächen (VF1-1 bis VF1-6) aufgegeben.

Im ***Jahr 2020*** wurden folgende wichtige Aktivitäten durchgeführt und Aufgaben gelöst:

1) Es wurden insgesamt ***18 Vor-Ort-Termine*** auf den Kontrollflächen realisiert, an denen unter anderem Frischmassen geerntet, Wuchshöhen gemessen und Wartungs-/Kontrollarbeiten an den Sondermessstellen durchgeführt wurden.
   15.01.2020, 05.02.2020, 10.03.2020, 03.04.2020, 20.04.2020, 11.05.2020, 13.05.2020, 28.05.2020, 03.06.2020, 17.06.2020, 22.06.2020, 29.06.2020, 20.07.2020, 10.08.2020, 26.08.2020, 17.09.2020, 14.10.2020, 09.11.2020
2) Davon erfolgten ***4 Ernten*** am 03.04., 11.05., 03.06. und am 26.08.2020 auf den Kontrollflächen.
3) Auf den Lysimetern 12/1, 12/2 und 12/3 wurde entsprechend der landwirtschaftlichen Fruchtfolge Winterraps angebaut.
4) Auf den Referenzlysimetern 13/1 und 13/2 wurde entsprechend der Bestellung des Kippennordbereiches Luzerne angebaut.
5) Mit der Osterland Agrar GmbH wurden die Erntetermine abgestimmt.
6) Die Versickerungsversuche fanden vom 25.05. bis 27.05. am Standort 1 und vom 08.06. bis 11.06.2020 am Standort 2 und 3 statt.
7) Es erfolgte eine Beratungen mit der LMBV am 09.12.2020 zur Vorstellung des Jahresberichts 2019 und der Ergebnisse der Versickerungsversuche bzw. dem Stand des 2D-Bodenwasserhaushaltmodells.
8) Im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung wurden 2020 die Datensätze für Klima, Wasserhaushalt aktualisiert.
9) Durch das IBGW erfolgten 2020 die Einpflegung aktueller Grundwasserstände, die Aktualisierung sowie die Ausweisung von berechneten Hydroisohypsen und Grundwasserganglinien.

3 Auswertung der Monitoringergebnisse

3.1 Festlegung der Kontrollflächen

Die Auswahl und Festlegung der Kontrollflächen (K1 bis K8) erfolgte nach folgenden Kriterien bzw. Zielstellungen:

- Abbildung der Verhältnisse der bewirtschafteten Gesamtfläche an repräsentativen Standorten und Nachweis der Wirkung der Bodenmelioration
- Gewährleistung der Erreichbarkeit der Flächen (wegenahe Standorte)
- Bodenbearbeitung
- Kalkung

Die Kontrollflächen K1 bis K8 befinden sich im südlichen Teil der Kippe auf den Flächen A bis E. Im Rahmen der Errichtung des Sondermessprofils wurde in der Zwischenberatung am 06.08.2019 die Verschiebung zweier Kontrollpunkte festgelegt (vgl. ***Abb. 3-1***).

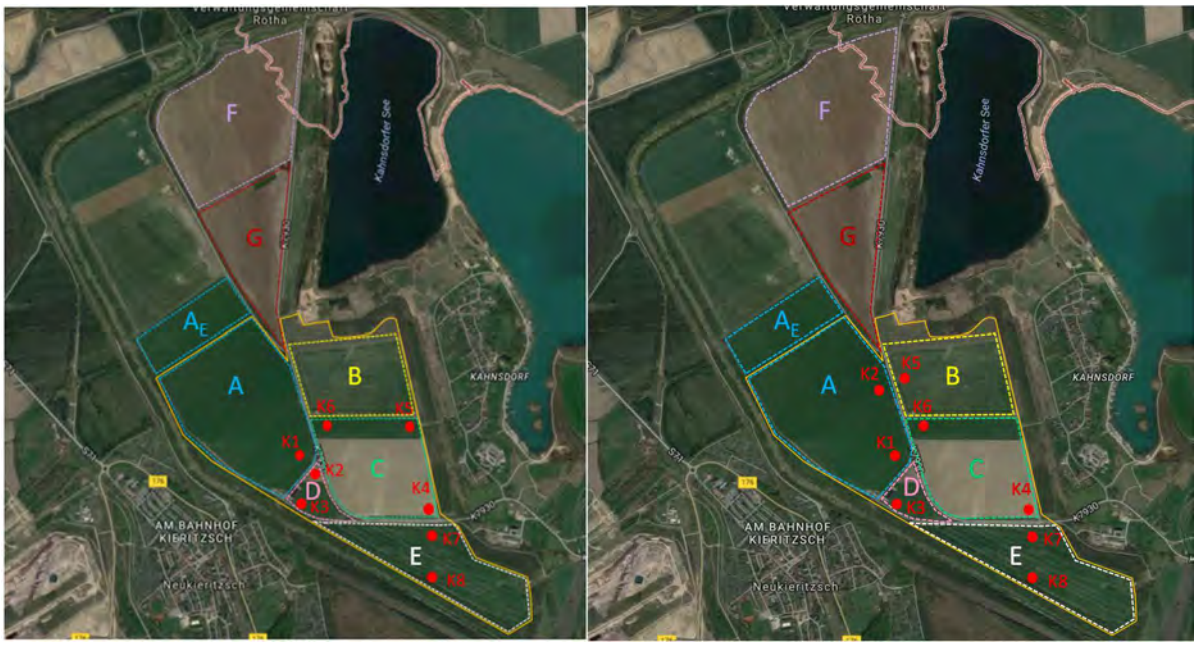

Abb. 3-1 Lage der Versuchsflächen und der Kontrollpunkte K1 bis K8 auf den Bewirtschaftungsflächen A bis E im Südbereich der Kippe (links: bisherige Lage; rechts: neue Lage)

Die Teilflächen A, B, C und D wurden erstmalig 2014 auf einer Fläche von ca. 187 ha mit Luzerne bestellt (K1 bis K6). 2015 erfolgte die Aussaat von Luzerne dann auf der Teilfläche E, sodass die Gesamtfläche etwa 224 ha betrug. Im Jahr 2017 wurden zusätzlich noch die Teilflächen F und G mit Luzerne bewirtschaftet, sodass weitere 107 ha Luzerne im Nordbereich dazukamen.

Der Anbau von Luzerne auf den Flächen A bis E ist mit dem Finanzierung- und Bewirtschaftungsvertrag zwischen LMBV und der Osterland Agrar GmbH (Quelle angeben: Finanzierung- und Bewirtschaftungsvertrag VM-S-2014-017, Juli 2014) geregelt. Der Vertrag hat gem. §2

eine Laufzeit bis 31.12.2029, wobei der Luzerneanbau gem. Bewirtschaftungsplan (Vertragsanlage 2) weiterführend bis 2034 geregelt ist. Die Erweiterungsfläche Fläche A ist gem. aufgeführter Flurstücke Bestandteil der vertraglich geregelten Fläche A. Der Anbau der Luzerne auf den Teilflächen F und G ist nicht Bestandteil des Vertrages und erfolgt nach Abstimmung mit der Osterland Agrar GmbH (Quelle angeben: Aktennotiz zur Abstimmung zu den Luzerne-Kulturen auf den Flächen der Kippe Witznitz, 05.10.2017)
Im Jahr 2018 und 2019 wurde die Bewirtschaftung der Kontrollflächen mit Luzerne beibehalten. Der Fruchtwechsel für die Flächen A, C und D erfolgte somit im Jahr 2020. Somit beträgt der Bewirtschaftungszeitraum der Flächen A, C und D mit Luzernekultur insgesamt 5 Jahre.

3.2 Ernteerträge der Kontrollflächen

Auf den Kontrollflächen (K1 bis K8) wurden 2020 die in ***Tab. 3-1*** und

Tab. 3-2 zusammengestellten Erträge in Frischmasse (FM) und Trockenmasse (TM) für Luzerne (grün) an den Kontrollflächen K5, K7 und K8 und für Mais (gelb) an den Kontrollflächen K1, K2, K3, K4 und K5 erzielt.

Tab. 3-1 Ernteerträge bezogen auf die Frischmasse von Luzerne (grün) und Mais (gelb) im Jahr 2020 in [dt FM/ha]

	1. Ernte	2. Ernte	3. Ernte	4. Ernte	Summe
K1				536,0	**536,0**
K2				481,7	**556,3**
K3				229,5	**229,5**
K4				465,1	**541,8**
K5	58,0	121,8	204,6	46,3	**430,6**
K6				348,2	**348,2**
K7	75,2	165,5	152,2	64,4	**457,3**
K8	66,6	201,8	154,0	87,8	**510,1**

Tab. 3-2 Ernteerträge bezogen auf die Trockenmasse von Luzerne (grün) und Mais (gelb) im Jahr 2020 in [dt TM/ha]

	1. Ernte	2. Ernte	3. Ernte	4. Ernte	Summe
K1				169,9	**169,9**
K2				178,2	**194,9**
K3				80,6	**80,6**
K4				134,4	**151,7**
K5	12,2	23,3	46,4	20,0	**101,9**
K6				86,3	**86,3**
K7	17,8	34,1	34,1	23,8	**109,8**
K8	16,0	39,1	33,0	29,9	**117,9**

Die vergleichende Auswertung der ***Frischmassenerträge für Luzerne*** für das Jahr ***2020*** zeigt mit etwa ***durchschnittlich 466 dt FM/ha*** (an den Kontrollflächen K5, K7 und K8) einen wiederum geringen Wert, der aber dennoch etwas höherer Wert ist als im Jahr 2019. Im Vergleich dazu betrugen die mittleren Frischmassenerträge der letzten fünf Jahre:

2015 586 dt FM /ha
2016 635 dt FM /ha
2017 792 dt FM/ha
2018 360 dt FM/ha
2019 450 dt FM/ha

Der ***Mittelwert*** der fünf Vegetationsperioden von ***2015 bis 2019*** an den ***Kontrollflächen K1 bis K8*** beträgt somit ***565 dt FM/ha***.

Der ***Trockenmasseanteil*** im Jahr ***2020*** schwankte bei den einzelnen Ernten zwischen 19,1 % und 43,2 %. Für die ***Kontrollflächen*** mit Luzerne wurden folgende Ergebnisse erreicht:

1. Ernte	K5 Luzerne	21,0 %	K7 bis K8 Luzerne	23,9 %
2. Ernte	K5 Luzerne	19,1 %	K7 bis K8 Luzerne	20,0 %
3. Ernte	K5 Luzerne	22,7 %	K7 bis K8 Luzerne	21,9 %
4. Ernte	K5 Luzerne	43,2 %	K7 bis K8 Luzerne	35,5 %

Die ermittelten ***Trockenmassen*** der vier Ernten in ***2020*** lagen in Summe zwischen 101,9 dt TM/ha und 117,9 dt TM/ha, woraus sich ein Wert von durchschnittlich

109,9 dt TM/ha

ergibt. Der ***Mittelwert*** der fünf Vegetationsperioden von ***2015 bis 2019*** an den ***Kontrollflächen K1 bis K8*** beträgt etwa ***134 dt TM/ha***.

Die Werte für die Luzerne-Frischmassenerträge und die Trockenmassen im Jahr 2020 auf den Kontrollflächen K5, K7 und K8 liegen damit auch unter den ***Erträgen auf den Versuchsflächen VF1-4 bis VF1-6*** für die Jahre ***2009 bis 2016*** mit durchschnittlich ***599 dt FM/ha*** und ***131 dt TM/ha***.

Die ***Frischmassenerträge für Mais*** auf den Kontrollflächen K1 bis K4 und K6 betrugen 2020 durchschnittlich etwa ***442,4 dt FM/ha*** und waren somit höher, als die Erträge auf den 14er-Lysimetern im Jahr 2019 mit durchschnittlich 335 dt FM/ha.

Der ***Trockenmasseanteil*** im ***Jahr 2020*** schwankte zwischen 24,8 % und 37,0 % bzw. lag im Durchschnitt bei etwa ***31,5 %.***

Die ermittelten ***Trockenmassen*** der Maisernte lagen 2020 auf den Kontrollflächen zwischen 80,6 dt TM/ha und 194,9 dt TM/ha, woraus sich ein Wert von durchschnittlich ***136,7 dt TM/ha*** ergibt.

In ***Anlage 1*** sind die Prüfberichte der Laboruntersuchungen zusammengestellt.

3.3 Ernteerträge der Lysimeter (BfUL)

Auf den Lysimetern 12/1 bis 12/3 wurde im August 2019 Winterraps gesät und Ende Juli 2020 geerntet. Anschließend erfolgte Anfang Oktober die Aussaat von Winterweizen. Die Arbeiten auf den ***12er Lysimetern*** ist ***Tab. 3-3*** in für das Jahr 2020 zusammengefasst.

Tab. 3-3 Bewirtschaftung der Lysimeter 12/1 bis 12/3

Datum	Tätigkeiten
12.03.2020	Nmin Bodenproben genommen
13.03.2020	Vegetationsbeginn
19.03.2020	Düngung
09.04.2020	Düngung
29.07.2020	Ernte Winterraps
05.10.2020	Aussaat Winterweizen Asory
26.10.2020	Aufgang
29.11.2020	Vegetationsende

Die beiden ***14er Lysimeter*** wurden in ***2020*** mit ***Luzerne*** betrieben. Die Aussaat erfolgte im Oktober 2019. Die Tage, an denen auf den Lysimetern 14/2 und 14/4 die Düngung und die Ernten erfolgten, sind in ***Tab. 3-4*** aufgeführt.

Tab. 3-4 Bewirtschaftung der Lysimeter 14/2 und 14/4

Datum	Tätigkeiten
12.03.2020	Nmin Bodenproben genommen
13.03.2020	Vegetationsbeginn
18.03.2020	Nachsaat Luzerne
23.06.2020	1. Schnitt Luzerne
19.08.2020	2. Schnitt Luzerne
29.11.2020	Vegetationsende

Abb. 3-2 Luzerneaufwuchs im Mai 2020 auf den Lysimetern 14/2 (links) und 14/4 (rechts) an der Station Brandis nach Neuaussaat im Oktober 2019 (Foto: Frau Winkler, BfUL)

Die ***13er Lysimeter*** der Station Witznitz wurden ***2020*** weiterhin mit ***Luzerne*** bewirtschaftet (siehe auch ***Tab. 2-1***). Hierbei erfolgten nur zwei Ernten. Im August musste der Betrieb der Station Witznitz aufgrund von Vandalismus eingestellt werden.

In ***Tab. 3-5*** sind die auf den Lysimetern erwirtschafteten Erträge in dt FM/ha für Luzerne, Knaulgras bzw. Knaulgras/Luzerne auf den 14er Lysimetern für die Jahre 2009 bis 2017 und für Luzerne auf den 12er Lysimetern bis 2013 zusammengestellt.

Tab. 3-5 Frischmasse-Erträge auf den Lysimetern in dt FM/ha von 2009 bis 2020 für Knaulgras, Luzerne bzw. Knaulgras/Luzerne

	Lysimeter 14/2 dt FM/ha	Lysimeter 14/4 dt FM/ha	Lysimeter 12/1 dt FM/ha	Lysimeter 12/3 dt FM/ha
2009	231	225	98	125
2010	488	339	692	682
2011	275	245	308	294
2012	124	135	126	119
2013	342	182	152	216
2014	382	291		
2015	285	387		
2016	361	374		
2017	303	343		
2020	95	76		

[1] Knaulgras [2] Knaulgras/Luzerne-Gemisch Luzerne

In ***Abb. 3-3*** sind die jährlichen Ernteerträge für Luzerne entsprechend ***Tab. 3-5*** grafisch dargestellt. Ab 2014 werden dort nur die Ergebnisse der Lysimeter 14/2 und 14/4 dokumentiert, auf denen Knaulgras, Knaulgras/Luzerne-Gemisch bzw. Luzerne bewirtschaftet wird. Da in den Jahren 2018 und 2019 auf allen Lysimetern der Station Brandis Mais bzw.

Winterweizen gepflanzt wurden, tauchen weder in Tab. 3-5 noch in Abb. 3-3 die Ergebnisse der Frischmassen für die Jahre 2018 und 2019 auf.

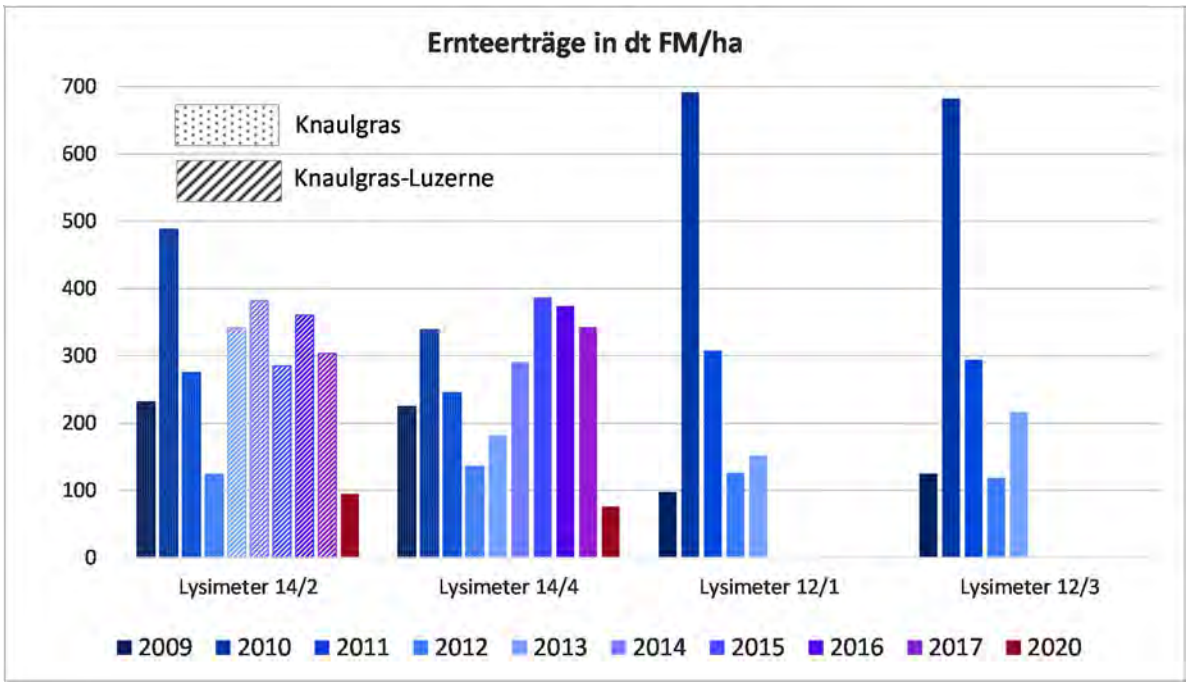

Abb. 3-3 Darstellung der Frischmassenerträge von Luzerne, Knaulgras bzw. Luzerne/Knaulgras auf den Lysimetern in [dt FM/ha] der Station Brandis

Die Frischmasseerträge der Luzerne auf den 14er Lysimetern im 1. Jahr nach Neuaussaat entsprechen etwa den Erträgen im Jahr 2009 auf den 12er Lysimetern.

Die ermittelten ***Trockenmasseerträge*** für ***Luzerne*** im Jahr 2020 für die Lysimeter 14/2 und 14/4 und für die Lysimeter 12/1 und 12/3 im Jahr 2009 sind in ***Tab. 3-6*** dargestellt. Auch hier entsprechen die Luzerne-Erträge etwa denen aus dem Jahr 2009 auf den 12er Lysimetern.

Tab. 3-6 Trockenmasseerträge für Luzerne im Jahr 2020 auf den 14er Lysimetern in [dt TM/ha] (Quelle: Lysimeterstation Brandis)

Lysimeter	2020 dt TM/ha	Lysimeter	2009 dt TM/ha
14/2	53	12/1	36
14/4	46	12/3	37

Die in den ***Tab. 3-5*** bis ***Tab. 3-6*** dargestellten Ergebnisse wurden durch die Lysimeterstation Brandis übermittelt. Die Untersuchungen wurden im zentralen Labor des LfULG durchgeführt. Laborberichte liegen dem GFI nicht vor.

Die Frischmasseerträge von **Mais** lagen ***2014*** bei

- Lysimeter 12/1: 535 dt FM/ha,

- Lysimeter 12/3: 477 dt FM/ha.

Die Frischmasseerträge von **Luzerne** lagen ***2014*** bei

- Lysimeter 13/1: 267 dt FM/ha,
- Lysimeter 13/2: 255 dt FM/ha.

Die Frischmasseerträge von ***Winterweizen*** lagen ***2015*** bei

- Lysimeter 12/1: 94 dt FM/ha
- Lysimeter 12/3: 99 dt FM/ha

Die Frischmasseerträge von ***Mais*** lagen ***2015*** bei

- Lysimeter 13/1: 512 dt FM/ha,
- Lysimeter 13/2: 624 dt FM/ha.

Die Frischmasseerträge von ***Winterraps*** lagen ***2016***

- Lysimeter 12/1: 179 dt FM/ha
- Lysimeter 12/3: 207 dt FM/ha

Die Frischmasseerträge für ***Wintergerste*** lagen ***2016*** bei

- Lysimeter 13/1: 88 dt FM/ha,
- Lysimeter 13/2: 102 dt FM/ha.

Die Frischmasseerträge von ***Winterweizen*** lagen ***2017*** bei

- Lysimeter 12/1: 100 dt FM/ha
- Lysimeter 12/3: 101 dt FM/ha

Die Frischmasseerträge für ***Winterraps*** lagen ***2017*** bei

- Lysimeter 13/1: 116 dt FM/ha,
- Lysimeter 13/2: 116 dt FM/ha.

Die Frischmasseerträge für ***Mais*** lagen ***2018*** bei

- Lysimeter 12/1: 268 dt FM/ha,
- Lysimeter 12/2: 218 dt FM/ha,
- Lysimeter 12/3: 251 dt FM/ha
- Lysimeter 14/2: 287 dt FM/ha
- Lysimeter 14/4 293 dt FM/ha.

Die Frischmasseerträge für ***Winterweizen*** lagen ***2019*** bei

- Lysimeter 12/1: 100 dt FM/ha,
- Lysimeter 12/2: 89 dt FM/ha,
- Lysimeter 12/3: 102 dt FM/ha

Die Frischmasseerträge für ***Luzerne*** lagen ***2019*** bei

- Lysimeter 13/1: 165 dt FM/ha,
- Lysimeter 13/2: 459 dt FM/ha,

Die Frischmasseerträge für ***Mais*** lagen ***2019*** bei

- Lysimeter 14/2: 334 dt FM/ha,
- Lysimeter 14/4: 336 dt FM/ha,

Die Frischmasseerträge für ***Winterraps*** lagen ***2020*** bei

- Lysimeter 12/1: 82 dt FM/ha,
- Lysimeter 12/2: 84 dt FM/ha,
- Lysimeter 12/3: 76 dt FM/ha

3.4 Vergleich der Ernteerträge

In ***Abb. 3-4*** sind die Ernteerträge (Trockenmassen) für Knaulgras bzw. für das Knaulgras-Luzerne-Gemisch für die Jahre 2009 bis 2017 auf den Lysimetern und den Versuchsparzellen (bis 2016) dargestellt. 2018 bis 2019 stehen keine Daten für die Lysimeter zur Verfügung, da diese weder mit Knaulgras noch mit Knaulgras-Luzerne-Gemisch bewirtschaftet wurden.

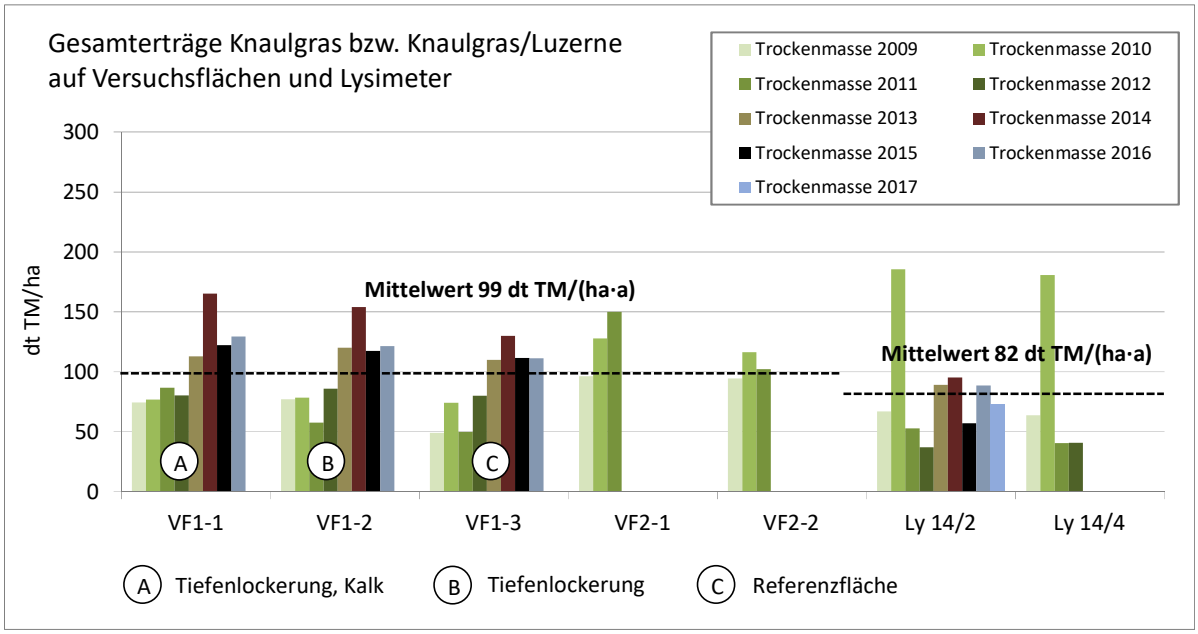

Abb. 3-4 Ernteerträge Knaulgras bzw. Knaulgras/Luzerne auf den Versuchsflächen und Lysimetern

In ***Abb. 3-5*** sind die Ernteerträge (Trockenmassen) für Luzerne für die Jahre 2009 bis 2020 auf den Lysimetern und den Versuchsparzellen (bis 2016) dargestellt. 2018 gab es für die 13er-Lysimeter keine Daten, da durch die Trockenheit die Luzerne nicht richtig anwachsen konnte. Im Jahr 2020 erfolgte nur ein Schnitt, da ab August der Betrieb der Station Witznitz eingestellt wurde. Deshalb wird der Wert für 2020 nicht berücksichtigt.

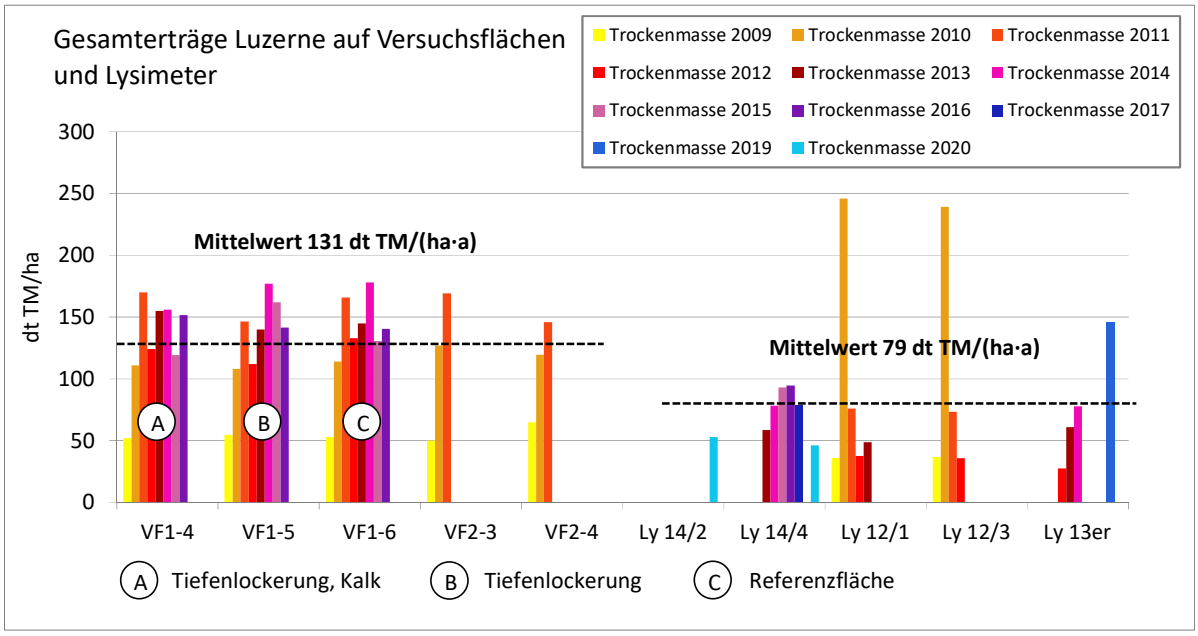

Abb. 3-5 Ernteerträge Luzerne auf den Versuchsflächen und den Lysimetern

Abb. 3-6 zeigt die Ernteerträge (Trockenmassen) für Luzerne auf den Kontrollflächen K1 bis K8 der Landwirtschaftsflächen der Kippe Witznitz von 2015 bis 2020.

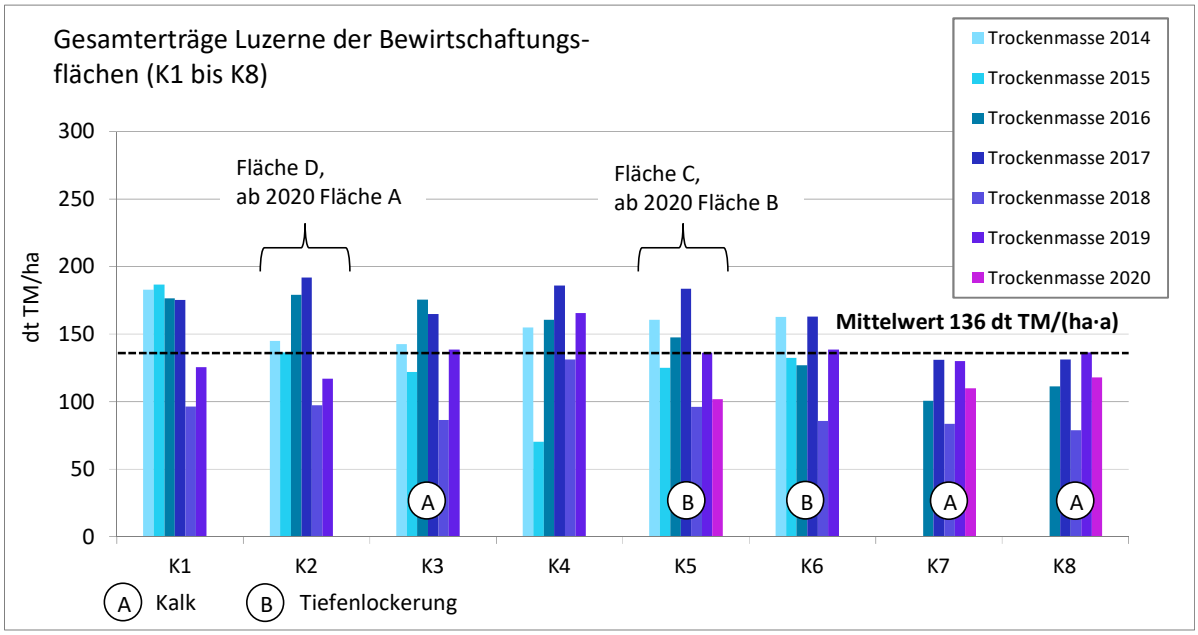

Abb. 3-6 Ernteerträge Luzerne auf den Bewirtschaftungsflächen (K1 bis K8)

Aus den Ergebnissen der Trockenmassen-Erträge an den Kontrollpunkten der Landwirtschaftsflächen zwischen 2014 bis 2020 (s. Abb. 3-6) im Vergleich zu den Ergebnissen auf den Versuchsflächen sowie auf den Lysimetern (Abb. 3-4 und Abb. 3-5) lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Trockenmassen-Erträge auf den Kontrollflächen K1 bis K6 waren in den Jahren 2014 bis 2017 sowie 2019 im Mittel etwa gleich groß
    - 2014 158 dt TM/ha (K1 bis K6)
    - 2015 129 dt TM/ha (K1 bis K6)
    - 2016 161 dt TM/ha (K1 bis K6) 106 dt TM/ha (K7 und K8)
    - 2017 177 dt TM/ha (K1 bis K6) 131 dt TM/ha (K7 und K8)
    - 2018 99 dt TM/ha (K1 bis K6) 81 dt TM/ha (K7 und K8)
    - 2019 137 dt TM/ha (K1 bis K6) 133 dt TM/ha (K7 und K8)
    - 2020 102 dt TM/ha (K5 neu) 114 dt TM/ha (K7 und K8)
- Im Jahr 2018 und 2020 wurden mit 99 dt TM/ha (K1 bis K6) bzw. 102 dt TM/ha (auf K5 neu) sowie 81 dt TM/ha bzw. 114 dt TM/ha (K7 und K8) die bisher niedrigsten Erträge gemessen.
- Die TM-Erträge von reiner Luzerne bzw. dem Knaulgras/Luzerne-Gemisch lagen 2009 bis 2020 auf den ***Lysimetern*** mit jeweils im Mittel mit ***79 dt TM/ha*** (s. Abb. 3-5) bzw. ***82 dt TM/ha*** (s. Abb. 3-4) deutlich unter den mittleren Erträgen im Zeitraum 2009 bis 2016 auf der ***Versuchsfläche VF1*** mit ***131 dt TM/ha*** (s. Abb. 3-5) bzw. ***99 dt TM/ha*** (s. Abb. 3-4) und der mit Luzerne bewirtschafteten ***Kontrollflächen*** (K1 bis K8) mit ***136 dt TM/ha*** (s. Abb. 3-6)
- Ursachen für die Mindererträge auf den ***Lysimetern*** sind ggf.
    - ungünstige Witterungsbedingungen und Trockenschäden,
    - bevorzugte Sickerwasserwege an der Lysimeterwandung oder in Schrumpfrissen,
    - Inseleffekt bei freistehenden Lysimetern (höherer Verdunstung),
    - erhöhter Fremdbewuchs.
- Die ***Luzerne-Erträge*** auf den ***Kontrollflächen*** der Bewirtschaftungsflächen lassen hinsichtlich der 2014 durchgeführten Meliorationsarbeiten keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu. Gemäß den Aussagen der Osterland wären die Erträge auf den gekalkten Flächen gegenüber den nicht gekalkten Flächen etwas höher gewesen. Unterschiede zwischen den tiefengelockerten Bereichen und nicht tiefengelockerten Bereichen wären jedoch nicht erkennbar gewesen.
- Die ***Luzerne-Erträge*** der ***Versuchsflächen*** (VF1-4 bis VF1-6) waren auf den gekalkten und tiefengelockerten Flächen gegenüber den nicht gekalkten Flächen quasi identisch. Unterschiede zwischen den tiefengelockerten Bereichen und nicht tiefengelockerten Bereichen waren ebenfalls nicht erkennbar.
- Auf den den ***Versuchsflächen*** mit ***Knaulgraus*** (VF1-1 bis VF1-3) waren die Erträge auf den gekalkten und tiefengelockerten Flächen gegenüber den nicht gekalkten Flächen etwas höher. Die Erträge auf den weder tiefengelockerten, noch gekalkten Flächen waren hierbei am geringsten.

3.5 Phänologie

3.5.1 Wuchshöhen von Luzerne auf den Kontrollflächen

Im Jahr 2020 wurden die Wuchshöhen auf den Kontrollpunkten K1 bis K8 der Bewirtschaftungsflächen erfasst. ***Abb. 3-7*** zeigt die Wuchshöhen der Luzerne auf den Bewirtschaftungsflächen als Kontrollpunkten K5 und K7/K8 als Mittelwert, die bei den Befahrungen und unmittelbar vor dem Ernten aufgenommen wurden. Die Wuchshöhen zum Erntezeitpunkt korrelieren sehr gut mit den in Abschnitt 3.1 dokumentierten Ernteerträgen.

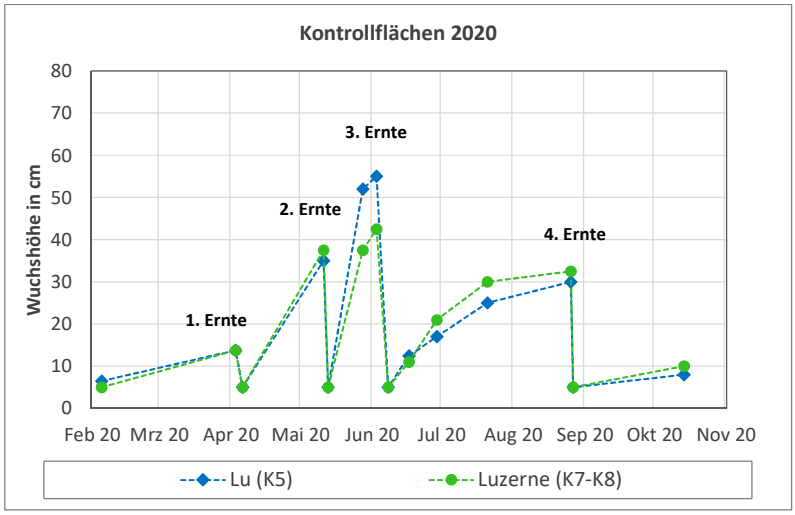

Abb. 3-7 Wuchshöhe Luzerne auf den Kontrollflächen K5 und K7-K8 (Mittelwert)

Abb. 3-8 zeigt die Wuchshöhen für den Mais auf den Kontrollflächen K1/K2 (Fläche A), K4/K6 (Fläche C) und K3 (Fläche D). Hierbei korrelieren Wuchshöhe und Ernteerträge nicht. Der Maisbestand mit der größten Wuchshöhe von > 2 m (K3 auf Fläche D) erreichte den niedrigsten Ertrag (vgl. Tab. 3-1 und Tab. 3-2)

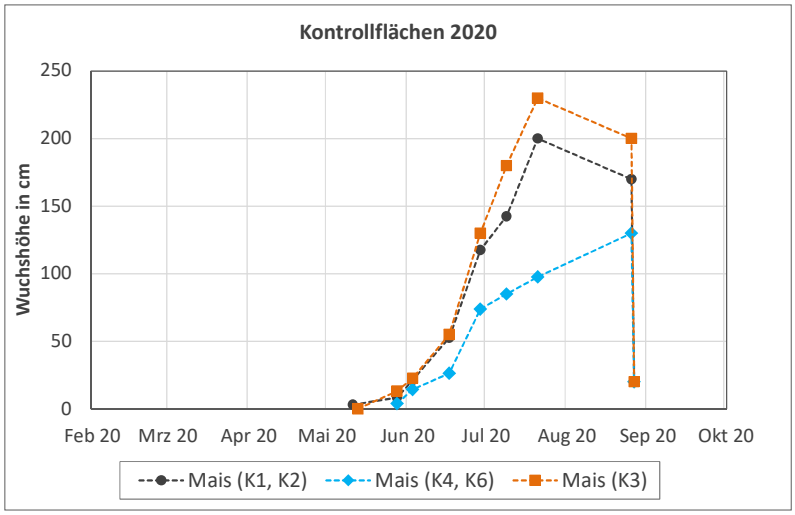

Abb. 3-8 Wuchshöhe für Mais auf den Kontrollflächen K1/K2 (Fläche A), K4/K6 (Fläche C) und K3 (Fläche D)

3.5.2 Wuchshöhen auf den Lysimetern

Abb. 3-9 zeigt die Fortschreibung der Wuchshöhen auf den Lysimetern. Die Wuchshöhe von Winterraps auf den 12er Lysimetern betrug vor der Ernte Ende Juli 2020 etwa 125 cm.
Die Luzernepflanzen auf den 14er Lysimetern wiesen vor den beiden Ernten Wuchshöhen von 24 cm (14/4) bis 33 cm (14/2) bzw. etwa 46 cm auf.

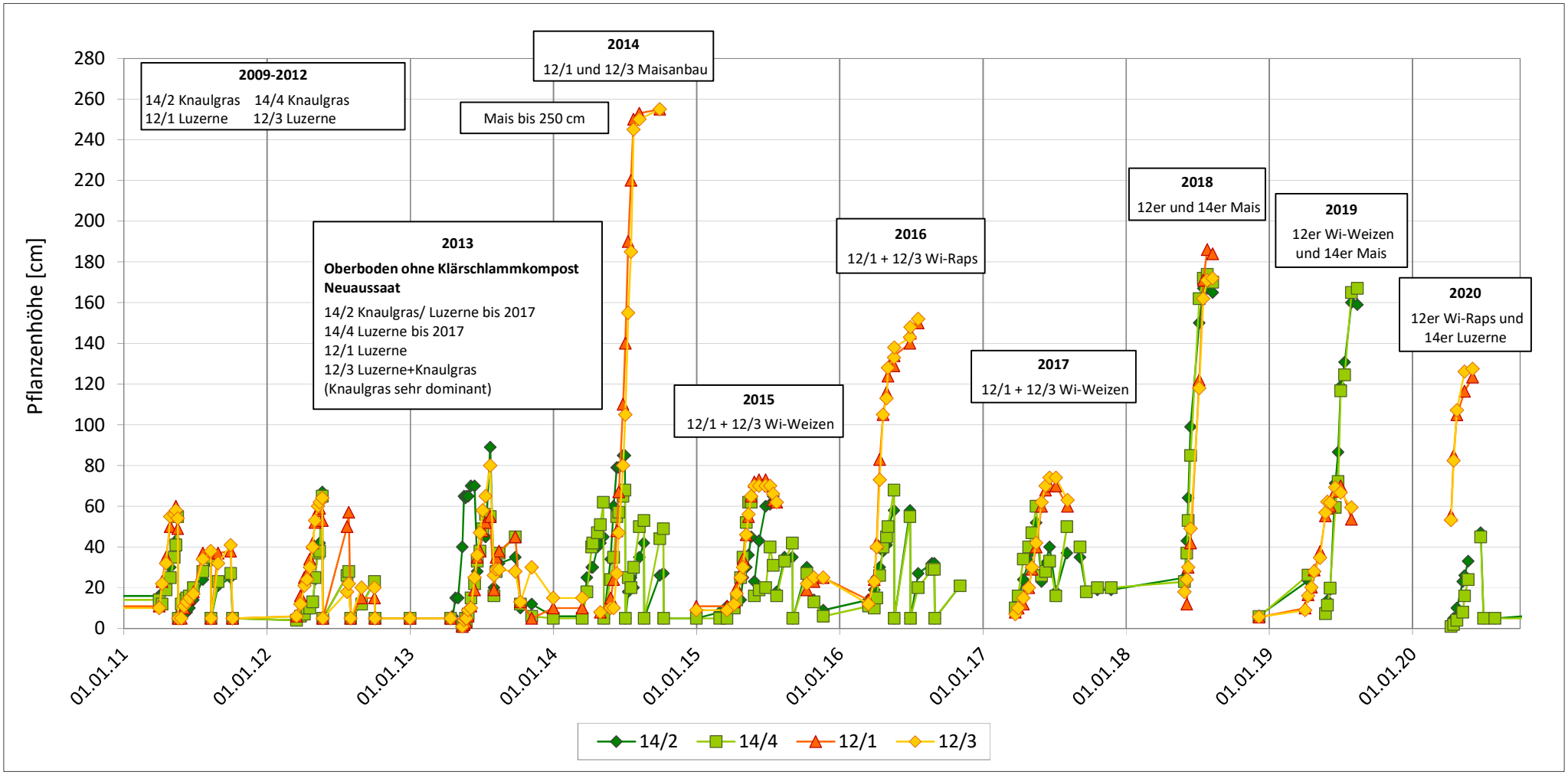

Abb. 3-9 Wuchshöhen für verschiedene Kulturen auf den Lysimetern von 2009 – 2020

3.6 Beschädigung der Lysimeterstation Witznitz

Die Lysimeterstation Witznitz wurde im Jahr 2005/2006 errichtet. Die Messungen begannen im November 2006. An der Lysimeterstation wurden neben klimatischen Parametern, wie Niederschlag, Temperatur, Windstärke, Windrichtung und relativer Feuchte auch Bodenwasserhaushaltsgrößen, wie potentielle Verdunstung (Turc-Wendling), reale Evapotranspiration und die Bodenwasserausschöpfung gemessen bzw. berechnet. Die Bodenmonolithe wurden in Abhängigkeit des umgebenden Grundwasserstandes eingestaut. Somit war die Erfassung von Sickerwassermengen mittels des klassischen Sickerwasserablaufs am Standort nicht möglich.

Im August 2020 wurden am Standort die gesamte Messtechnik (Loggertechnik, Klima- und Niederschlagssensoren, Solarpanel und Wägetechnik inkl. Durchflusssteuerung) beschädigt und teilweise entwendet. Der geschätzte Schaden beläuft sich etwa auf 15.000 €.

Aufgrund der Beschädigung liegen für die Station Witznitz nachfolgend nur Daten bis Juli 2020.

Das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie sieht aktuell keine Veranlassung für den Weiterbetrieb der Station (bisher liegt keine schriftliche Stellungnahme vor). Der Lysimetercontainer soll ggf. in einem anderen Projekt wieder verwendet werden. Eine Entscheidung darüber steht noch aus.

3.7 Klima

In den ***Abb. 3-10 bis Abb. 3-14*** sind die Klimadaten der Stationen Brandis und Witznitz für das Jahr 2020 im Vergleich zu den Jahren ab 2013 dargestellt.

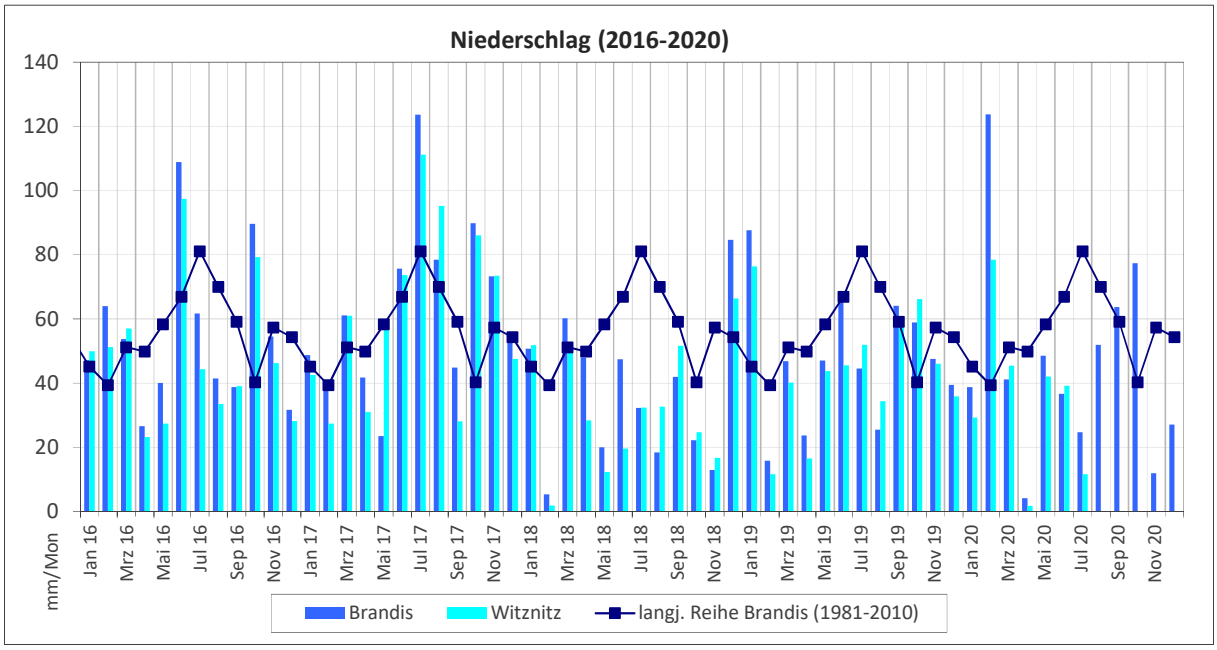

Abb. 3-10 Niederschläge (korrigiert) in Brandis und Witznitz

Der ***korrigierte Niederschlag 2020*** betrug in

Brandis 550 mm

Messwerte der Station Witznitz liegen nur bis zum 18.08.2020 vor.

Tab. 3-7 Korrigierte Niederschlagsmengen an den Stationen Brandis und Witznitz im Jahr 2020 sowie die Abweichung der Station Brandis zum langjährigen Mittelwert (1981 – 2010)

	Witznitz	Brandis		*lang. Mittel Brandis*
	mm	mm	Abw.	*1981 – 2010*[*)]
Jan	29	39	86%	*45,2*
Feb	78	124	315%	*39,3*
Mrz	45	41	80%	*51,2*
Apr	2	4	8%	*49,8*
Mai	42	49	83%	*58,3*
Jun	39	37	55%	*66,9*
Jul	12	25	30%	*81,2*
Aug		52	74%	*69,9*
Sep		64	108%	*59,2*
Okt		77	191%	*40,4*
Nov		12	21%	*57,3*
Dez		27	50%	*54,3*
Summe		***550***	***82%***	***673***

[*)] langjähriger korrigierter Mittelwert wurde aus WISKI-Datenbank berechnet

Die korrigierte Niederschlagsmenge 2020 in Brandis lag 2020 abermals deutlich unter dem langjährigen Mittel von 673 mm/a (Station Brandis) – vgl. ***Tab. 3-7***. In Brandis gingen im Jahr 2020 nur etwa 82 % des langjährigen Niederschlags nieder. Insbesondere die Monate März bis August und November/Dezember waren sehr trocken. Hingegen waren die Monate Februar und Oktober sehr nass. Die überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen wurden somit nur im Herbst und Anfang des Jahres 2020 registriert. Dort sticht deutlich der Februar hervor, wo mit 124 mm die mit Abstand größte gemessene Niederschlagsmenge im Februar aufgezeichnet wurde.

In einer Mitteilung des BfUL heißt es: *Die niederschlagsreichen Monate September und Oktober sorgten zumindest für eine Auffeuchtung der oberen Bodenschichten, was für den Aufgang der Folgefrucht Winterweizen auf den 12er Lysimetern begünstigend wirkte, aber für den Luzernebestand zu spät kam. Aber auch diese Niederschläge reichten nicht aus, um das Defizit von rd. 470 mm, das sich von 2018 bis 2020 aufgebaut hat, annähernd auszugleichen. Diese Differenz kann nur durch sehr niederschlagsreiche Winter mehrerer Jahre ausgeglichen werden. Die Monate November und Dezember 2020 lieferten erst einmal keinen Beitrag dazu.*

Die mittlere ***Lufttemperatur*** betrug 2020 in

Brandis 11,4 °C

und lag damit etwa 2,1 K über dem langjährigen Mittelwert von 9,3 °C. Alle Monate – bis auf Mai – waren um 1 bis 4 K zu warm. Der Mai war dagegen um 1 K zu kalt. In der Nacht vom 11. zum 12.05. wurden sogar Nachtfröste bis -1,6 °C gemessen.

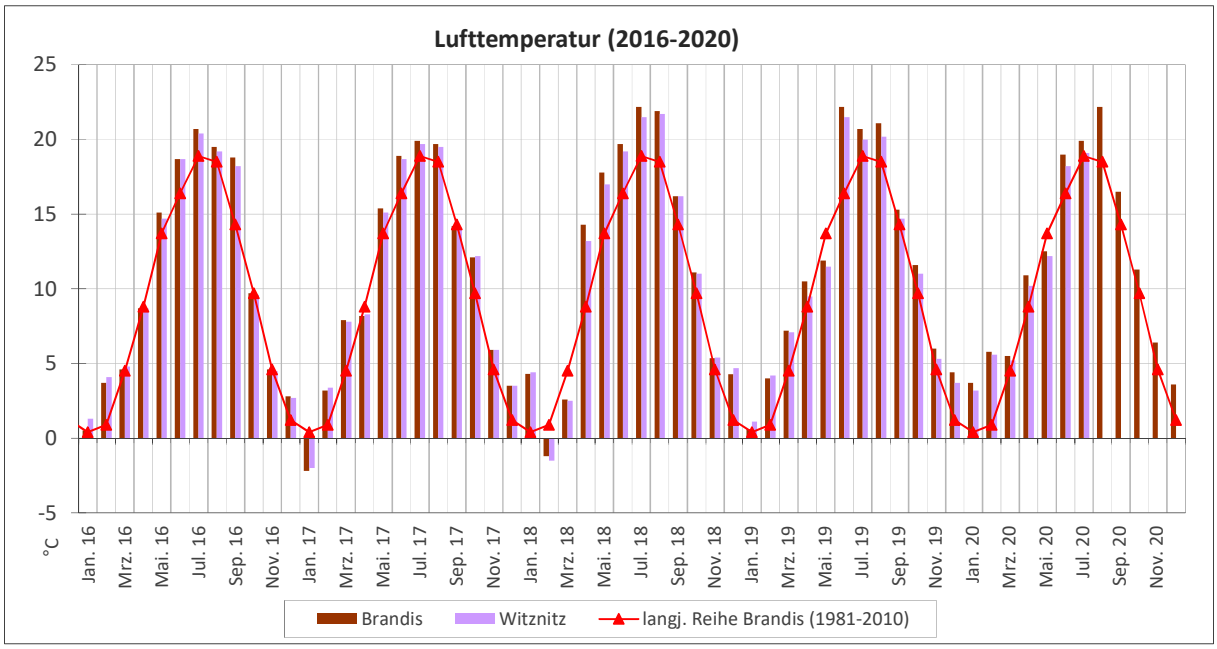

Abb. 3-11 Lufttemperatur in Brandis und Witznitz (BfUL)

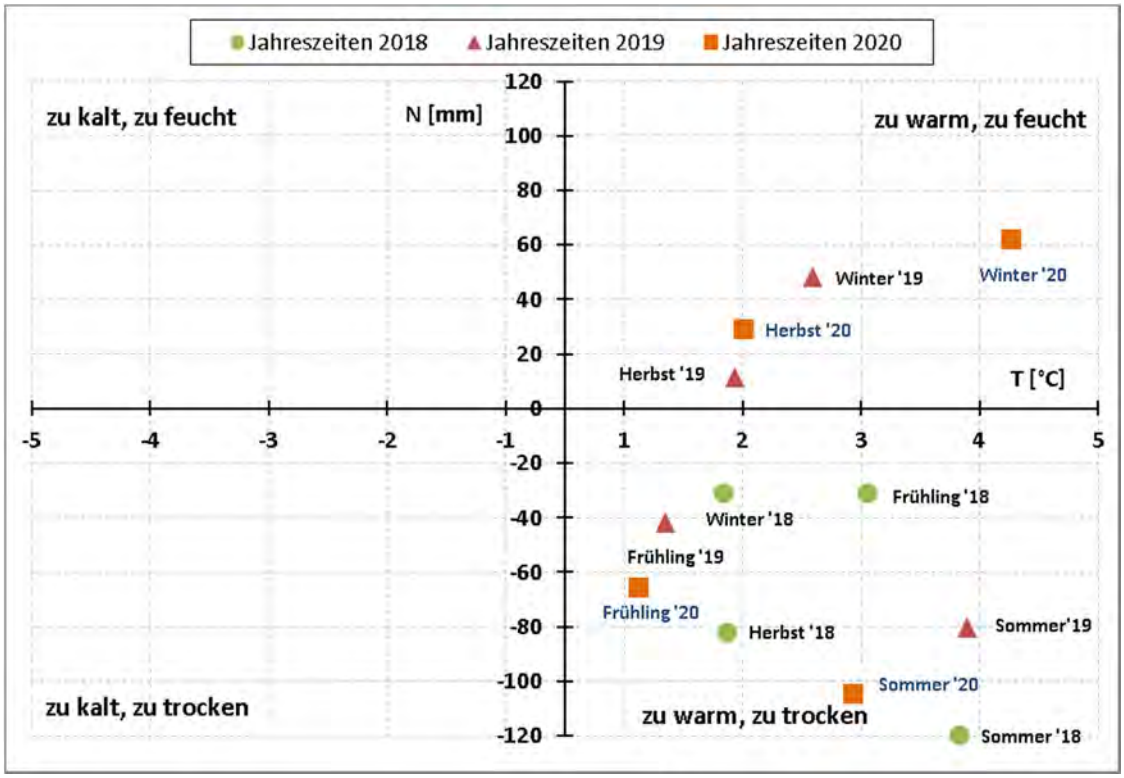

Abb. 3-12 Thermopluviogramm der Jahreszeiten im Zeitraum 2018 bis 2020 (Quelle: BfUL)

Somit gehört auch Jahr 2020 wieder zu den zu warmen Jahren und, nur das Frühjahr und den Sommer betrachtet, auch wieder zu den zu trockenen Jahren. Dies zeigt das Thermopluviogramm (s. ***Abb. 3-12***), welches die Abweichungen der jahreszeitlichen Niederschläge und Temperaturen zu den langjährigen Mittelwerten der Referenzperiode 1981 -2010 setzt.

Die potentielle Verdunstung (ET_{pot}) gibt den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre wieder. Mit dem vergrößerten Energiedargebot (u.a. durch die Erhöhung der Lufttemperatur) aus der Atmosphäre erhöht sich der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre. Dies ist auch wieder 2020 deutlich zu erkennen.

Die ***potenzielle Verdunstung*** (berechnet nach Turc-Wendling) betrug 2020 in

Brandis 815 mm

und lag somit 128 mm über dem langjährigen Mittelwert von 687 mm/a. Insbesondere in den Monaten März, April und September war die potentielle Verdunstung deutlich höher als die langjährigen Monatsmittelwerte.

In einer Mitteilung des BfUL heißt es: *Im April lag die ET_{pot} bei über 100 mm. Der höchste registrierte Wert im April seit Beginn der Messung. Im Gegensatz dazu sind in diesem Monat nur 4 mm Niederschlag gefallen, was zu einer deutlich negativen klimatischen Wasserbilanz führte. In den folgenden Monaten blieb die ET_{pot} auch überdurchschnittlich, allerdings auf einem geringeren Niveau als die Jahre zuvor. Nur der September und November kratzten noch einmal an den Höchstwerten. Der erhöhte Verdunstungsanspruch und die geringen Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode, allen voran die Frühjahrstrockenheit, sorgten auch 2020 wieder für ein frühzeitiges Aufbrauchen der Bodenwasserspeicher und somit für nicht optimale Wachstumsbedingungen für den Raps- und Luzernebestand.*

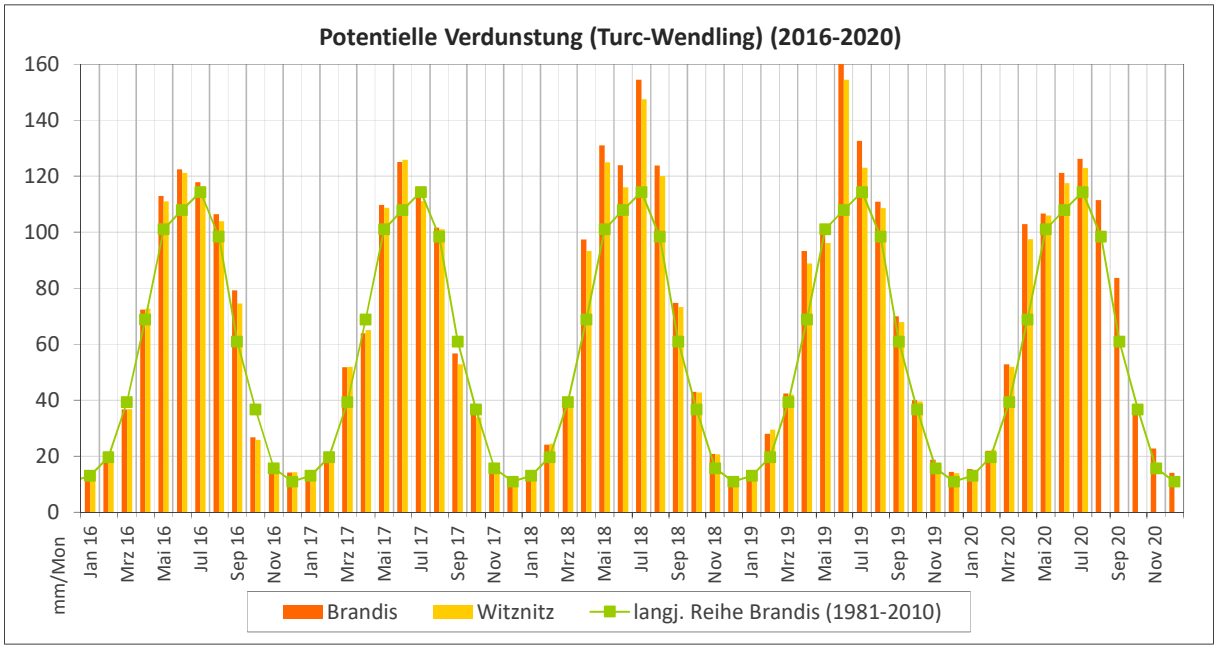

Abb. 3-13 Potenzielle Verdunstung in Brandis und Witznitz nach Turc-Wendling

Die ***klimatische Wasserbilanz*** (kWB) berechnet aus der Potentiellen Verdunstung minus dem korrigierten Niederschlag betrug 2020:

Brandis -265 mm.

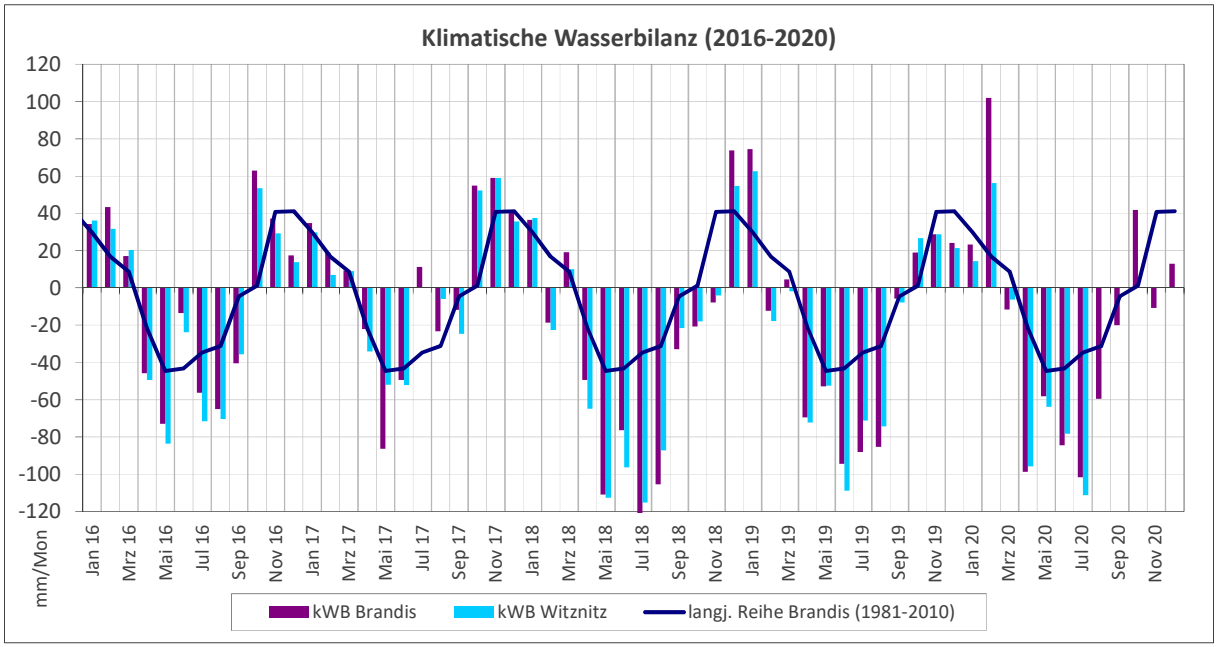

Abb. 3-14 Klimatische Wasserbilanz in Brandis und Witznitz

Der langjährige Mittelwert der kWB (1981 bis 2010) der Station Brandis ist ebenfalls negativ und beträgt -41,4 mm. In den letzten sechs Jahren war die klimatische Wasserbilanz an beiden Lysimeterstationen Brandis und Witznitz, bis auf das Jahr 2017, stets negativ. Insbesondere in den letzten drei Jahren 2018, 2019 und 2020 waren die Bilanzen um das 6 bis 10-fache negativer, als der langjährige Mittelwert von -41,4 mm (s. ***Tab. 3-8***).

Tab. 3-8 Klimatische Wasserbilanz an den Stationen Brandis und Witznitz von 2014 bis 2020

	Witznitz	Brandis
	mm	mm
2014	-109	-112
2015	-64	-94
2016	-150	-82
2017	24	36
2018	-440	-415
2019	-267	-258
2020		-265

Die sehr großen negativen Werte der letzten drei Jahre resultieren zum einen aus den geringen Niederschlägen und zum anderen aus den hohen potentiellen Verdunstungsmengen, welche etwa 19 % bis 20 % größer waren, als der Normalwert (vgl. auch Abb. 3-13).

3.8 Bodenwasserhaushalt an den Lysimetern

In den ***Abb. 3-15*** bis ***Abb. 3-20*** sind die Bodenwasserhaushaltsgrößen für 2020

- Verdunstung
- Bodenwasserausschöpfung und
- Sickerwasser

im Vergleich zu den Jahren ab 2012 dargestellt.

Die ***reale Verdunstung*** (Evapotranspiration) lag 2020 bei den ***12er Lysimetern*** mit Winterraps mit durchschnittlich 430 mm etwa 164 mm unter den Verdunstungswerten von 2016 (Winterraps). Insbesondere im Monat Juni waren die realen Verdunstungswerte gegenüber 2016 um fast 50 % geringer. Das ist damit zu begründen, dass im Juni 2016 die Niederschlagsmenge 163 % gegenüber dem langjährigen Mittelwert betrug, im Juni 2020 hingegen nur 55 %. Steht kein oder nur wenig Wasser zur Verfügung, ist die reale Verdunstung entsprechend klein.

Die reale Verdunstung des Luzernebestandes auf den ***14er Lysimetern*** erreichte mit 435 mm (Lys. 14/2) und 460 mm (Lys. 14/4) etwas höhere Verdunstungshöhen (s. ***Abb. 3-16***) als der Winterraps auf den 12er Lysimetern, aber wesentlich geringere Verdunstungshöhen, als das auf dem Luzerne-Lysimeter 14/4 von 2013 bis 2017 der Fall war. Die mittlere Evapotranspiration der Luzerne betrug in diesen fünf Jahren etwa 670 mm/a.

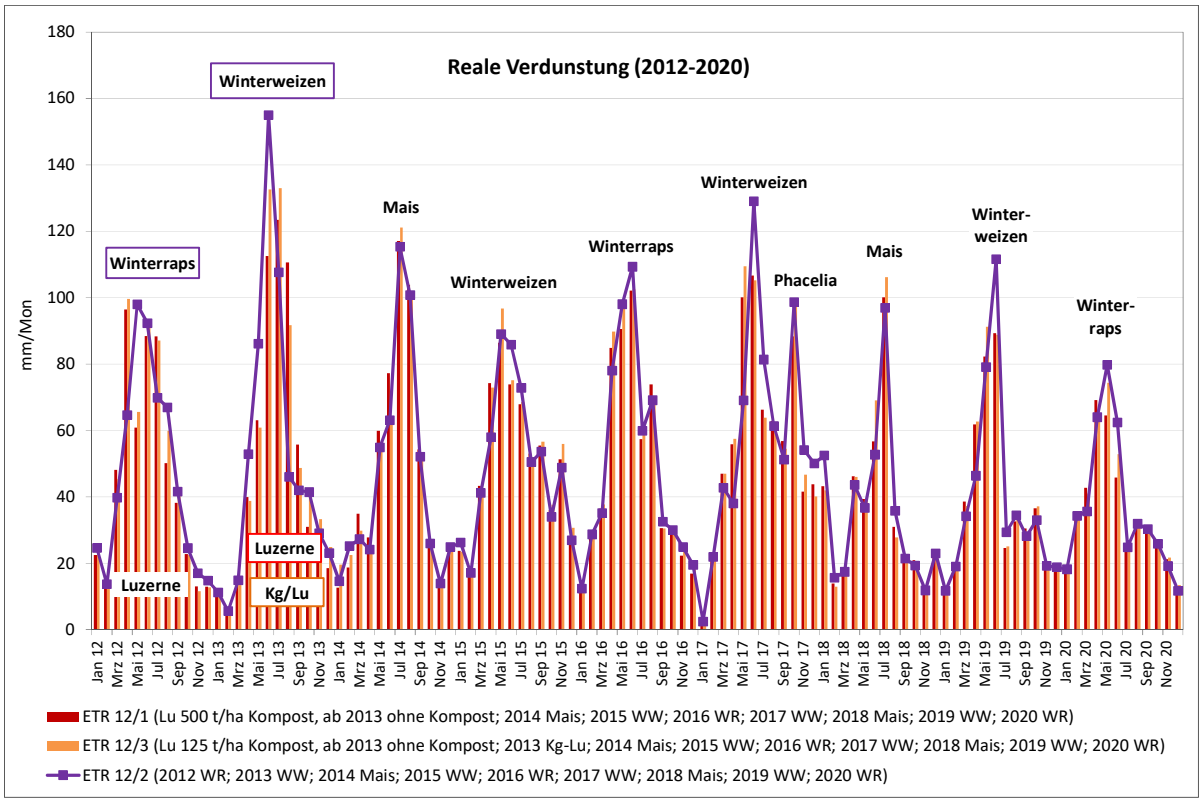

Abb. 3-15 Darstellung der realen Verdunstung auf den 12er Lysimetern

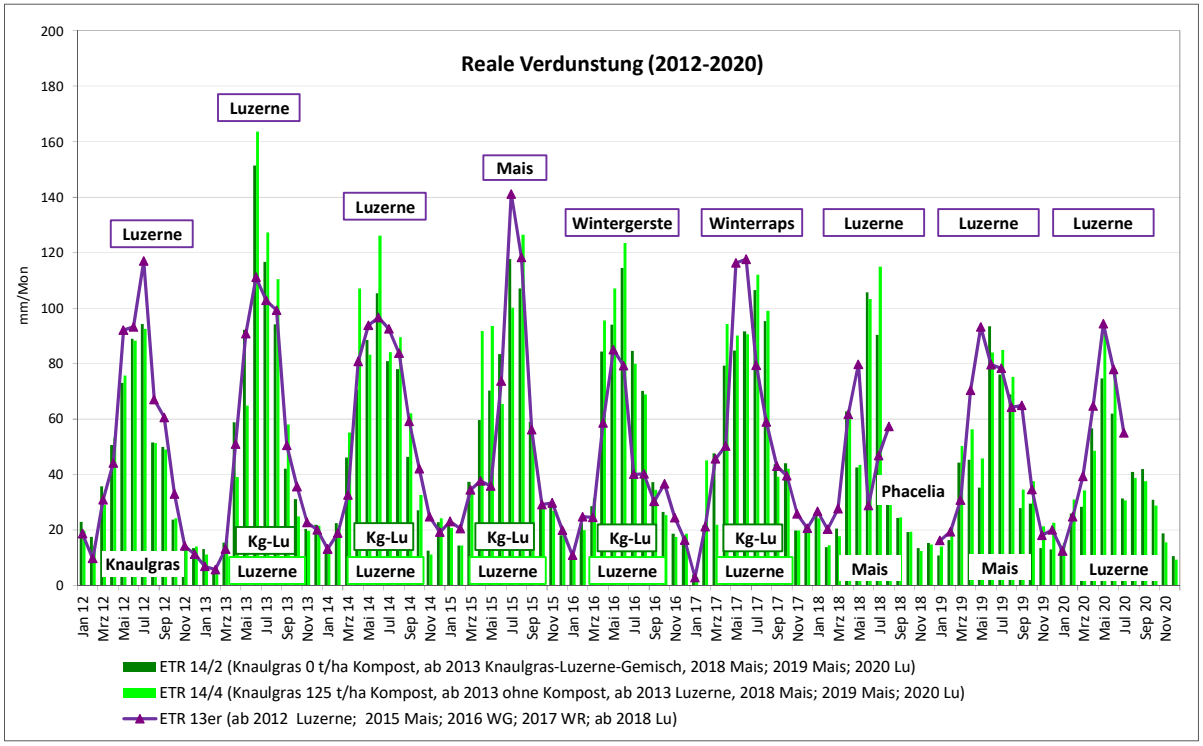

Abb. 3-16 Darstellung der realen Verdunstung auf den 14er Lysimetern

Tab. 3-9 Reale Verdunstungshöhen auf den Lysimetern für die verschiedenen Anbaukulturen von 2010 bis 2020

Lys.	2010 mm	2011 mm	2012 mm	2013 mm	2014 mm	2015 mm	2016 mm	2017 mm	2018 mm	2019 mm	2020 mm
14_2	713	603	541	647	620	634	623	659	465	474	435
	Kg	*Kg*	*Kg*	*Kg/Lu*	*Kg/Lu*	*Kg/Lu*	*Kg/Lu*	*Kg/Lu*	*M*	*M*	*Lu*
14_4	668	600	530	648	716	661	645	678	482	547	460
	Kg	*Kg*	*Kg*	*Lu*	*Lu*	*Lu*	*Lu*	*Lu*	*M*	*M*	*Lu*
12_1	833	706	560	593	576	570	628	693	427	464	418
12_3	822	715	582	601	574	580	647	709	438	474	438
	Lu	*Lu*	*Lu*	*Lu*	*M*	*Ww*	*Wr*	*Ww*	*M*	*Ww*	*Wr*
12_2	595	544	577	595	556	567	632	700	427	465	432
	Ww	*Wg*	*Wr*	*Ww*	*M*	*Ww*	*Wr*	*Ww*	*M*	*Ww*	*Wr*
13er	601	527	600	592	656	614	480	621	---	589	---
	Wg	*Wr*	*Lu*	*Lu*	*Lu*	*M*	*Wg*	*Wr*	Lu	Lu	Lu

Lu…Luzerne Kg…Knaulgras M…Mais Ww…Winterweizen Wr…Winterraps Wg…Wintergerste

Vergleicht man einmal die verschiedenen Anbaukulturen untereinander, ergeben sich folgende ***durchschnittliche reale Verdunstungshöhen*** (Mittelwerte der Einzelwerte aus ***Tab. 3-9***):

Luzerne	638 mm/a
Knaulgras-Luzerne	631 mm/a
Knaulgras	609 mm/a
Winterweizen	583 mm/a
Winterraps	547 mm/a
Wintergerste	542 mm/a
Mais	507 mm/a

Die ***Bodenwasserausschöpfung*** erreichte bei den ***12er Lysimetern*** mit Winterraps im Juli 2020 ihren Höhepunkt, war aber nicht ganz so groß, wie im Juli 2016 (vgl. ***Abb. 3-17***). Die ***14er Lysimeter*** besaßen 2020 mit Luzerne eine geringfügig größere Bodenwasserausschöpfung (s. ***Abb. 3-18***) als die 12er Lysimeter mit Winterraps. Insgesamt sind die Werte aber etwa vergleichbar mit den Werten des Erstaufwuchses auf dem Lysimeter 14/4 im Jahr 2013.Die Luzerne auf den 13er Lysimetern besaß bis Juli 2020 die größte bisher erfasste Bodenwasserausschöpfung. Leider liegen ab August 2020 keine Daten mehr vor. Die Luzerne scheint sich jedoch, trotz der großen Trockenheit in den letzten drei Wuchsjahr besser etabliert zu haben. Des Weiteren ist in Abb. 3-18 erkennbar, dass mit zunehmendem Alter der Luzerne-Pflanzen die Bodenwasserausschöpfung ansteigt, was mit der Wurzelausdehnung in tiefere Schichten zu begründen ist. Erst 2017 ist eine Abnahme der Ausschöpfung erkennbar.

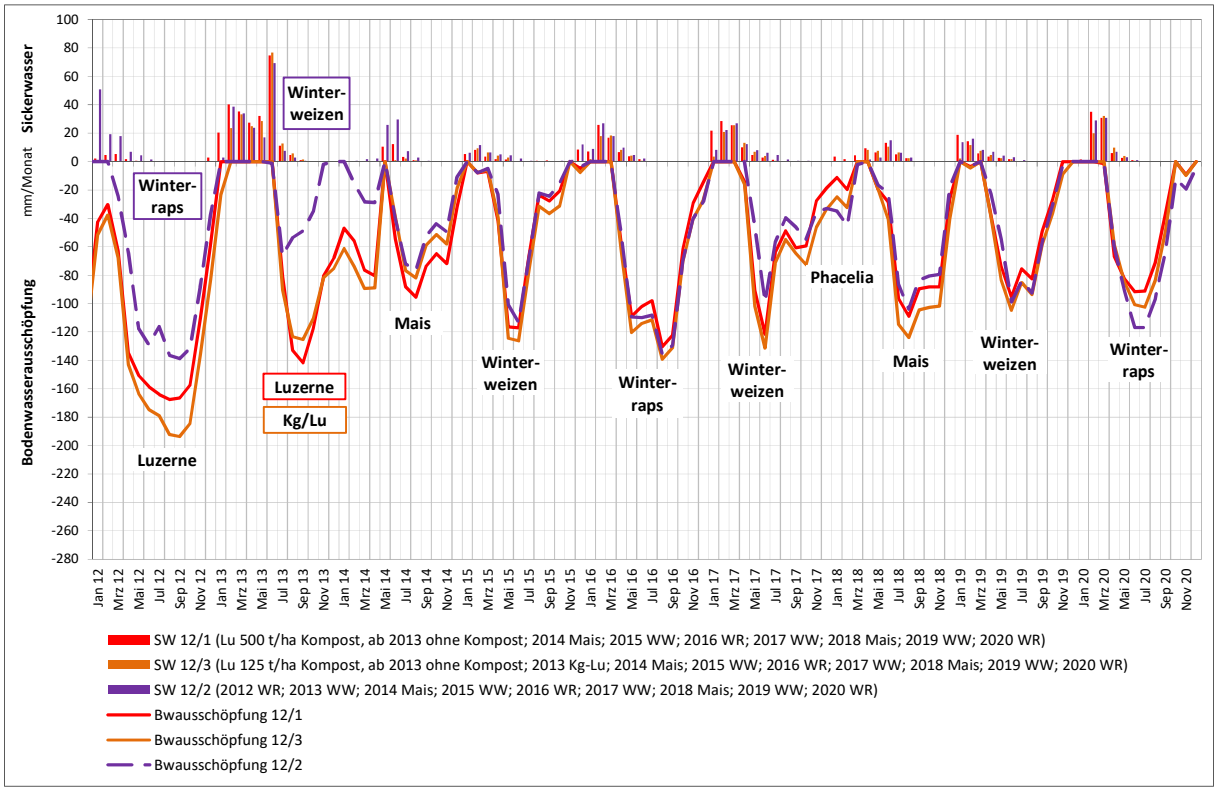

Abb. 3-17 Darstellung der Bodenwasserausschöpfung der 12er Lysimeter

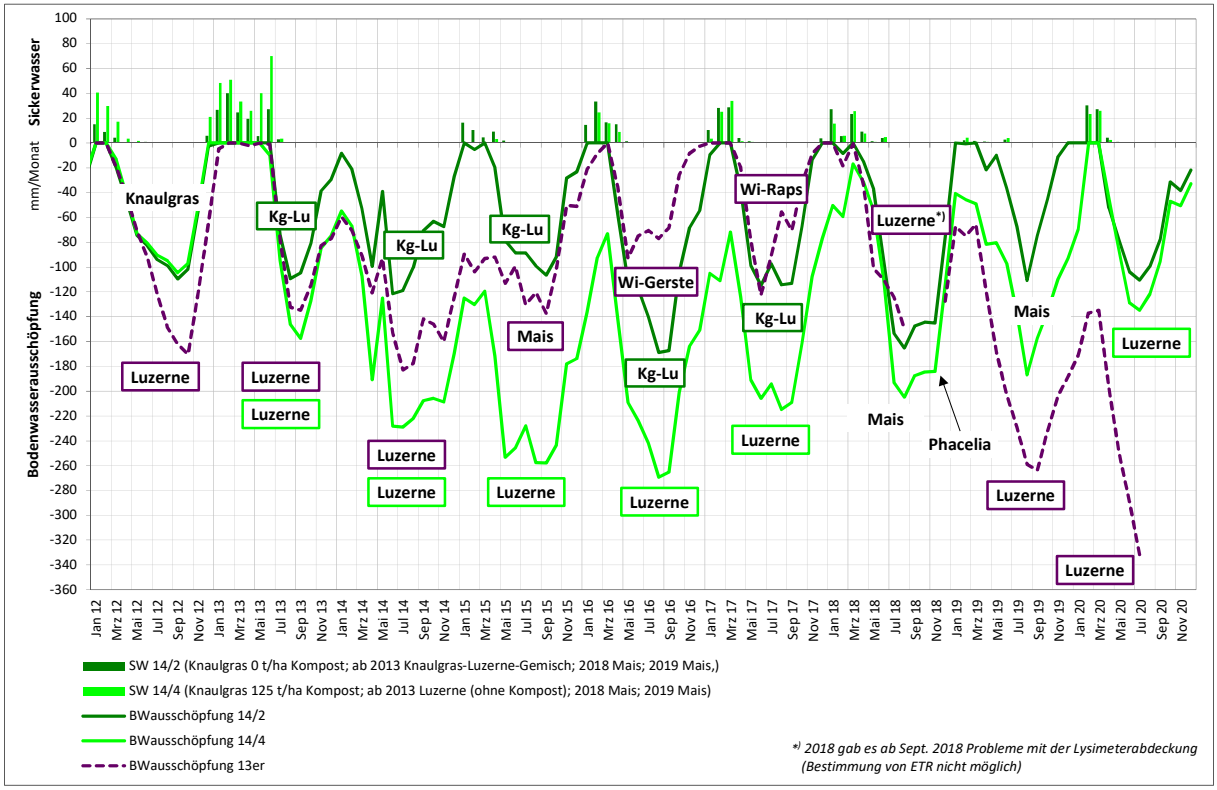

Abb. 3-18 Darstellung der Bodenwasserausschöpfung der 14er Lysimeter

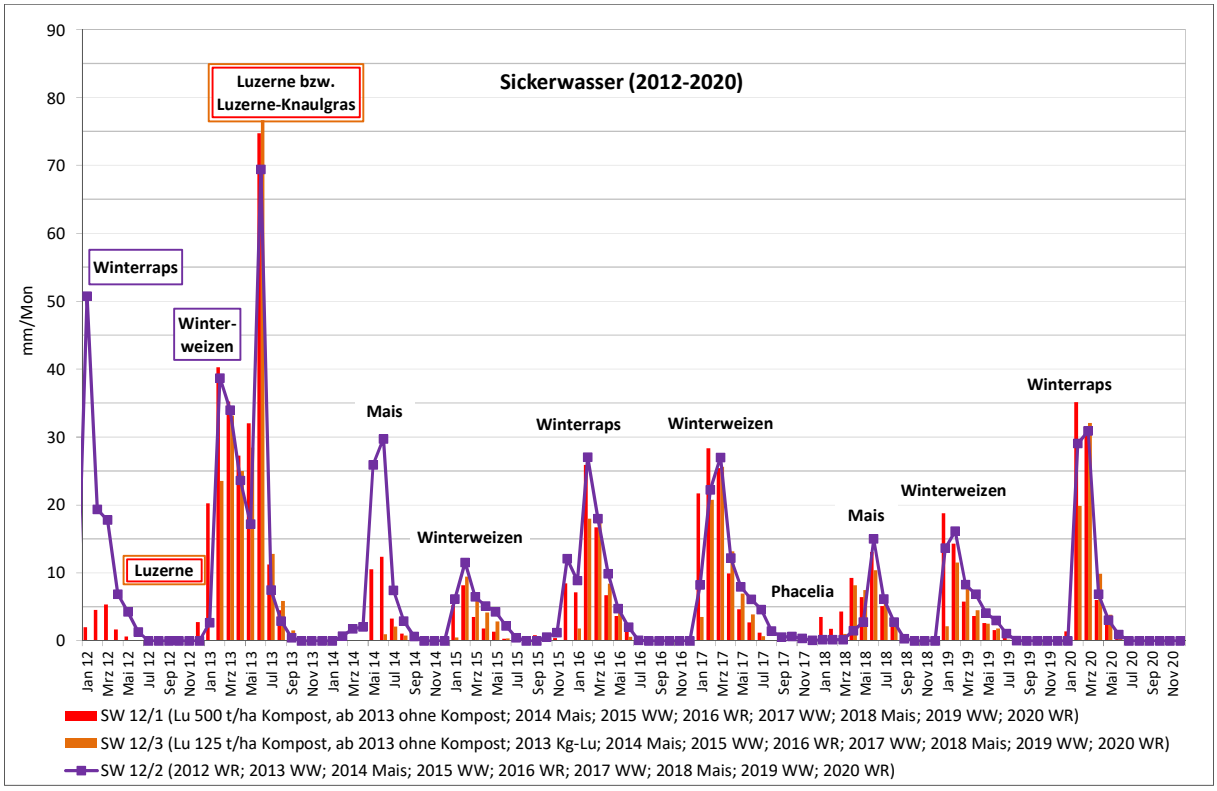

Abb. 3-19 Darstellung der Sickerwassermengen auf den 12er Lysimetern

Die ***Sickerwassermengen*** der 12er Lysimetern betrugen im Jahr 2020 etwa 66 mm bis 77 mm (s. ***Abb. 3-19***) und waren höher, als in den beiden Jahren zuvor und vergleichbar mit den Sickerwassermengen von 2016, als auf den 12er Lysimetern ebenfalls Winterraps angebaut wurde. Die höchst gemessenen Sickerwassermengen von 20 mm/Monat bis 35 mm/Monat traten hierbei in den Monaten Februar und März 2020 auf, was auf die erhöhten Niederschläge im Februar zurückzuführen ist. Das erste große Niederschlagsereignis mit etwa 55 mm fand hierbei Anfang Februar (01.-04.02.) statt. Anschließend kam es dann Ende Februar und Anfang März zu einer etwa 20 Tage andauernden Niederschlagsperiode (Σ = 76 mm), die sich dann in erhöhten Sickerwassermengen niederschlug.

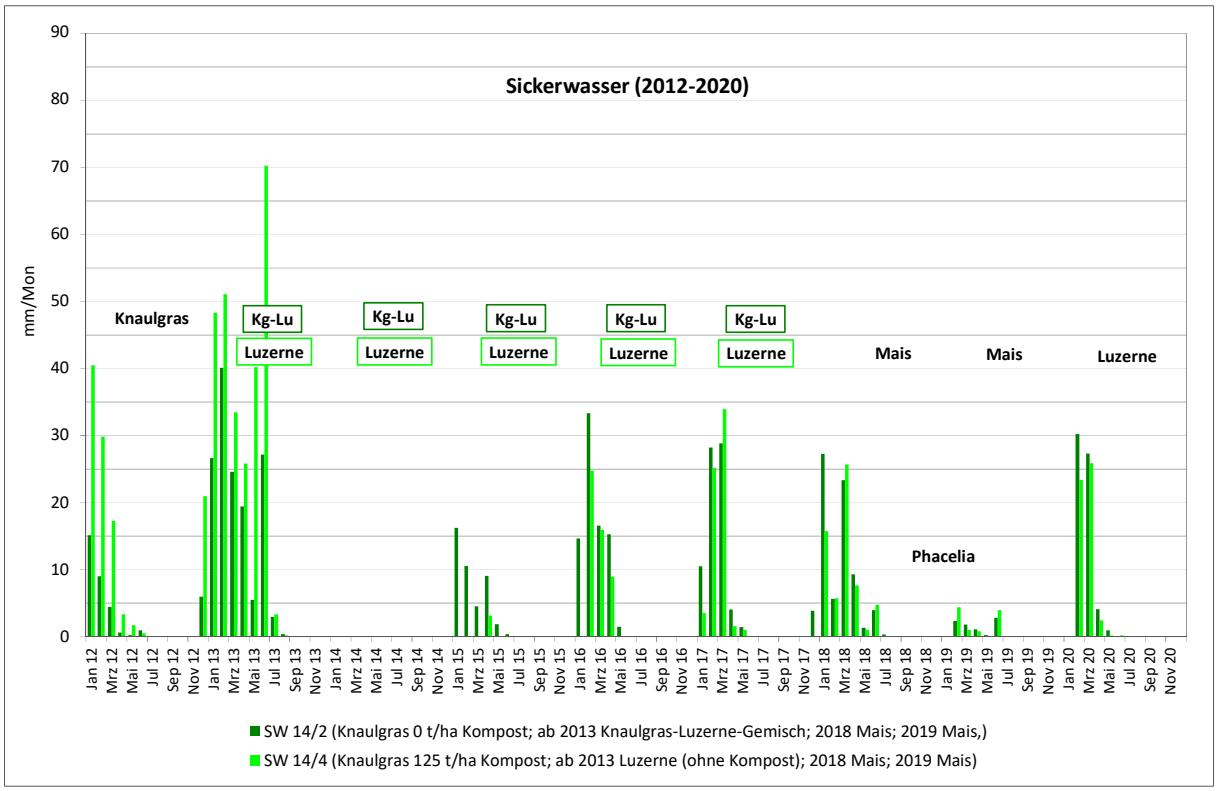

Abb. 3-20 Darstellung der Sickerwassermengen auf den 14er Lysimetern

In ***Abb. 3-20*** ist die erhöhte Sickerwasserbildung vom Winter 2012/2013 gut zu erkennen, die aus den erhöhten Niederschlägen Ende 2012 resultierte. Aber auch im Frühsommer 2013 wurde relativ viel Sickerwasser gebildet, was aus den hohen Niederschlägen vom Mai und Juni in Verbindung mit dem Bodenaustausch und der Neueinsaat resultierte. 2014 kam es in den 14er Lysimeter zu keiner Sickerwasserbildung. Im Jahr 2015 wurde insbesondere im Lys. 14/2 mit Knaulgras-Luzerne-Gemisch eine höhere Sickerwasserbildung registriert, als im Lys. 14/4 mit reiner Luzerne. 2016 und 2017 kam es dann zu einer etwa gleich großen Sickerwasserbildung in den Wintermonaten. Im Jahr 2018 war die Sickerwasserbildung etwa vergleichbar zu den Vorjahreswerten 2017 und 2016. Lediglich der Februar-Wert war im Vergleich zu den Vorjahreswerten wesentlich geringer. Die im Frühjahr 2018 gemessenen Sickerwassermengen

sind noch auf den Luzerne- bzw. Knaulgras-Luzerne-Bewuchs zurückzuführen. Die Aussaat von Mais erfolgte Anfang Mai. Während der gesamten Vegetationsperiode kam es zu keiner weiteren Sickerwasserbildung. Auch im Nachgang der Maisernte und Aussaat von Phacelia trat bis Ende 2018 kein Sickerwasser auf. Dies ist im Wesentlichen auf die sehr geringen Niederschlagsmengen zurückzuführen. Im Jahr 2019 kam es auf den 14er Lysimetern trotz erhöhter Januar-Niederschläge zu sehr geringen Sickerwassermengen von 8 mm/a bzw. 10 mm/a. Ggf. ist dies auf die Zwischenbegrünung mit Phacelia zurückzuführen. Im Jahr 2020 wurden wieder erhöhte Sickerwassermengen von 52 mm bis 63 mm gemessen, die insbesondere im Februar und März auftraten und ebenfalls aus den erhöhten Niederschlägen im Februar und März resultieren. Insgesamt waren die Sickerwassermengen auf den 14er Lysimetern mit Luzernebewuchs etwas geringer, als auf den 12er Lysimetern mit Winterraps.

Im Jahr 2020 wurden folgende Sickerwassermengen gemessen:

- Lys. 14/2 62,7 mm (Luzerne)
- Lys. 14/4 52,1 mm (Luzerne)
- Lys. 12/1 76,8 mm (Winterraps – Winterweizen)
- Lys. 12/2 70,7 mm (Winterraps – Winterweizen)
- Lys. 12/3 66,4 mm (Winterraps – Winterweizen)

4 Sondermonitoring

Das auf der Kippe Witznitz errichtete Sondermessprofil dient der Nachverfolgung des Sickerwasserstroms auf der Kippe Witznitz und dessen Einfluss auf die GW-Neubildung.

Die Errichtung des Sondermessprofils erfolgte 06/2019. Hierbei wurden zwei neue Grundwassermessstellen (GWM) auf der Kippe Witznitz errichtet (s. ***Abb. 4-1***).

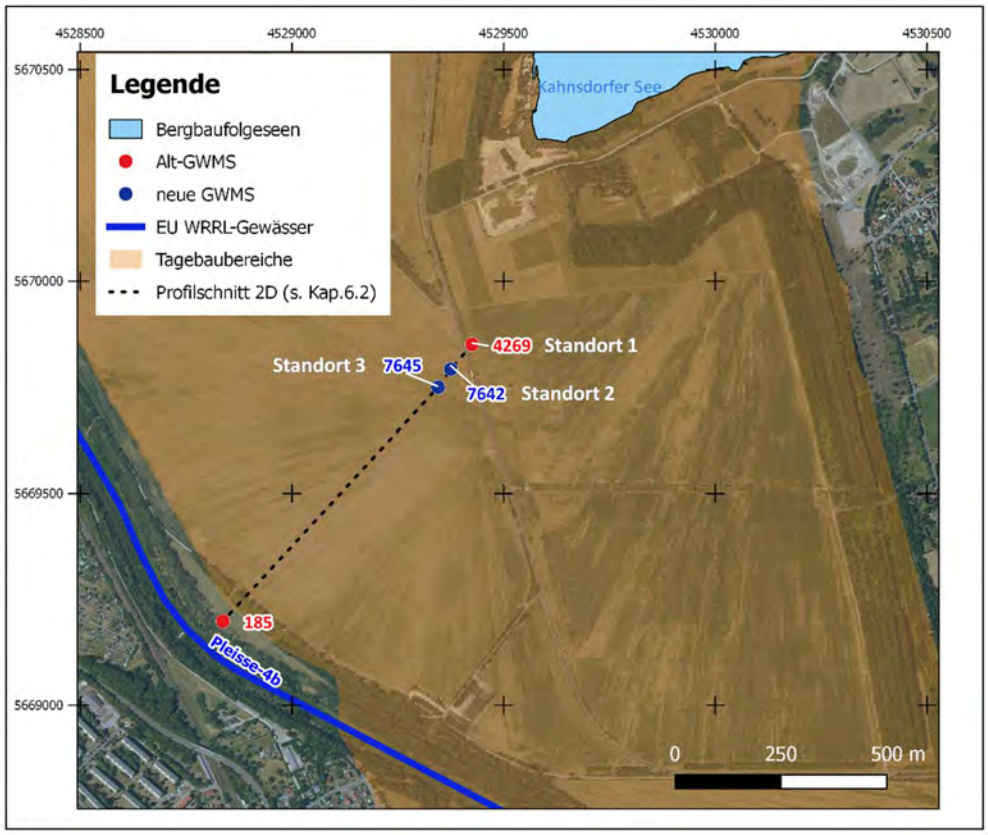

Abb. 4-1 Lage der alten und neu errichteten GWM 7642 und 7645 auf der Kippe Witznitz

An einer bereits bestehenden GWM (4269 – Standort 1) und an den beiden neu errichteten GWM (7642 – Standort 2 und 7645 – Standort 3) wurden des Weiteren Bodenwassermessstellen installiert. Gemessen werden an den drei Bodenwassermessstellen in jeweils zwei Teufen (1 m und 2,5 m) über jeweils zwei kapazitive Bodenfeuchtesensoren der Wassergehalt sowie über wartungsfreie Saugspannungssonden der pF-Wert. Die bodenspezifische Kalibrierung der Bodenfeuchtesensoren erfolgte für die Standorte 2 und 3 anhand der teufenorientierten Bodenproben aus dem Bohrgut. Für Standort 1, für den keine Bodenproben für die Kalibrierung vorlagen, wurden die Kalibrierungskoeffizienten vom Standort 2 übernommen, da die am Standort 1 angetroffenen Kornfraktionen aus den Rammkernbohrungen dem des Standorts 2 ähnelte.

Für die Prognosefortschreibung, die 2021 erfolgt, wurde 2019 ein 2D-Bodenwasserhaushaltsmodell mit HYDRUS 2D aufgebaut, welches anhand der Messdaten an den Bodenwassermessstellen fortlaufend kalibriert wird. Aufgrund der anhaltenden Trockenheit seit der Errichtung

dieser Bodenwassermessstellen konnte die Kalibrierung des Modells bis Ende 2019 nur bedingt erfolgen. Insbesondere die tiefliegenden Sonden zeigten bis Ende 2019 keinen Anstieg der Bodenfeuchte. Deshalb wurde vorgeschlagen, Versickerungsversuche bzw. Infiltrationsversuche durchzuführen. Diese erfolgten im Mai/Juni 2020. Die Dokumentation der Versuche liegt als Anlage 3 dem Bericht bei. Die Versickerungsversuche erfolgten an allen drei Standorten (s. Abb. 4-1). ***Tab. 4-1*** widerspiegelt die Dimension der Versickerungsversuche sowie die aus den Versuchen ermittelte stationäre Infiltrationsrate und die Bodenart, welche anhand von Literatur-Werten gem. [10] abgeschätzt wurde.

Tab. 4-1 Dimensionierung der Versickerungsversuche sowie ermittelte stationäre Infiltrationsrate und Bodenart [9]

	Einheit	Standort 1 GWM 4269	Standort 2 GWM 7642	Standort 3 GWM 7642
		ohne Bewuchs	ohne Bewuchs	ohne Bewuchs
Ring-Durchmesser	m	2,1	1,6	1 / 3,1
Fläche	m²	3,464	2,011	6,762
Überstauhöhe	m	0,05	0,02	0,05
Infiltrierte Wassermenge	m³	6,19	8,34	6,69
stationäre Infiltrationsrate i_f	mm/min	1,14	6,13	2,56
	mm/h	68,4	367,8	153,6
Bodenart (Abschätzung)[*)]		stark lehmiger Sand	mittel schluffiger Sand	stark lehmiger Sand

[*)] Abschätzung gem. SHUKLA & LAI, 2006 [10]

Beispielhaft ist die Entwicklung der Infiltrationsrate, die kumulative Infiltrationsmenge und die hieraus ermittelte Steigung (≙ stationären Infiltrationsrate i_f) am Standort 1 in ***Abb. 4-2*** dargestellt.

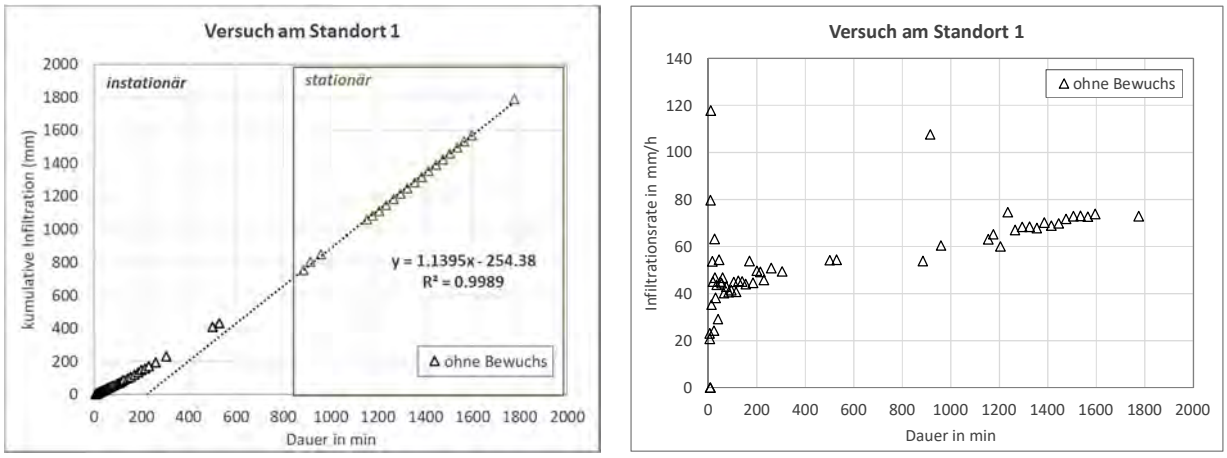

Abb. 4-2 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate i_f) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate i_f in mm/h während des Versuchs [9]

In der Zusammenfassung der Dokumentation [9] heißt es:

Aus den ermittelten Versickerungsraten kann geschlussfolgert werden, dass es sich bei dem anstehenden Kippenmaterial voraussichtlich um mittel schluffigen Sand bis stark lehmigen Sand handelt. Die abgeschätzten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten liegen demnach bei etwa 1,4 · 10^{-5} m/s bis 3,6 · 10^{-5} m/s und sind somit höher, als bisher angenommen.

Anmerkung: Die genannten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten resultieren aus einer skalenabhängigen Umrechnung (Korrekturfaktor) der ermittelten stationären Infiltrationsraten. Dieser Korrekturfaktor wird anhand der Überstauhöhe, des Infiltrometerradius und der kapillaren Steighöhe des geschätzten Bodentyps berechnet. Die Messung der Bodenfeuchte mittels TDR-Sonden außerhalb der Infiltrometerringe zeigte eine z. T. erhebliche Verdriftung der Feuchtefront in nördliche Richtung, was ggf. zu einer Überschätzung der stationären Infiltrationsrate geführt haben kann. Somit ist eine Überschätzung der so berechneten k_f-Werte nicht auszuschließen. Insgesamt konnte aber zumindest eine Durchfeuchtung bis in 2,5 m Tiefe am Standort 1 und 3 erreicht werden. Am Standort 2 war der Ring-Durchmesser des außerhalb der Sonden platziert.

Weiter heißt es:

Es konnte aber auch festgestellt werden, dass die hydraulischen Leitfähigkeiten lokal (horizontal wie auch vertikal) sehr große Unterschiede aufweisen. So wurden bei kleinskaligen Vorversuchen am Standort 1 wesentlich geringere Infiltationsraten gemessen, die auf Lehm oder Ton hinweisen. Es konnte somit bestätigt werden, dass der Kippenkörper eine hohe Anisotropie aufweist.

Anhand der Messdaten der Versickerungsversuche erfolgte im Anschluss eine inverse Modellierung der Abtrocknungsphase und damit eine Ermittlung der bodenhydraulischen Parameter für das 2D-Wasserhaushaltsmodell (s. Abschnitt 5.2).

4.1 GW-Standsentwicklung und Bodenwassermessstellen

Die ***Entwicklung der GW-Stände*** im Jahr 2020 zeigt einen deutlichen Abwärtstrend (s. ***Abb. 4-3***). Bis Ende des Jahres 2020 sanken die GW-Stände im Mittel um 39 cm, wobei kurzzeitige Schwankungen von bis zu 30 cm auftraten. Der GW-Flurabstand betrug zum Jahresende etwa 6,5 m (Standort 1) bis 9,2 m (Standort 2). Des Weiteren ist in Abb. 4-3 erkennbar, dass die GW-Stände am Standort 1 und Standort 2 ab April 2020 nahezu identisch verlaufen. Im Winterhalbjahr 2019/2020 lagen die GW-Stände am Standort 2 noch etwa 10 cm höher als am Standort 1. Es ist davon auszugehen, dass Standort 1 und 2 auf der GW-Scheide liegen. Ein deutlicher Anstieg der GW-Stände bis zum Ende des Winterhalbjahres 2019/2020 ist nicht ersichtlich.

Die Datenlücke im Zeitraum März/April 2020 resultiert aus dem gewaltsamen Entwenden der Solarpanelen und der Akkus an allen drei Messstationen. Seither läuft die Stromversorgung nur über Akkubetrieb. Diese werden vierteljährig ausgetauscht.

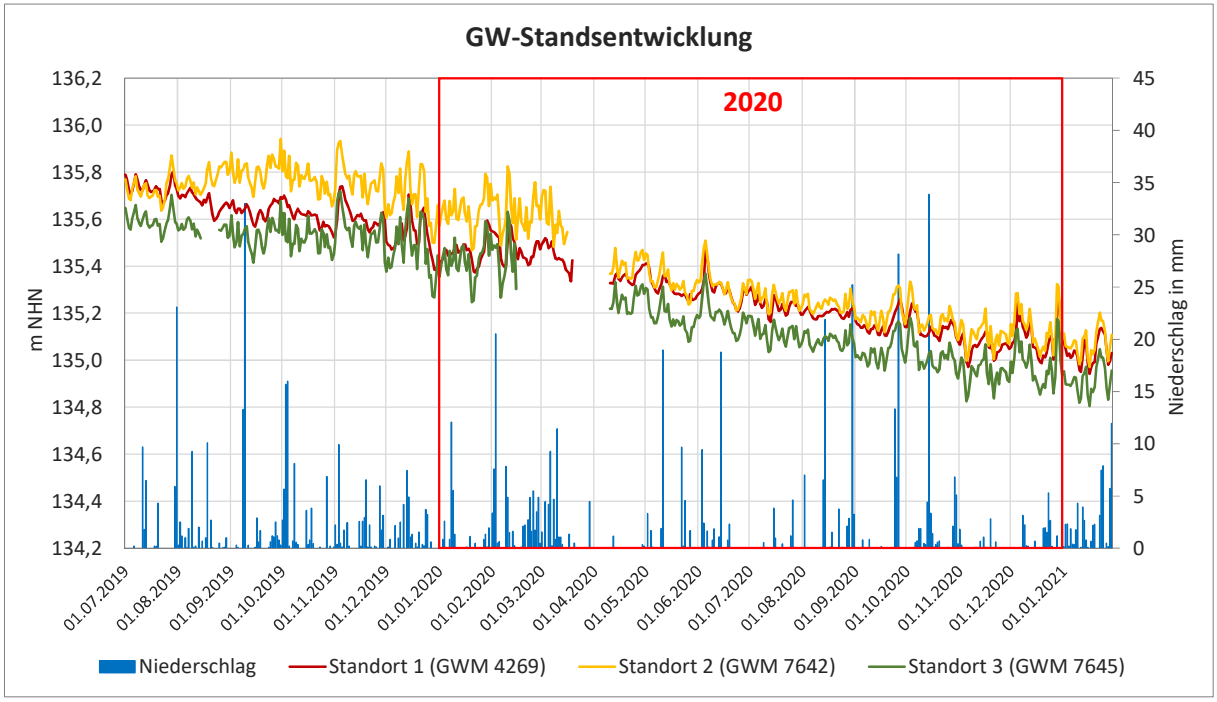

Abb. 4-3 Entwicklung der GW-Stände an den Standorten der drei Sondermessstellen

Die Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte an den Bodenwassermessstellen seit 07/2019 zeigen die folgenden Abbildungen (***Abb. 4-4*** bis ***Abb. 4-6***). Die Sonden 1 und 2 repräsentieren hierbei die Bodenfeuchte bzw. den zugehörigen pF-Wert in 1 m Tiefe. Die Sonden 3 und 4 stellen die Bodenfeuchte bzw. den zugehörigen pF-Wert in 2,5 m Tiefe dar. Standort 1 (GWM 4269) kennzeichnet sich dadurch, dass dieser außerhalb der Bewirtschaftungsfläche liegt. Der Standort ist ganzjährig mit hohem Gras bewachsen. Standort 2 (GWM 7642) und 3 (GWM 7645) liegen auf der Bewirtschaftungsfläche A (vgl. ***Abb. 3-1***). Im April 2020 fand auf dieser Fläche ein Fruchtwechsel statt. Seit 2015 wurde die Fläche mit Luzerne bewirtschaftet. Im April 2020 erfolgte die Aussaat von Mais und Anfang September die Ernte. Im Anschluss wurde Winterweizen ausgesät.

Am ***Standort 1*** (GWM 4269) entwickelten sich die Bodenfeuchte-Werte an den zwei Sonden in ***1 m Tiefe*** recht ähnlich (s. ***Abb. 4-4***). Anfang Januar und Anfang Februar 2020 stieg die Bodenfeuchte der Sonde 1 sprunghaft an. Die zweite Sonde reagierte verzögert erst Anfang Februar mit einem Anstieg. Die zugehörigen pF-Sonden zeigen eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Bodenfeuchte. Die Maximalwerte in 1 m Tiefe wurden schließlich an beiden Sonden am 12.03.2020 mit etwa 37 % und 31 % (≈ Vollsättigung) registriert. Während der Versickerungsversuche wurden ähnlich hohe Werte gemessen. Ende 2020 betrug die

Bodenfeuchte an beiden Sonden noch etwa 15 %. Die pF-Sonde 1 zeigte seit Mitte Juli keine Werte mehr an. Der pF-Wert an Sonde 2 betrug Ende des Jahres etwa 3,4, was einer Bodenwasserspannung von -25 m WS entspricht. Der Feuchtezustand am Messpunkt 2 kann somit als frisch bis trocken bezeichnet werden.

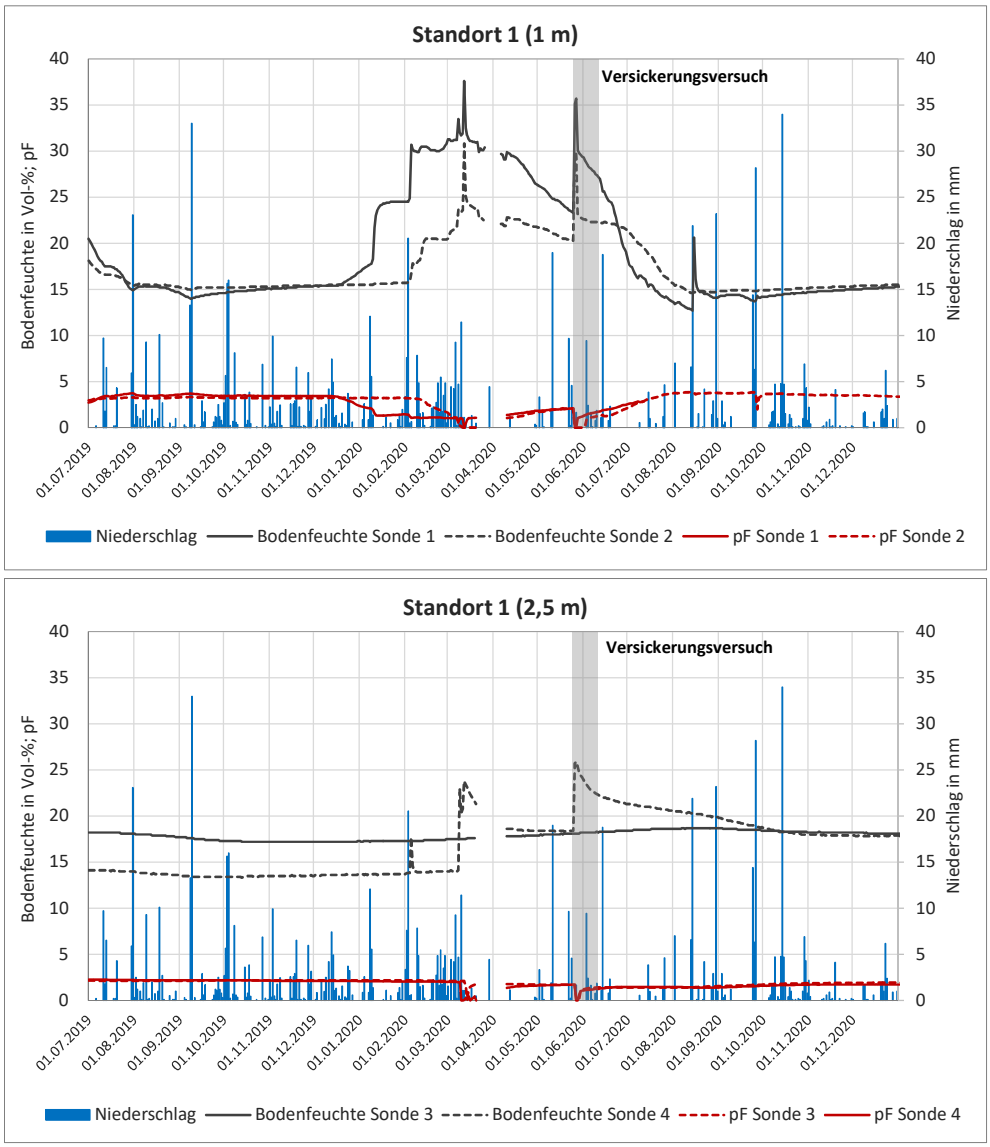

Abb. 4-4 Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte am Standort 1 in 1m und 2,5 m Tiefe

Die Entwicklung der Bodenfeuchte in ***2,5 m Tiefe*** zeigt an Sonde 4 eine Anstieg Anfang März. Der höchste Wert wurde am 13.03.2020 von etwa 23 % gemessen. Während der Versickerungsversuche stieg der Wert nochmal auf etwa 26 % und sank anschließend bis Mitte Oktober auf etwa 18 % ab. Sonde 3 in 2,5 m Tiefe wies bisher nur eine äußerst geringe Änderung der Bodenfeuchte auf. Die Bodenfeuchte schwankte an diesem Messpunkt zwischen 17,2 % und 18,7 %. Während der Versickerungsversuche konnte diese Sonde nicht angesprochen werden. Beide pF-Sonden zeigten während der Versickerungsversuche eine Abnahme bis auf Null

(Vollsättigung) und im Anschluss wieder einen Anstieg bis auf etwa 1,4. Der pF-Wert stieg bis zum Jahresende auf etwa 1,7 an.

Gegenüber Standort 1 weisen die Werte an ***Standort 2*** (GWM 7642) auf eine höhere Trockenheit hin (s. ***Abb. 4-5***). So schwankte die Bodenfeuchte an Sonde 1 in ***1m Tiefe*** zwischen 6,5 % im August 2019 und 22 % während bzw. im Nachgang des Versickerungsversuchs im Juni 2020.

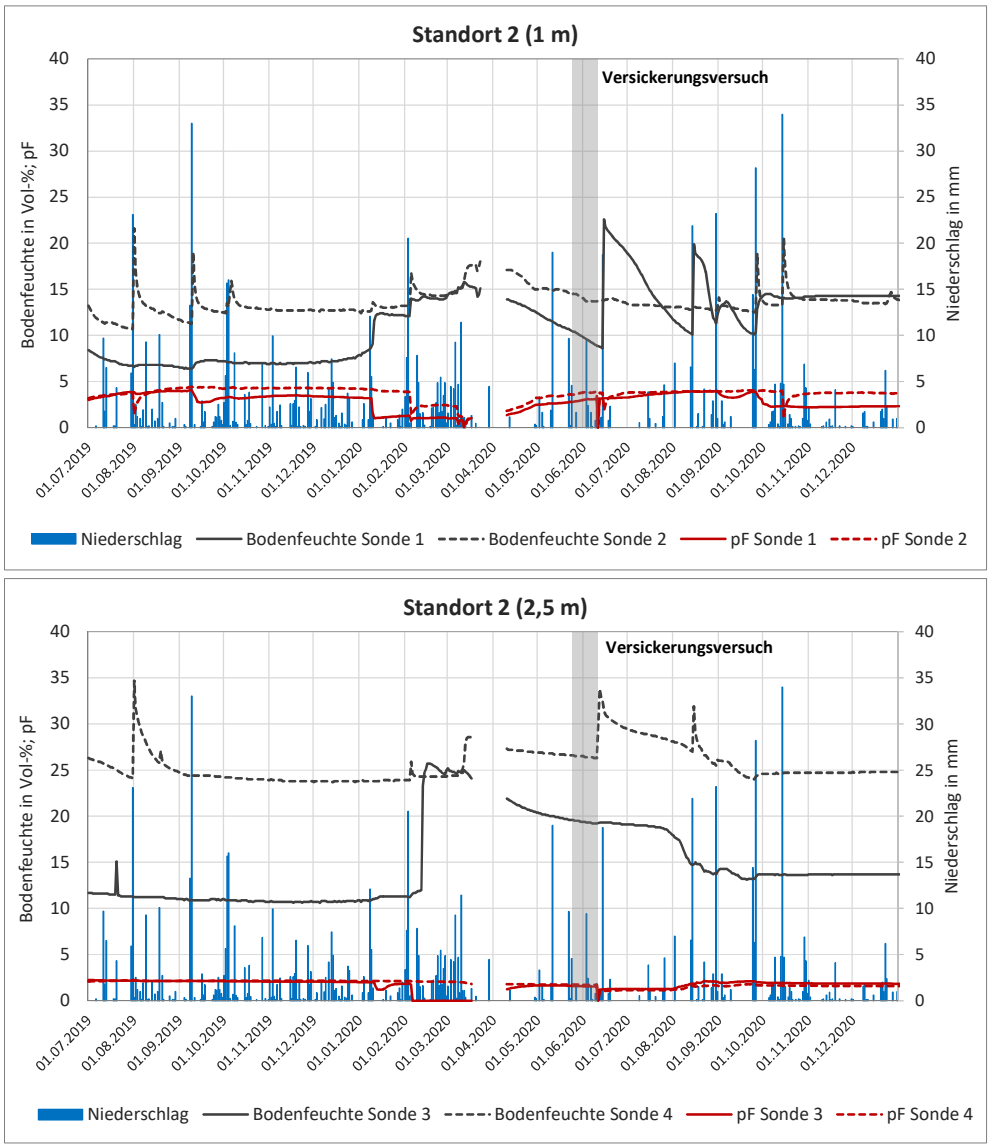

Abb. 4-5 Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte am Standort 2 in 1m und 2,5 m Tiefe

Im Februar, März und April 2020 kam es infolge von länger anhaltenden Niederschlägen zu einem Anstieg der Bodenfeuchte auf etwa 15 %. Im Anschluss sank die Bodenfeuchte wegen der anhaltenden Trockenheit wieder auf etwa 8,5 % ab. Auch nach Beendigung des Versickerungsversuchs sank die Bodenfeuchte innerhalb von zwei Monaten wieder auf 10 % ab. Mehrere größere Niederschlagsmengen im August, September und Oktober 2020 führten zu einen vorübergehenden Anstieg. Sonde 2 zeigte zu Beginn der Messungen im Jahr 2019 noch eine höhere Sensibilität gegenüber erhöhten Niederschlagsmengen. Es ist zu vermuten,

dass es nach dem Einbau der Sonde noch bevorzugte Sickerwege gab, die zu einem kurzzeitigen Anstieg der Bodenfeuchte am Messpunkt führten. Im Jahr 2020 scheint dieser Einfluss etwas geringer geworden zu sein. Jedoch ist bei Niederschlagsmengen von > 25 mm noch immer ein kurzzeitiger Anstieg erkennbar. Die Bodenfeuchten beider Sonden zeigten Ende des Jahres vergleichbare Werte von etwa 14 % an. Die pF-Werte der Sonden 1 und 2 wiesen eine gute Übereinstimmung mit der Entwicklung der Bodenfeuchte auf. Ende des Jahres betrugen der pF-Wert an Sonde 1 etwa 2,8 und an Sonde 2 etwa 3,8. Letzter Wert weist auf einen sehr trockenen Zustand des Bodens hin (bei pF = 4,2 wird der permanente Welkepunkt erreicht). Es wird vermutet, dass ggf. nur eine schwache Verbindung zwischen den pF-Sonden und dem Substrat vorhanden ist.

Die Entwicklung der Bodenfeuchte an Sonden 3 und 4 in ***2,5 m Tiefe*** zeigt einen relativ synchronen Verlauf. Jedoch ist der große Feuchteunterschied der beiden Sonden klar erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass Sonde 3 in einer eher stark sandigen und Sonde 4 in einer eher stark schluffigen Umgebung verbaut ist, welche das Bodenwasser länger halten kann. Der Abstand der beiden Sonden zueinander beträgt etwa 2,5 m. Dies zeigt nochmals deutlich die starke Inhomogenität des Kippenmaterials.

Sonde 3 zeigte im Gegensatz zu Sonde 4 einen starken Anstieg der Bodenfeuchte Mitte Februar bis 26 % und ein nachträglich langsames Absinken der Bodenfeuchte. Während des Versickerungsversuchs kam es aufgrund der Lage des Versickerungsrings nur an Sonde 4 zu einem Anstieg der Bodenfeuchte. Zum Jahresende betrug die Bodenfeuchte an Sonde 3 etwa 14 % und an Sonde 4 etwa 25 %. Die pF-Werte der Sonden 3 und 4 wiesen eine gute Übereinstimmung mit der Entwicklung Bodenfeuchte auf. Die pF-Werte lagen Ende des Jahres an beiden Sonden bei etwa 1,6. Der Boden ist somit in 2,5 m Tiefe noch sehr feucht gewesen.

Am ***Standort 3*** (GWM 7645) entwickelte sich die Bodenfeuchte in ***1 m Tiefe*** an Sonde 1 und 2 sehr gleichförmig (s. ***Abb. 4-6***). Jedoch ist auch hier ein deutlicher Unterschied der Bodenfeuchte erkennbar. Sonde 1 scheint sich hierbei in einem eher schluffigen und Sonde 2 in einem eher sandigen Material zu befinden. Der Bodenfeuchte-Unterschied betrug Ende 2019 etwa 7 %. Wie auch an allen anderen Standorten ist auch hier ein Anstieg der Bodenfeuchte zu Beginn des Jahres 2020 erkennbar. Bis Anfang Mai 2020 sank die Bodenfeuchte wieder ab. Während der Versickerungsversuche konnten beiden Sonden angesprochen werden. Die Abtrockungsphase ging anschließend an Sonde 1 langsamer vonstatten, als an Sonde 2, was typisch für einen eher schluffigen Boden ist, der langsamer abtrocknet als ein sandiger Boden. Ende 2020 betrug die Bodenfeuchte an Sonde 1 ca. 22 % und an Sonde 2 14,4%. Auch hier wiesen die pF-Werte der Sonden 1 und 2 eine gute Übereinstimmung mit der Entwicklung Bodenfeuchte auf. Die pF-Sonde 1 zeigt ab Mitte Juli keine Werte mehr. An Sonde 2 betrug der pF-Wert Ende des Jahres etwa 3,2.

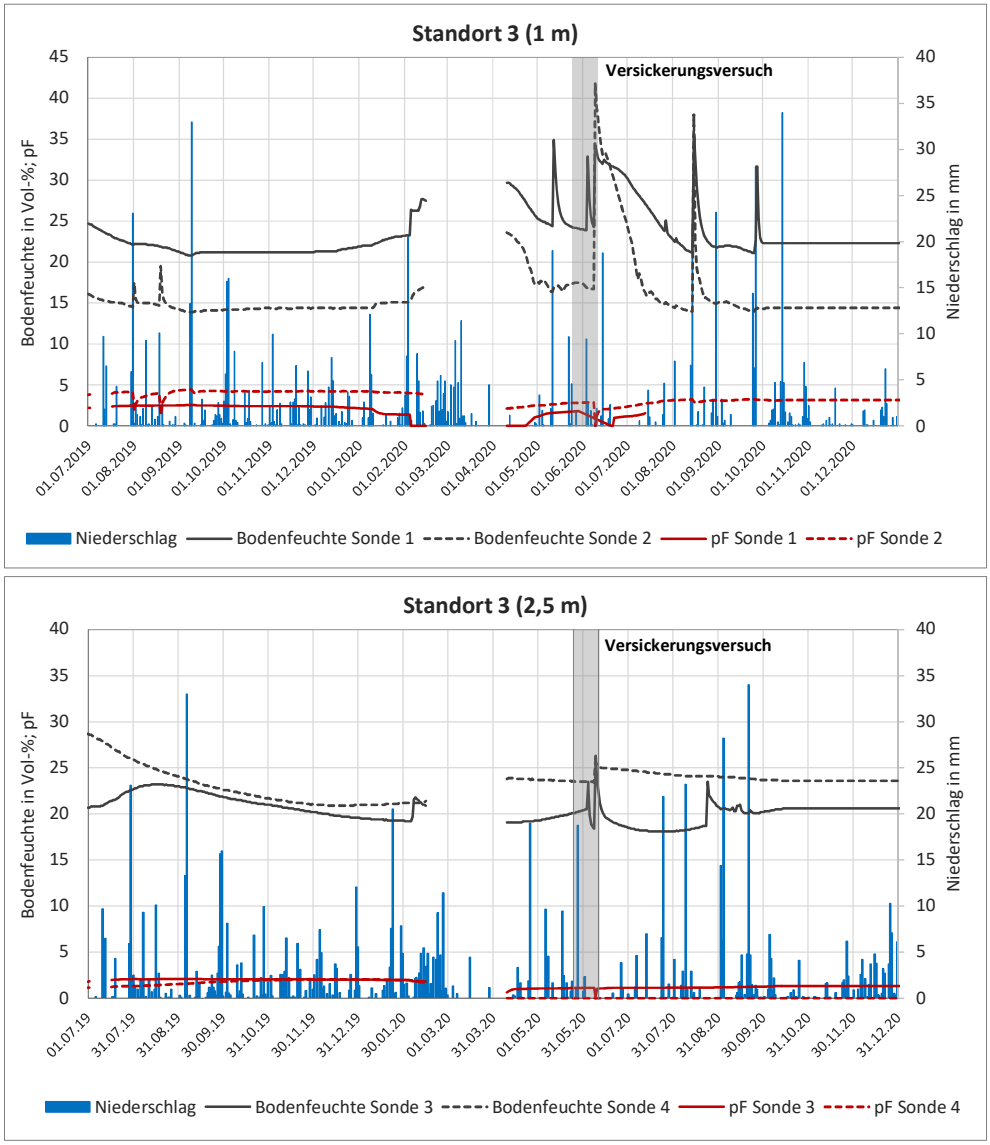

Abb. 4-6 Entwicklung der Bodenfeuchte und der pF-Werte am Standort 3 in 1m und 2,5 m Tiefe

Die Bodenfeuchte in ***2,5 m Tiefe*** am Standort 3 wies ab August 2019 eine annähernd gleiche Entwicklung auf. Ein Anstieg der Bodenfeuchte war vor dem Datenverlust noch nicht erkennbar. Während des Versickerungsversuches stieg die Bodenfeuchte in den Sonden 3 und 4 an, wobei an Sonde 3 anschließend ein rascher Rückgang der Bodenfeuchte erkennbar ist. Hingegen ging der Rückgang der Bodenfeuchte an Sonde 4, welche während des Versuchs nur leicht angestiegen war, sehr langsam vonstatten. Zum Jahresende betrug die Bodenfeuchte an Sonde 3 etwa 21 % und an Sonde 4 etwa 23,6 %. Die Entwicklung der zugehörigen pF-Werte zeigte auch hier eine gute Übereinstimmung. Nur an Sonde 4 ist seit April 2020 der pF-Wert Null. Das würde bedeuten, dass am Messpunkt noch immer Vollsättigung herrscht. Dies ist nicht plausibel. Zu erwarten wäre ein pF-Wert zwischen 1 und 2. Es bleibt abzuwarten, ob mit zunehmender Abtrocknung des Bodens der pF-Wert wieder ansteigt.

5 Laufendhaltung der Modelle

5.1 1D-Wasserhaushaltsmodell

Für das Wasserhaushaltsmodell auf der Basis des Programms ***HYDRUS-1D*** wurde das Strukturmodell zuletzt 2013 präzisiert. Im Jahr 2016 erfolgte eine Neukalibrierung der Hydrus-Modelle für die Lysimeter 14/2 und 14/4 für den Zeitraum 01/2012 bis 12/2015. Hierbei wurde auch der Fruchtfolgewechsel im Jahr 2013 berücksichtigt. In den Folgejahren 2017, 2018 und 2019 erfolgte dann eine Überprüfung der Vorjahres-Messwerte und Anpassung des Wasserhaushaltsmodells.

Das Ergebnis der gemessenen und berechneten kumulativen Sickerwassermengen für die Lysimeter 14/2 und 14/4 zeigt ***Abb. 5-1*** und ***Abb. 5-2***.

Es konnte wiederholt eine gute Abbildung der Sickerwassermengen für das Lysimeter 14/2 erzielt werden. (s. ***Abb. 5-1***). Lediglich das Umbruchjahr 2013 wird modelltechnisch über- und das Jahr 2017 sowie das Jahr 2020 unterschätzt.

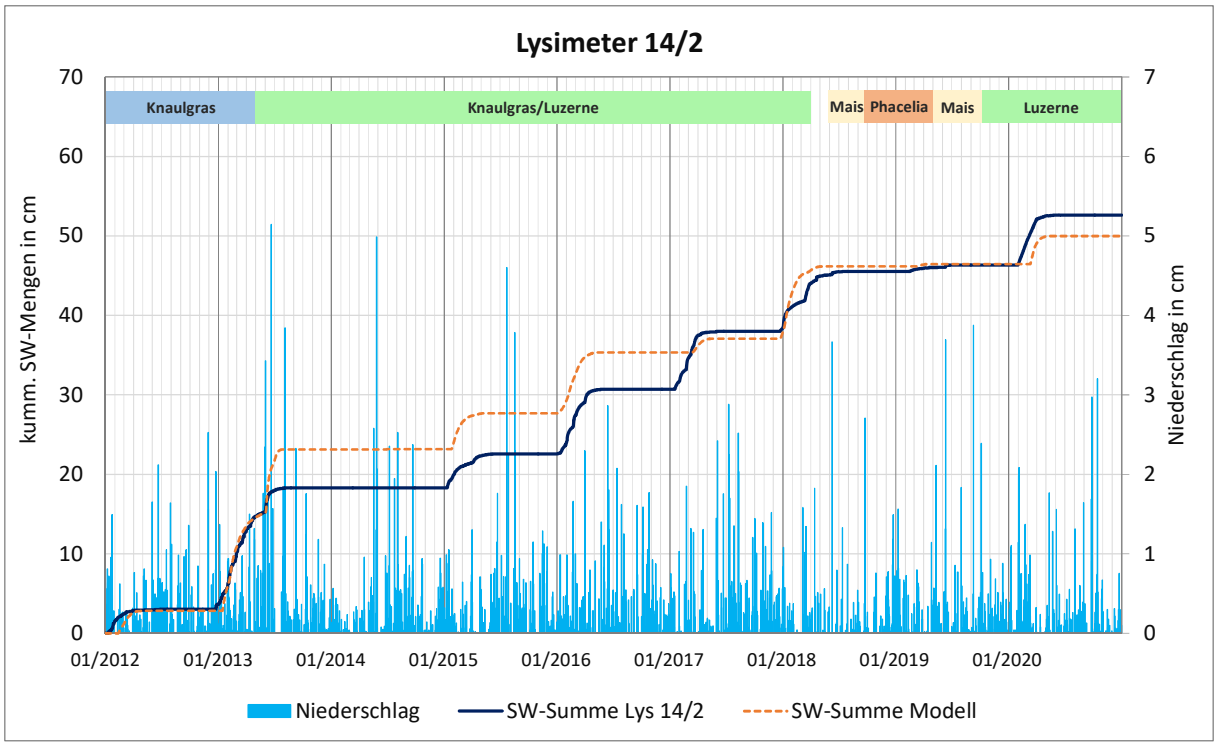

Abb. 5-1 Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen kumulierten Sickerwassermengen für das Knaulgras bzw. Knaulgras/Luzerne-Lysimeter 14/2 sowie der korrigierte Niederschlag (Tageswert Station Brandis)

Eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Sickerwassermengen weist auch weiterhin das kalibrierte Modell für das Lysimeter 14/4 auf (s. ***Abb. 5-2***). Die berechneten SW-Mengen zu Beginn des Jahres 2017 unterschätzen die gemessenen SW-Mengen.

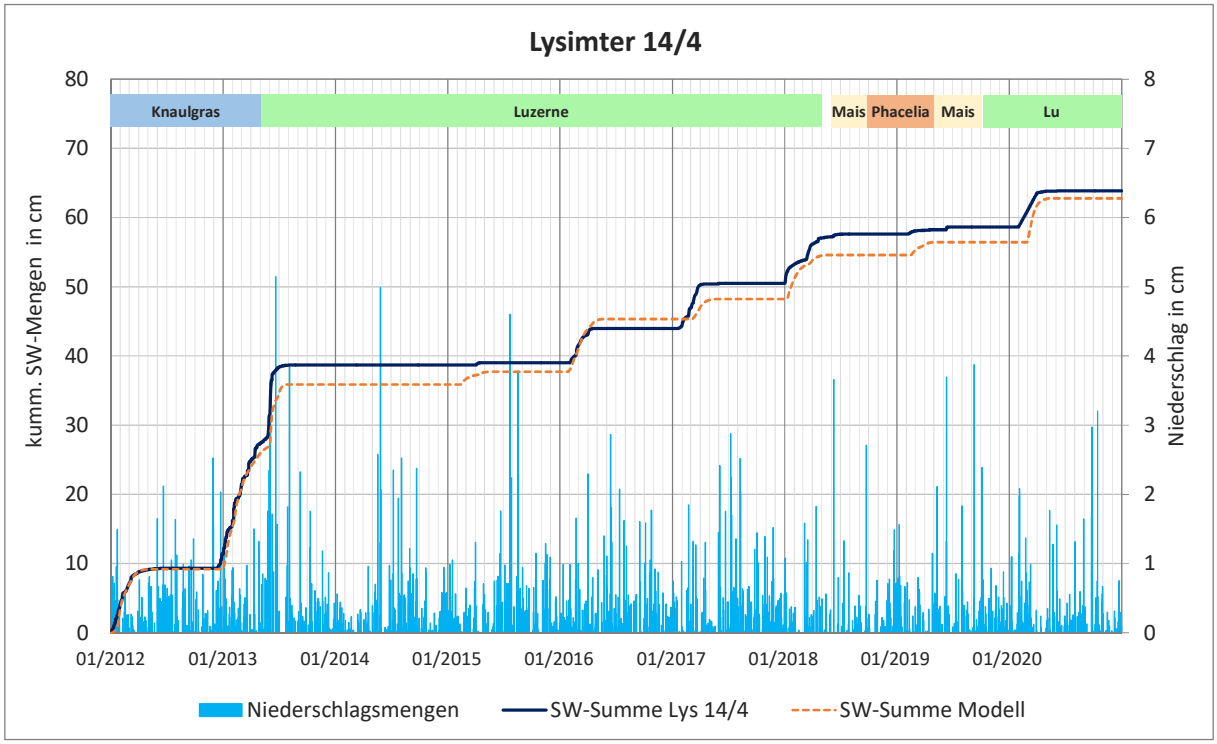

Abb. 5-2 Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen kumulierten Sickerwassermengen für das Knaulgras bzw. Luzerne-Lysimeter 14/4 sowie der korrigierte Niederschlag (Tageswert Station Brandis)

5.2 Aufbau des 2D-Modells Witznitz

Nach Errichtung des Sondermessprofils wurde Ende 2019 ein 2D-Bodenwasserhaushaltsmodell erstellt und vorkalibriert. Seither wird das Modell anhand der Messdaten kontinuierlich verifiziert. Der bisherige Kalibrierungszeitraum umfasst etwa 1 Jahr vom 22.05.2019 bis 15.05.2020. Die für die Kalibrierung erforderlichen Messwerte stammen aus dem Sondermessprofil (s. Abb. 4-1), welches im Zeitraum 08.04. bis 22.05.2019 auf der Kippe Witznitz errichtet wurden. Hierfür wurden an drei Sondermessstellen jeweils vier Bodenfeuchte- und pF-Sensoren (2x 1,0 m Tiefe und 2x 2,5 m Tiefe) sowie eine Pegelsonde installiert. Die Messwerte nach der Installation bis zum 07.07.2019 werden für die Kalibrierung nicht verwendet, da die Sonden eine gewisse Einfahrzeit benötigen. Des Weiteren gab es anfänglich noch ein paar technische Probleme (Sondenausfall).

Für die Modellierung der Sickerwasserströmung in der ungesättigten Bodenzone wird das Programmsystem HYDRUS 2D/3D Version 3.02.053 verwendet.

Das Programm HYDRUS ist ein physikalisches Modell [7], das basierend auf der Methodik der Finiten Elemente

- die gesättigte Strömung nach der DARCY-Gleichung und
- die ungesättigte Strömung nach der RICHARDS-Gleichung

berechnet.

Die Schwerpunkte für die weiterführende Modellierung ergeben sich wie folgt:

(1) Berechnung und Optimierung (Kalibrierung) der berechneten Sickerwassermengen in der Kippe,
(2) Ertüchtigung und Weiterentwicklung des Modelles als Prognosewerkzeug mit Hilfe der gemessenen Daten aus dem Sondermonitorings Kippe Witznitz und
(3) konkrete Einschätzung der Grundwasserneubildung in der Kippe Witznitz als wichtige Eingangsgröße für das Grundwasserströmungsmodell.

5.2.1 Konzeptionelles Modell

Entsprechend der hydrogeologischen und hydrologischen Standortbedingungen ist zur Umsetzung der Aufgabenstellung die Bildung von Schichtwasser und dessen Versickerung in den Untergrund der Kippe des ehemaligen Tagebaus Witznitz zu beschreiben und zu berechnen.

Dafür werden im Modell

- die Bildung von Sickerwasser Q_{sw} in Abhängigkeit der zeitvariablen und klimatischen Randbedingungen (potentielle Verdunstung E_P, Transpiration T_P und korrigierter Niederschlag N_{korr}),
- der Austausch von Sickerwasser mit dem anstehenden Grundwasserleiter und
- die Wirkung der geplanten Fruchtfolge auf die Sickerwasser- bzw. GW-Neubildung

berechnet und dargestellt. Das konzeptionelle Modell der Bodenwasserdynamik ist in ***Abb. 5-3*** dargestellt.

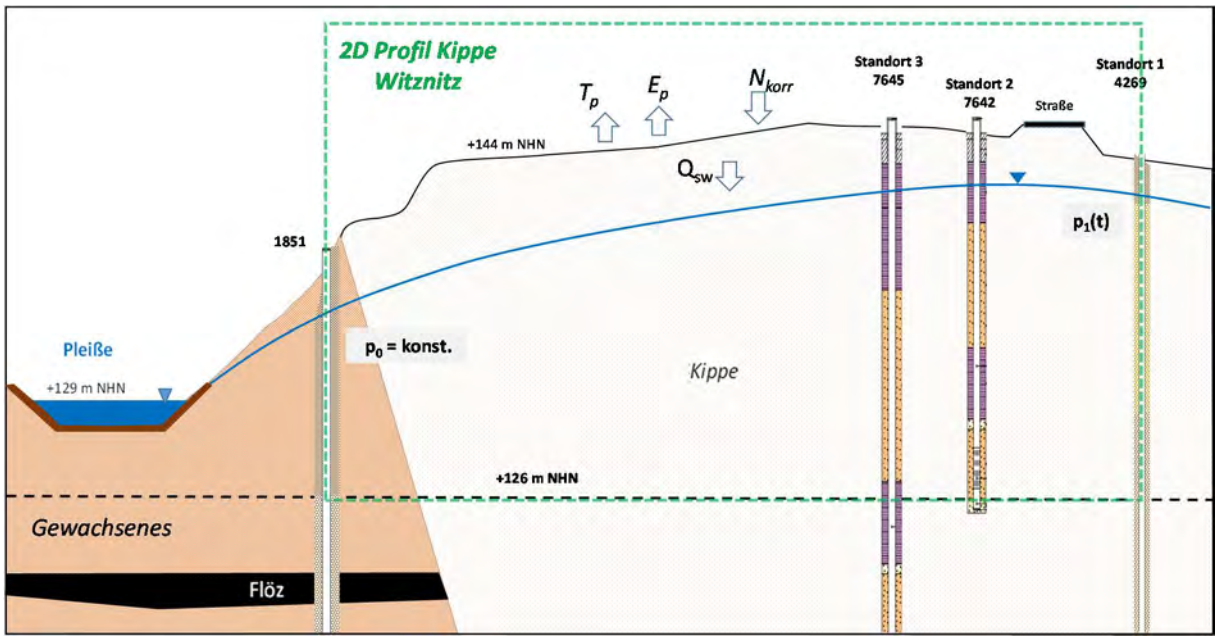

Abb. 5-3 Konzeptionelles 2D-Modell der Kippe Witznitz

Das 2D-Modellprofil verläuft von Nordost (GWM 4269) nach Südwest (GWM 1851). In diesem Profil befinden sich oben auf der Kippenfläche die drei ***Sondermessstellen*** an ***Standort 1***

(GWM 4269), ***Standort 2*** (GWM 7642) sowie ***Standort 3*** (GWM 7645) und eine pleißenahe GWM 1851, welche auf dem gewachsenen Streifen zwischen Kippe und Pleiße liegt (s. Abb. 4-4).

Die vertikale Ausdehnung des Modelles umfasst die Geländeoberfläche und eine Referenzebene +126 m NHN, die etwa 3 m unter der Pleißesohle liegt.

Die Sondermessstellen befinden sich auf der GW-Hochlage. Für den GW-Volumenstrom und den damit verbundenen potenziellen Massentransport von Eisen und Säure zur Pleiße ist der GW-Potenzialgradient, ausgehend von der GW-Hochlage zur Pleiße als treibende Kraft, bestimmend.

5.2.2 Modellaufbau

Diskretisierung

Die Geländehöhen für das 2D-Profil wurden aus dem digitalen Geländemodell DGM 16 m bezogen und im Netz-Generator des Modells als absolute Höhenwerte eingebaut. Eine horizontale Referenzebene +126 m NHN wurde auch definiert. Das 2D-Profil hat die folgenden Maße:

Länge von 879 m und
variable Teufe von 14 - 19 m.

Die räumliche Diskretisierung sollte dort, wo große hydraulische Gradienten zu erwarten sind (Nähe Bodenoberfläche) dichter sein. Im oberflächennahen Bereich bewirken meteorologische und pflanzenphysiologische Randbedingungen schnelle Änderungen des Bodenwassergehalts und der Potentialhöhen.

An der Modellunterkante ist der Abstand zwischen zwei Knoten etwa 5 m (s. ***Abb. 5-4***).

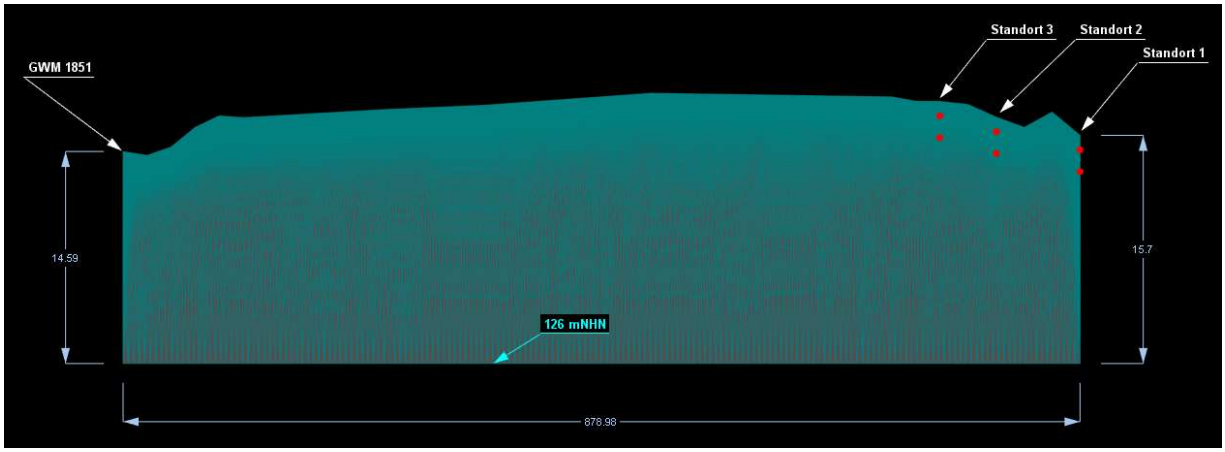

Abb. 5-4 Diskretisierung und Lage der Überwachungspunkte (rot), Maße in Meter

Die sechs Beobachtungspunkte hinsichtlich der Parameter Bodenfeuchte und Saugspannung aus dem Sondermessprofil wurden im Modell in 1 m und 2,5 m Tiefe definiert. Es wird davon

ausgegangen, dass das Sickerwasser, was in 2,5 m Tiefe über die Bodenfeuchte erfasst wird, dem GW-Speicher als GW-Neubildung zugeht.

Belegung der Angangs- und Randbedingungen

Als Randbedingungen des Bodenwasserhaushaltsmodells wurden an der Oberkante des 2D-Modells Atmosphärenrandbedingungen, am rechten Rand (Standort 1) die variierende Grundwasserstandshöhe als zeitabhängige Druckhöhe und am linken Rand (GWM 1851) eine konstante Druckhöhe (durchschnittliche Grundwasserhöhe vom 129 m NHN) festgelegt (s. ***Abb. 5-5***).

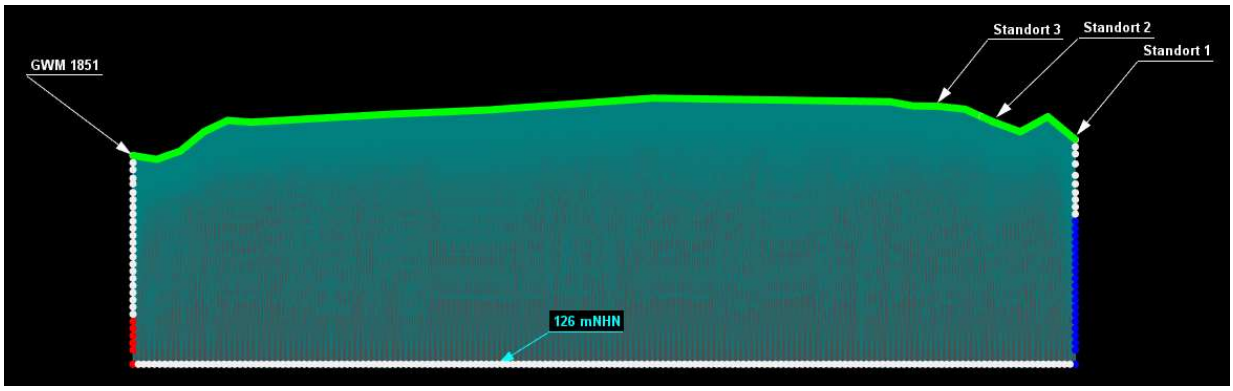

Abb. 5-5 Darstellung der Randbedingungen des Strömungsmodells (hellgrün: RB Atmosphäre; blau: RB zeitabhängige Druckhöhe; rot: konstante Druckhöhe; weiß: keine Flüsse)

Die Kalibrierung des Strömungsmodells erfolgte unter instationären Randbedingungen anhand der Messdaten aus dem Sondermessprofil im Zeitraum 22.05.2019 bis 15.05.2020[1] (s. ***Abb. 5-6***). Die Wetterdaten weisen eine deutliche negative Wasserbilanz in Höhe von ca. 100 mm auf, wobei die Entwicklung der GW-Stände in diesem Zeitraum eine deutlich abnehmende Tendenz aufzeigt.

Die zeitabhängigen Randbedingungen wurden als Tageswerte vorgegeben. Am rechten Modellrand wurden die zeitvariablen Grundwasserstandshöhen der GWM 4269 angegeben.

Als klimatische Randbedingungen wurden Tageswerte des korrigierten Niederschlags, der potentiellen Evaporation und der potentiellen Transpiration der Vegetation bzw. Luzerne verwendet. Die korrigierten Niederschläge als auch die potentielle Evapotranspiration als Grasreferenzverdunstung, die mittels der Näherungsformel nach Turc-Wendling aus den klimatischen Daten und der geodätischen Höhe berechnet wurde, stammen von der Lysimeterstation Witznitz (BfUL). Ab August 2020 stehen keine Daten der Station Witznizt mehr zur Verfügung (s. Kap. 3.6). Die notwendigen Eingangsdaten stammen ab 08/2020 von der Lysimeterstation Brandis und von den Niederschlagsstationen SP Rötha und SP Witznitz.

[1] Die Versickerungsversuche Ende Mai / Anfang Juni beeinflussen die Messwerte bis etwa September. Die Kalibrierung für den Zeitraum Oktober 2020 bis April 2021 erfolgt im Vorfeld der 2021 anstehenden Prognose.

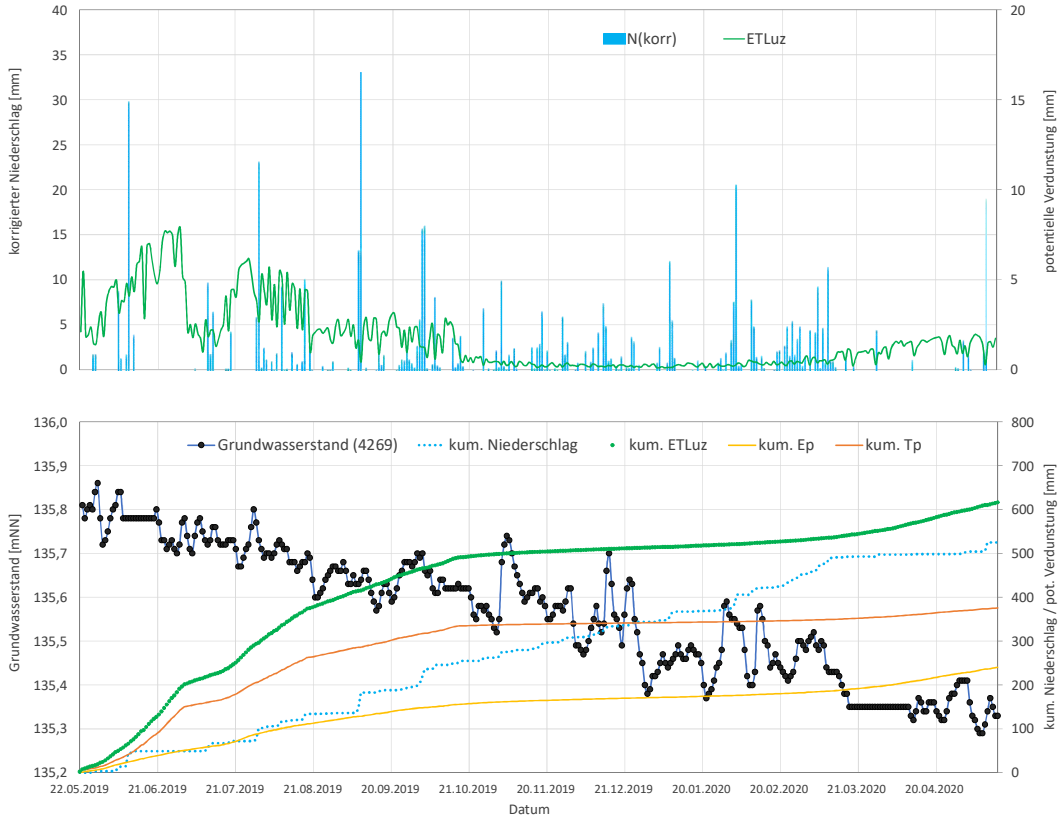

Abb. 5-6 Klimatische und hydraulische Eingangsdaten in dem Zeitraum 22.5.2019 bis 15.05.2020

HYDRUS bietet die Möglichkeit die bestandsabhängige reale Evapotranspiration in geschlossener Form nach PENMAN-MONTEITH zu berechnen. Dazu werden alle Klimadaten und pflanzenphysiologische Größen direkt in das Programm eingegeben, welches damit alle relevanten Prozesse erfasst. Mit einer größeren Zahl von sogenannten bestandsabhängigen Koeffizienten ist eine Bewertung von einzelnen Wasserhaushaltskomponenten und damit die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse relativ schwierig.

Deshalb wurde ein Rechenweg gewählt, in dem die einzelnen Wasserhaushaltskomponenten getrennt ausgewiesen und berechnet werden und somit auch besser auf Plausibilität geprüft werden können:

- Berechnung der Gras-Referenzverdunstung als potenzielle Evapotranspiration ET_0,
- Erfassung der bestandsabhängigen potentiellen Evapotranspiration der bestehenden Vegetation durch Multiplikation von ET_0 mit einem Bestandsfaktor f [2] und bzw. [15],
- Berechnung des Interzeptionsanteils aus den korrigierten Niederschlägen
- Trennung der potentiellen Evaporation und der potentiellen Transpiration
- Berechnung des saugspannungsabhängigen Bodenwasserentzuges durch die Pflanzenwurzeln entsprechend dem in HYDRUS implementierten Verfahren von FEDDES [6].

Der Bestandsfaktor f erfasst die erhöhte Evapotranspiration ET_a von konkreten Kulturen gegenüber dem Referenzgras:

$$ET_a = f \cdot ET_0$$

Die Datenreihe der Wuchshöhen wurde aus Feldmessungen erzeugt und der relevante Blattflächenindex (LAI) sowie die Albedo-Werte wurden in Anlehnung an das 1D-Modell für Luzerne definiert.

ET_{Luz} für das Modell resultiert aus der ET_a nach der Berücksichtigung der Interzeptionsverdunstung aus dem Interzeptionsspeicher, der sich an der Pflanzenoberfläche nach einem Niederschlagsereignis bildet. Die Interzeptionsverdunstung erfolgt unabhängig von der Transpiration durch die Pflanze.

In der ***Tab. 5-1*** ist als Beispiel der Jahresgang der Interzeption in Prozent vom korrigierten Niederschlag für 12 cm hohes Gras mit einem Jahresdurchschnitt von ca. 10 % angegeben. Für höheres Gras oder andere Kulturen mit einer hohen Blattfläche kann die Interzeption in Abhängigkeit von der Art der Niederschläge bis auf 30 % bis 40 % ansteigen.

Tab. 5-1 Jahrgang der Interzeption in Prozent von N_{korr}

Monat	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
Interzeption %	3	4	6	11	15	17	16	14	11	9	6	4

Die Aufteilung der potentiellen Transpiration T_p und der potentiellen Evaporation E_p erfolgte nach RITCHIE [5] und basierte auf dem Anteil der einfallenden Strahlung, die nicht von der Vegetation „Luzerne“ abgefangen wurde.

Die Oberflächenbedeckungsfraktion *SCF* errechnet sich nach RITCHIE wie folgt:

$$SCF = e^{-k \cdot LAI}$$

$$T_P = ET_{Luz} \cdot SCF$$

$$N_P = ET_{Luz} \cdot (1-SCF)$$

k ist hierbei der Extinktionskoeffizient nach RITCHIE [5] und wurde mit 0,398 angenommen.

Um die Anfangsbedingungen im Modell zu erhalten, erfolgte ein Modellvorlauf für die ersten 30 Tage des Überwachungszeitraums. Die Eingangsdaten der Bodenwasserdruckhöhen [m] stammen von den pF-Sensoren und den Pegel-Sonden des Sondermessprofils. Der Modellvorlauf ermöglicht eine gute Verteilung der anfänglichen Drückhöhen im Bodenprofil.

5.2.3 Durchführung der Modellkalibrierung

Eine Vorkalibrierung des 2D-Modelles wurde im Jahr 2019 durchgeführt und war aufgrund der hohen Heterogenität, welche die Substrate im Bearbeitungsgebiet aufwiesen und der geringen versickerungsführenden Regenereignisse, nur bedingt belastbar. Daraus ergab sich

die Notwendigkeit einer schrittweisen Verfeinerung der Kalibrierung mit Hilfe von In-situ Versickerungsversuchen. Der Kalibrierungszeitraum des 2D-Modells lag zwischen Errichtung des Sondermessprofils im Mai 2019 und Mai 2020 vor Beginn der Versickerungsversuche. Als Bewuchs wurde Luzerne in der Modellierung berücksichtigt.

5.2.3.1 Ermittlung der Startbodenparameter mit Hilfe der Versickerungsversuche

Zur Bestimmung der bodenhydraulischen Parameter wurde für die Auswertung der Versickerungsversuche ein Modell mit dem Programm HYDRUS-1D am Standort 1 [4269] aufgebaut. Diese Prozedur erfolgte mit Hilfe der inversen Modellierungstechnik und mit den Messdaten der Abtrocknungsphase.

Als Vorbereitung der Versickerungsversuche (s. Abschnitt 5) am Standort 1 wurde durch eine Rammkernsondierung das noch fehlende Bodenprofil detailliert aufgenommen. Anhand der vorhandenen Siebanalysen und Bodenprofile konnten drei Bodentypen (im Modell als Material bezeichnet) abgegrenzt werden (s. ***Tab. 5-2***). Die Startparameter für die Inverse Modellierung wurden mit Hilfe von Labor- und Literaturwerten definiert.

Tab. 5-2 Startbodentypen, Modellschichten und die ermittelte bodenhydraulische Parameter für den Standort 1 und Standort 3

Ausgangsboden-typen	toniger schluffiger Sand enthält Kies	schwach sandiger Lehm, schwach kiesig	Feinsand
Materialbezeichnung für inverse Modell.	M1	M2	M3
Modellprofil (Standort 1) [cm]	0-90	90-117	117-1000
Modellprofil (Standort 3) [cm]	0-50	50-140	140 -1000
ermittelte bodenhydraulische Parameter			
θ_r	0,078	0,12	0,057
θ_s	0,433	0,4	0,57
α [1/cm]	0,1	0,6	0,063
n	1,59	1,42	4,8
K_s oder K_v [m/s]	5,60E-05	1,04E-04	4,63E-05

θ_r residualer Bodenwassergehalt
θ_s maximaler Bodenwassergehalt bei komplette Sättigung
α entspricht dem Kehrwert des Matrixpotentials und ist abhängig von der Porengröße
n dimensionsloser Formparameter, der die Steilheit der pF-Kurve bestimmt
K_s gesättigte Wasserleitfähigkeit

Als Beobachtungspunkte wurden im Modell die Teufen der Sonden (1 m und 2,5 m) festgelegt. Es wird die Annahme getroffen, dass die Bodenfeuchte, welche in 2,5 m erfasst wird, das Grundwasser speist. Für die inverse Modellierung werden die gemessenen Werte der Saugspannung verwendet. Der Kalibrierungszeitraum der Abtrocknungsphase beginnt ab dem Tag des jeweiligen Versuchsendes und wird in Tagesschritten für 57 Tage abgebildet. Die hydraulischen Parameter der Materialschichten wurden schrittweise per „trial and error“ anhand der gemessenen Daten angepasst, sodass sich das optimal ermittelte Parameterset als beste Anpassung zwischen den gemessenen und berechneten pF-Werten bzw. den Bodenfeuchtewerten ergibt.

Für den Standort 3 (GWM 7645) wurde ein ähnlicher Aufbau des Modells verwendet wie am Standort 1. Die ermittelten Parameter wurden nicht verändert, da die Substrate ähnliche Eigenschaften besitzen sollten. Die Modellergebnisse zeigten am Standort 3 eine gute Anpassung zwischen gemessenen und modellierten Daten.

Tab. 5-2 fasst die angenommenen bodenhydraulischen Parameter für Standort 1 und 3 zusammen, welche anhand der Bodenprofile und Siebanalysen sowie nach der inversen 1D-Modellierung am Standort 1 ermittelt wurden.

5.2.3.2 2D-Strukturmodell

Der hydraulischen Modellierung im Untergrund ist ein geologisches Strukturmodell zugrunde gelegt und wurde anhand vorhandener geologischer Profile und relevanter Siebanalysen erarbeitet. Die Differenzierung der Gesteinseigenschaften in einzelne Modellschichten erfolgte vorwiegend anhand lithologischer Eigenschaften und orientierend am Verwitterungsgrad des Gesteins. Basierend auf dem zur Bestimmung der Bodenparameter erstellten 1D-Modell am Standort 1 wurde das geologische Modell vereinfacht in drei Materialschichten differenziert (s. ***Abb. 5-7***).

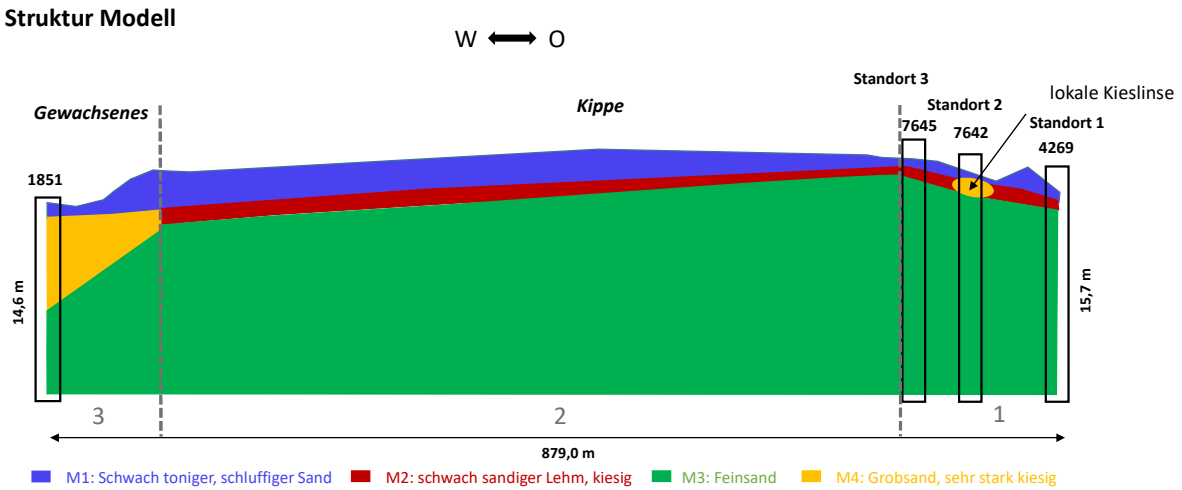

Abb. 5-7 schematische Darstellung das für die Kalibrierung verwendete geologische Strukturmodell

Zudem wurde eine Kieslinse im Profil am Standort 2 in der Tiefe zwischen 0,6 m und 1,4 m lokalisiert, welche es im Modell zu implementiert gilt.

Das geologische Profil der Messstelle [1851] am linken Rand des 2D-Modells, die im Gewachsenen liegt, weist einen höheren Anteil des groben Bodenmaterials zwischen 1 m und 8 m Tief auf. Eine lineare Interpolation zwischen Standort 3 [7645] und Messstelle [1851] wurde angenommen, da geologische Daten in dem Bereich nicht vorliegen.

Für den Aufbau des geologischen Strukturmodells erfolgte die Klassifizierung der Bodenarten nach KA5 [4]. Dazu wurden alle Siebanalysen der aus den Bohrungen gewonnenen Bodenproben am Standort 2 und 3 ausgewertet. Die Ergebnisse der Klassifizierung sind in ***Tab. 5-3*** dargestellt.

Tab. 5-3 allgemeine Beschreibung der Modellschichten des geologischen Strukturmodelles

Materialschicht	Kennzeichung	Kürzel
M1	Schwach toniger, schluffiger Sand	St/Su
M2	schwach sandiger Lehm, kiesig	Ls2/Uls
M3	Feinsand	mSfs
M4	Grobsand, sehr stark kiesig	gs

5.2.3.3 Implementierung der bodenhydraulischen Parameter im Modell

Die Parameterbelegung der vier Modellschichten erfolgte anhand der ermittelten Parameter aus den Versickerungsversuchen (s. ***Tab. 5-4***).

Für die Bodenwasserdynamik sind die horizontale K_h und die vertikale K_v Durchlässigkeit relevant. Die Parameter der Saugspannungs-Sättigungsfunktion (θ_r, θ_s, α, n) nehmen nur bei Teilsättigung bzw. bei negativer Druckhöhe Einfluss auf das Modellergebnis [7]. Als Anisotropie der Durchlässigkeit gem. [16, Gl. 1.47 a/b] ergab sich ein durchschnittlicher Werte von 0,1. Die K_h-Werte wurden anhand der lithologischen Eigenschaften der Schichten abgeschätzt. Als Startwert wurde $K_v/K_h = 0{,}1$ gesetzt. Für die Orientierung der horizontalen Durchlässigkeit wurde eine Neigung analog der Geländeoberkante mit 2,5°, 1° und 3,5° entsprechend der Bereiche 1, 2 und 3 im 2D-Profil (s. Abb. 5-7 grau gestrichelte vertikale Linien) angenommen.

Die hydraulischen Parameter des Modellmaterials 4 wurden mit typischen Werten für Kies nach Carsel u. Parrish (1998) [17] belegt und unverändert belassen.

Es erfolgte eine schrittweise Kalibrierung des Strömungsmodelles durch Anpassung der Anisotropie und durch den Vergleich der gemessenen und berechneten Bodenfeuchte und pF-Werte an den sechs implementierten Überwachungspunkten(s. Abb. 5-4). Für die Anisotropie wurde ein einheitlicher Wert von $K_v/K_h = 0{,}08$ für Material 1 und 3 und $K_v/K_h = 0{,}03$ für

Material 4 und 2 verwendet. Möglicher Grund dafür ist der große Anteil von Kies im Material 2 und 4.

Die kalibrierten Bodenparameter für die Bodenmaterialien sind in der ***Tab. 5-4*** dargestellt.

Tab. 5-4 optimierte Parameter der Modellschichten

Boden hyd. Parameter	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
θ_r	0,078	0,12	0,057	0,012
θ_s	0,433	0,4	0,57	0,28
α [1/cm]	0,1	0,6	0,063	1,0
n	1,59	1,42	4,8	2,115
K_v [m/s]	5,60E-05	1,04E-04	4,63E-05	4.63E-04
K_v/K_h	0,08	0,03	0,08	0,03

5.2.4 Kalibrierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Modellkalibrierung wurden mit den Messwerten aus den Sondermessprofilen verglichen. Die folgenden Abbildungen zeigen die Kalibrierungsergebnisse an den drei Standorten des Sondermonitorings.

Am ***Standort 1*** (an der alten GW-Messstelle 4269), wo die Bodenparameter ursprünglich ermittelt wurden, zeigen die berechneten Kalibrierungsergebnissen an den obersten Beobachtungspunkten (1 m Tiefe) eine gute Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messwerten (vgl. ***Abb. 5-8***). Das Modell zeigt zudem eine gute Abbildung der Feuchtefront Ende des Jahres 2019. Darüber hinaus konnte das Modell das Durchlaufen der Feuchtefront im März 2020 an der tieflegenden Sonden (2,5 Tiefe) richtig simulieren.

Einen ähnlichen Verlauf wie bei Standort 1 zeigen die Modellergebnissen am ***Standort 3*** (GWM 7645). In beiden Beobachtungstiefen ist eine gute Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messwerten erkennbar (vgl. ***Abb. 5-10***). Lediglich die Bodenfeuchte (Theta) in Modellschicht 3 lässt sich nicht abbilden. Die Bodenfeuchte in Schicht 3 ist hierbei abhängig von der Entwicklung der Bodenfeuchte in Schicht 2 (Beobachtungspunkt 1 m).

Gegenüber ***Standort 1*** und ***Standort 3*** zeigen die beiden pF-Sonden in 1 m Tiefe am ***Standort 2*** (GWM 7642), welche in der lokalen Kieslinse sitzen, z. T. unplausible hohe pF-Werte (d. h. extreme Trockenheit) – s. Abb. 4-5 (in Abb. 5-9 nicht dargestellt). Es wird vermutet, dass nur eine schwache Verbindung zwischen den pF-Sonden und dem Substrat vorhanden ist. Somit konnte das Modell mit den aus der Literatur gewählten bodenhydraulischen Parametern für Kies die hohen pF-Werte nicht abbilden. Jedoch stimmen die berechneten Werte an den 2,5 m tiefen Beobachtungspunkten mit der ab Anfang Januar 2020 gemessenen Bodenfeuchte und den gemessenen pF-Werten gut überein (***Abb. 5-9)***.

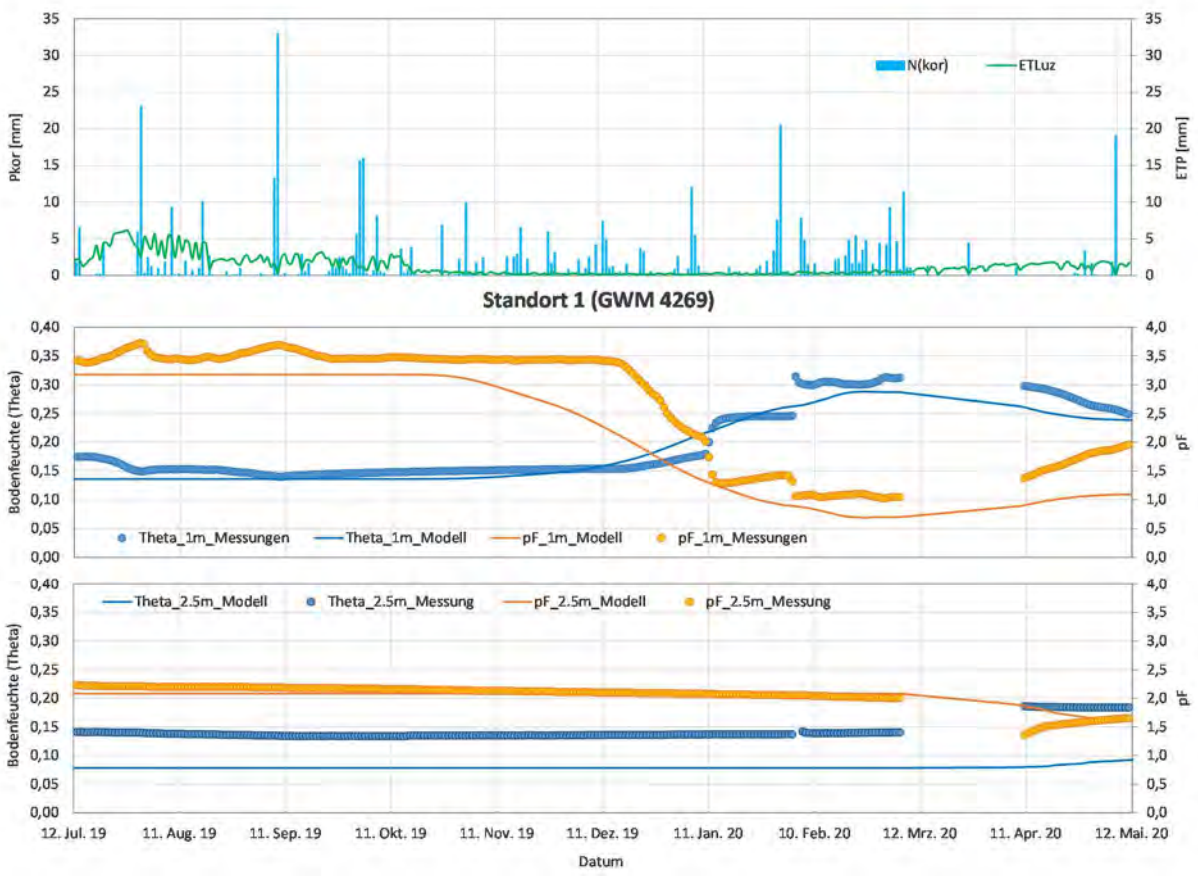

Abb. 5-8 Modell- und Messwerte der pF-Werte und Bodenfeuchte im Zeitraum zwischen 07/2019 und 05/2020 am Standort 1 (GWM 4269) in 1,0 und 2,5 m Tiefe sowie der korrigierte Tagesniederschlag und die potentielle Grasreferenzverdunstung der Lysimeterstation Witznitz

Zusammengefasst bildet das Modell mit den aus den Versickerungsversuchen ermittelten und angepassten Bodenparametern sowie der angepassten Anisotropie den langfristigen Trend des Sickerwasseranfalls korrekt ab.

Aufgrund der klimatischen Bedingungen seit Beginn der Messungen konnte bisher nur einmalig das Durchlaufen einer Feuchtefront beobachtet werden. Die Kalibrierung ist somit noch weiter zu präzisieren. Zudem ist eine längere Datenreihe erforderlich, insbesondere außerhalb der Vegetationsperiode.

Einige Bodenfeuchte-Sensoren weisen ein zu schnelles Signal bei starken Regenereignisse auf. Dies ist ggf. auf bevorzugte Sickerwege zurückzuführen. Daher wurden diese extremen Signale aus den zur Modellierung betrachteten Messungen getilgt.

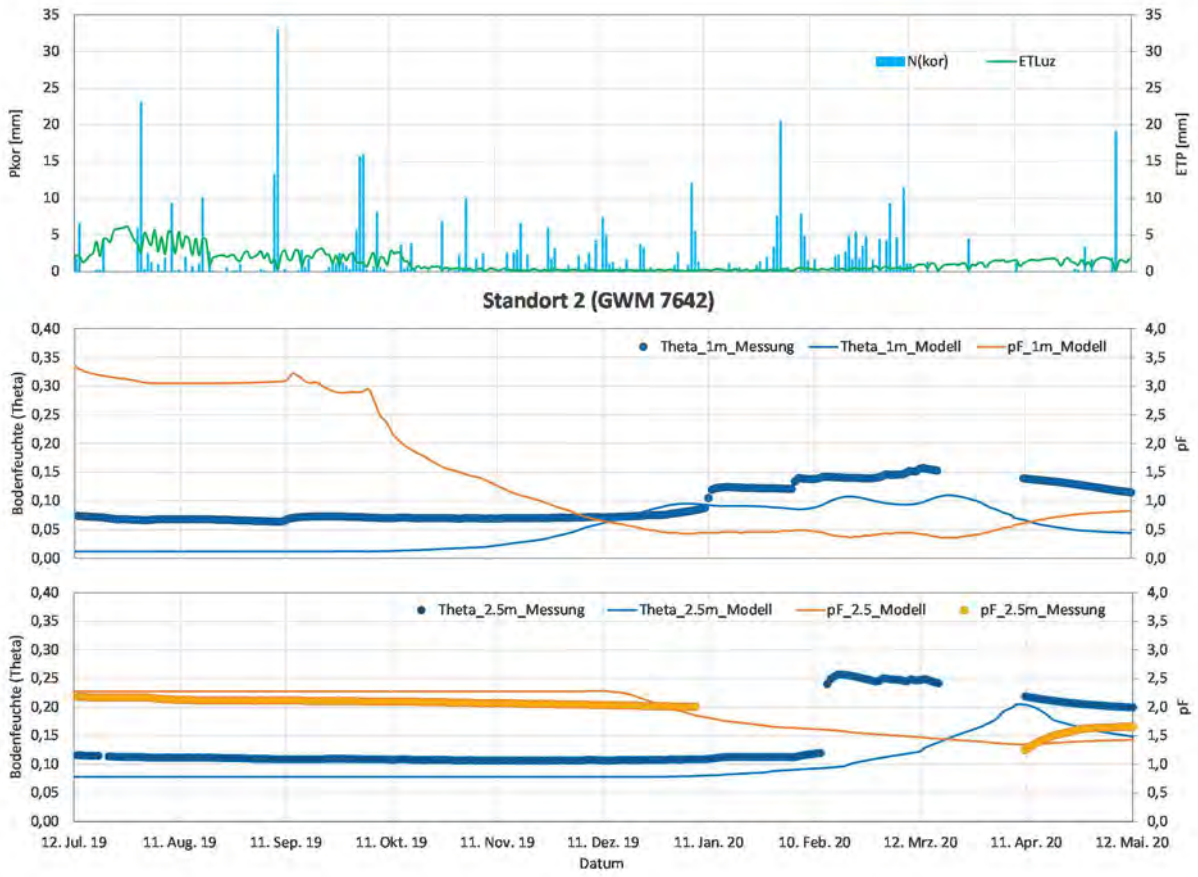

Abb. 5-9 Modell- und Messwerte der pF-Werte und Bodenfeuchte im Zeitraum zwischen 07/2019 und 05/2020 am Standort 2 (GWM 7642) in 1,0 und 2,5 m Tiefe sowie der korrigierte Tagesniederschlag und die potentielle Grasreferenzverdunstung der Lysimeterstation Witznitz

Abb. 5-10 Modell- und Messwerte der pF-Werte und Bodenfeuchte im Zeitraum zwischen 07/2019 und 05/2020 am Standort 3 (GWM 7645) in 1,0 und 2,5 m Tiefe sowie der korrigierte Tagesniederschlag und die potentielle Grasreferenzverdunstung der Lysimeterstation Witznitz

5.2.5 Diskussion und Ausblick

Die vorgenommene Feld- und Modellierungsstudie bestätigt, dass Kippenstandorte in der Untersuchung zu bodenhydraulischen Parametern einen besonderen Stellenwert einnehmen. Die hohe Heterogenität führt im Allgemeinen zu großen Unsicherheiten. Daher hängt die Qualität der 2021 anstehenden Prognose von der Qualität der Modellbodenparameter ab. Für den Aufbau des 2D-Wasserhaushaltsmodells und die Ermittlung der Sickerwassermengen wurde die Anisotropie der jeweiligen Schichten abgeschätzt und eingepflegt.

Die Feinkalibrierung erfolgte im 2020 anhand der Ergebnisse der Infiltrationsversuche. Hierbei konnten bereits gute Kalibrierungsergebnisse erreicht werden.

Die ermittelten Parameter für Material 1 kann einem schluffigen Sand zugeordnet werden und das weist somit einen ähnlichen Bodentyp der ersten Schicht im 1D- Modell auf (identisch mit dem Lysimeter 14/4; vgl. Jahresbericht 2015 [13]).

Vor allem aber können die Werte der Formparameter α und *n* in Kombination mit den anderen Parametern keinem genauen Bodentyp zugeordnet werden. Dieser Fakt lässt sich wieder auf den Standort Kippe zurückzuführen. Das aufgekippte Material entwickelte noch keine ausreichende Bodenstruktur, welche einem Bodentyp entspricht. Der Anteil an Makroporen und Kiessteine [18] und die Heterogenität erschwerte die Bestimmung der Parameter und verlangt die genaue Berücksichtigung der Randbedingungen für die Auswertung.

Auffallend an den aus den Versickerungsversuchen ermittelten Bodenparametern ist, dass die Formparameter der hydraulischen Funktion keiner typisierten Bodenart, besonders für die versickerungswirksamen Bodenschicht Material 3 mit n = 4.8, zugeordnet werden können. Die ermittelte gesättigte Leitfähigkeit $K_v = 4{,}63 \cdot 10^{-5}$ m/s ist hingegen sehr plausibel für Kippenböden in diesem Gebiet. Eine Überprüfung von n ist deshalb im Weiteren vorgesehen.

Bei Material 2 und 3 wurden hohe n bzw. α Werte kalibriert. Neben der hohen Wasserleitfähigkeit sind die auffälligen Bodenparameter ein weiteres Indiz für die Besonderheiten des Kippensubstrates. Beispielweise sind hier der hohe gesättigte Wassergehalt von Material 3 oder der hohe residuale Wassergehalt von Material 2 zu nennen. Dennoch konnte mit Hilfe dieser Parameter für Standort 1 die Zeitreihe gut abgebildet werden.

Als anstehende Arbeiten im Jahr 2021 wird die Verbesserung der Kalibrierungsergebnisse durch eine Strukturmodellpräzisierung in Anlehnung an den IBGW Bericht 2009 [11] zur Ermittlung der geologischen Verhältnisse in der Kippe erfolgen.

Die Feinkalibrierung und die entsprechende Validierung der Modellergebnisse bedürfen besonders in 2,5 m Tiefe einer detaillierten Analyse und Plausibilitätsprüfung der Messwerte (Bodenfeuchte und pF-Werte). Dies konnte aufgrund der begrenzten Messwertreihe und insbesondere der klimatischen Bedingungen nur vorläufig erfolgen. Anhand der Messwertreihe von 10/2020 bis 04/2021 erfolgt eine weitere Anpassung des Modells. Im Anschluss daran erfolgen dann bis Ende 2021 die Prognosefortschreibung mit dem 2D-Modell und die Ausweisung der Sickerwassermengen für verschiedene Bewirtschaftungsszenarien.

5.3 Grundwassermodell

5.3.1 Fortschreibung

Im Rahmen „Ingenieurtechnischen Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch Bewirtschaftung von Kippenflächen“ erfolgte der Vergleich der Prognoserechnungen des geohydraulischen Modells HGMS mit Messwerten bestehender Pegel am Standort (Abb. 5-13und Abb. 5-14). Dies dient der Validierung der Prognoseergebnisse.

Die Pegel 7642 und 7645 wurden 2019 errichtet und mit Datenloggern zur Messwertaufzeichnung versehen. Für beide Pegel liegen erste Messwerte in viertelstündlicher Auflösung vor.

Grundlage für die Modellierung ist das etablierte Modell HGMS in der Version HGMS2017 (Version2020). Dieses beinhaltet die Klimareihe bis einschließlich 2019. Die erhobenen Messwerte wurden mit der Modellprognose verglichen, um die Anpassungsgüte des Modells zu bewerten und Aussagen über die Qualität der Prognosen treffen zu können.

Abb. 5-12 sowie ***Abb. 5-11*** (Ausschnitt) zeigen die Hydroisohypsen für die Jahrescheibe 2020. Diese wurden mit mittleren Grundwasserneubildungsverhältnissen berechnet. Grundsätzlich beschreibt das Modell HGMS2017 (Version2020) die geohydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet hinreichend gut. Auf der Hochlage werden die Grundwasserstände jedoch weiterhin überschätzt. Es bleibt abzuwarten, wie die Ergebnisse nach Einarbeitung der Klimadaten bis einschließlich 2020 ausfallen. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lag die Klimareihe bis Ende 2020 noch nicht vor und konnte daher auch nicht im Modell implementiert werden.

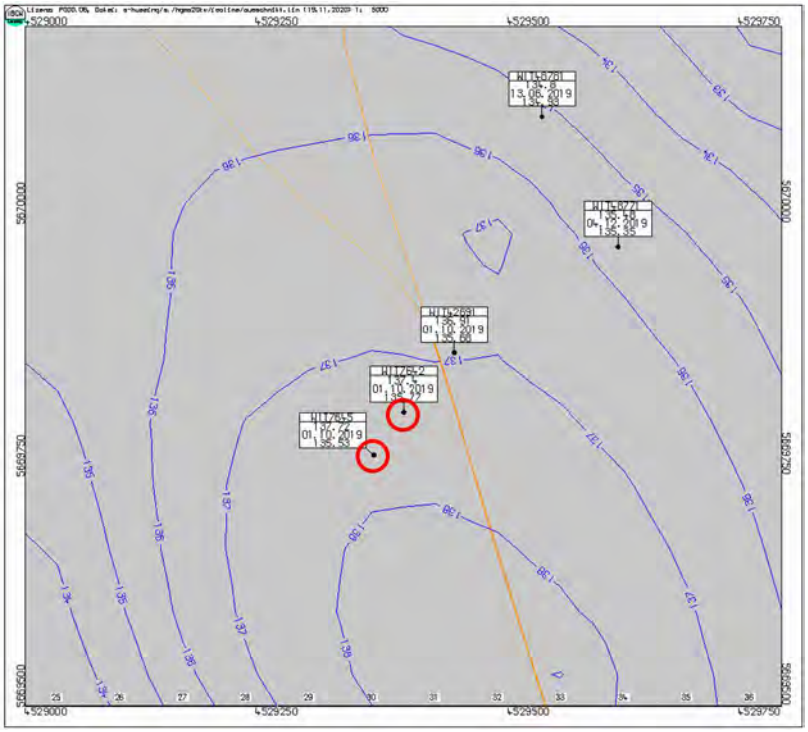

Abb. 5-11 Detaildarstellung, Berechneter Hydroisohypsenplan für die Jahresscheibe 2020 (1/2020), neu errichtete Pegel sind rot markiert

Um eine Präzisierung der Kalibrierung sowie der Prognoseergebnisse über die nunmehr über mehr als 3 Jahre anhaltende extreme Trockenperiode zu erreichen, ist eine Kalibrierung mit einer bis 2020 fortgeschriebenen Klimazeitreihe sinnvoll und empfehlenswert. Die Klimareihe kann jährlich fortgeschrieben werden, die nächste Fortschreibung berücksichtigt dann die Daten für 2020. Eine belastbare Aussage zur Güte der Modellprognosen lässt sich erst nach einer weiteren Fortschreibung der Messreihen und einer Festlegung, welche langjährige Klimareihe für die Ermittlung eines repräsentativen Mittelwertes für den Prognosezeitraum verwendet werden soll, treffen.

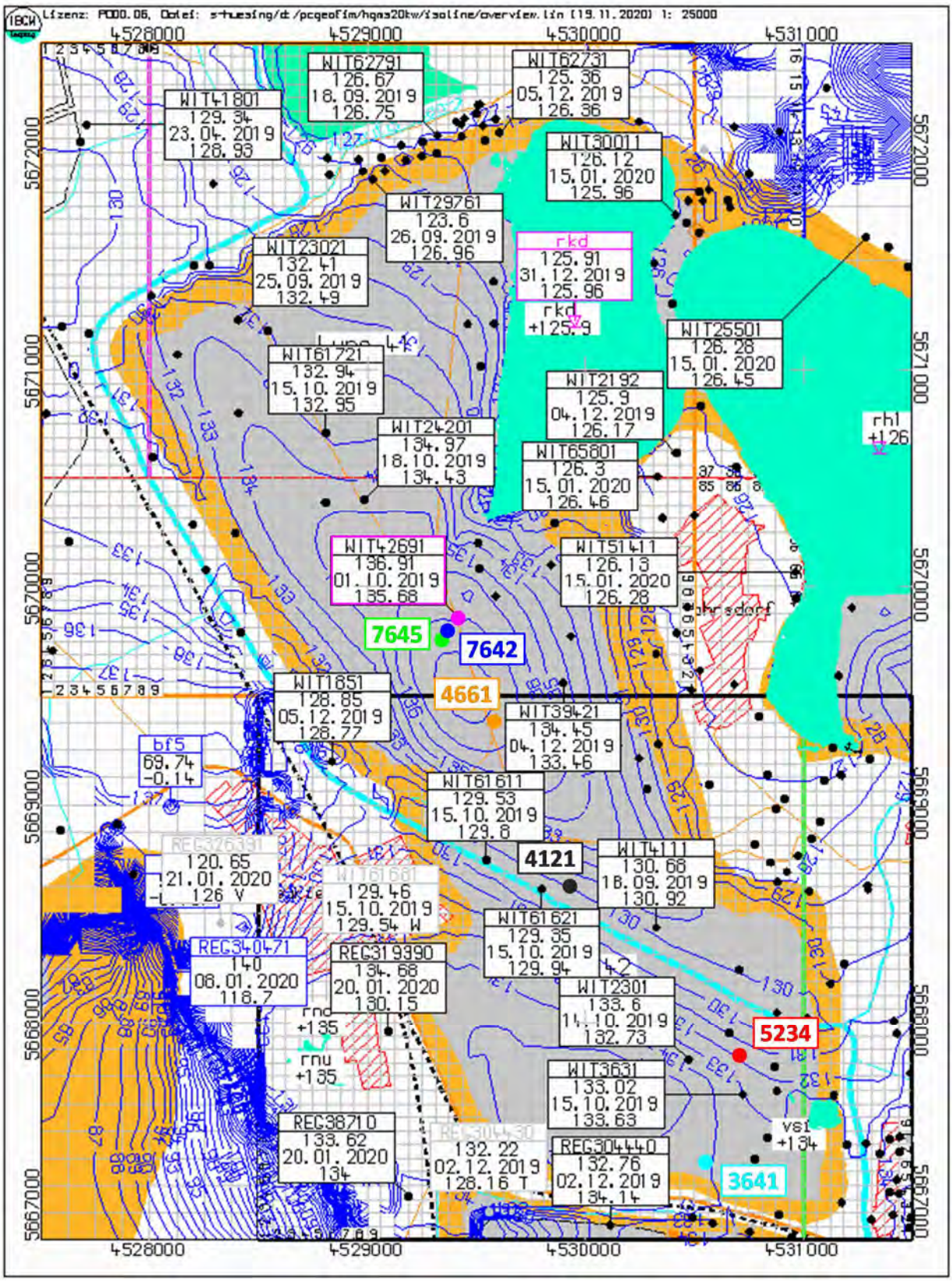

Abb. 5-12 Berechneter Hydroisohypsenplan für die Jahresscheibe 2019 (1/2019) mit neu errichteten Pegeln 7642 und 7645 (farblich markierte Messstellen: s. Abb. 5-13 und Abb. 5-14)

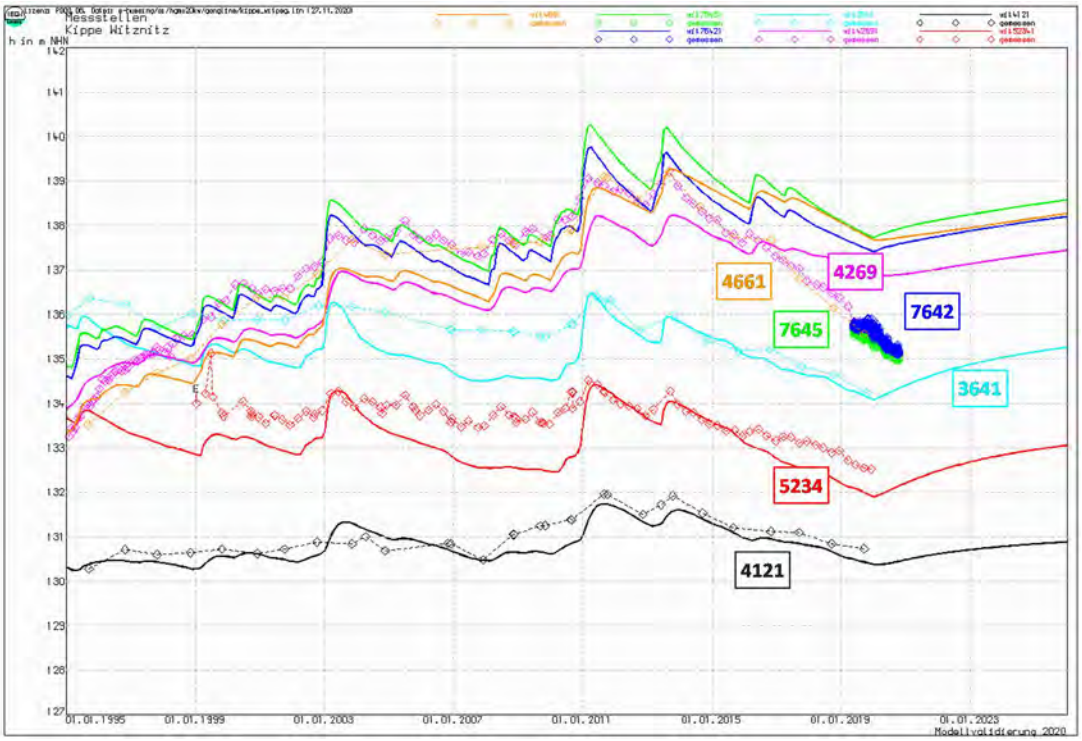

Abb. 5-13 Ganglinien ausgewählter Grundwassermessstellen im Kippengebiet Witznitz; 3641 und 5234 im Südanstrom zur Pleiße, 4661 und 4121 im Nordanstrom zur Pleiße, 7642, 7645 und 4269 auf der Kippe während des Kalibrierungszeitraums

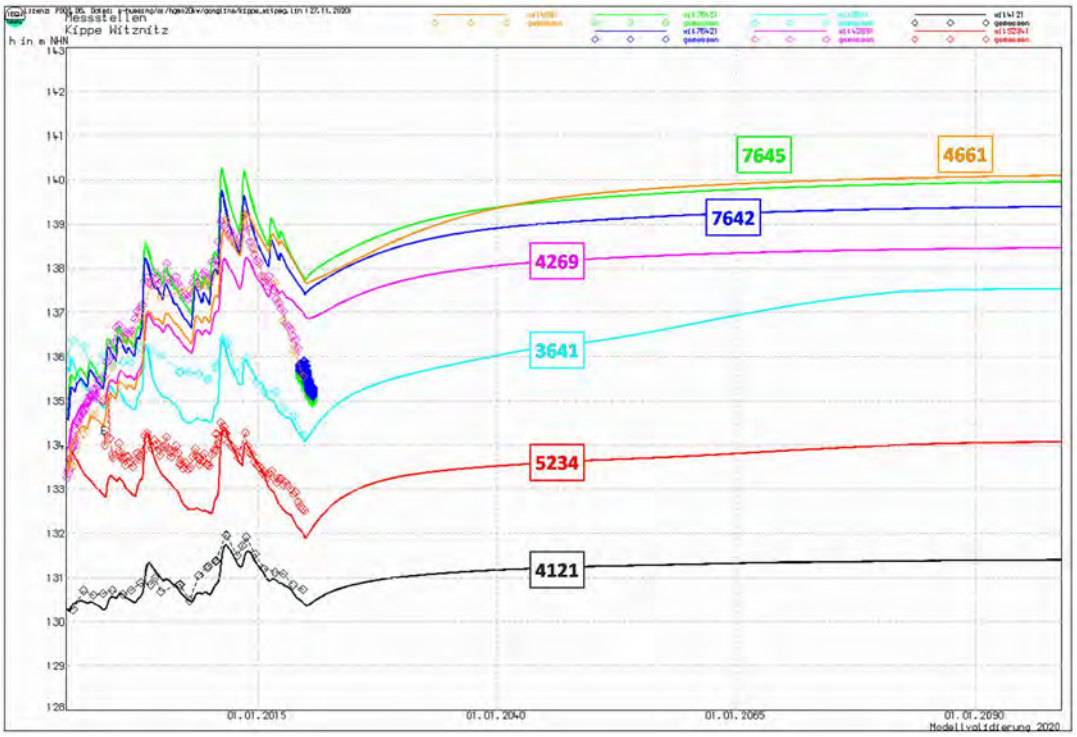

Abb. 5-14 Ganglinien ausgewählter Grundwassermessstellen im Kippengebiet Witznitz; 3641 und 5234 im Südanstrom zur Pleiße, 4661 und 4121 im Nordanstrom zur Pleiße, 7642, 7645 und 4269 auf der Kippe; Kalibrierungs- und Prognosezeitraum bis zur Einstellung stationärer Strömungsverhältnisse

5.3.2 Analyse der Einflüsse Klima und Landnutzung auf die GW-Ganglinien („Ganglinienseparation“)

Im Folgenden wird beispielhaft anhand von zwei GW-Ganglinien die Wirksamkeit der Bewirtschaftung auf die GWN-Reduzierung auf der Kippe Witznitz vor dem Hintergrund aktueller Klimaentwicklungen untersucht.

Zwei Fragen sollte nachgegangen werden:

- Ist ein Effekt der GWN-Reduzierung durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung erkennbar?
- Ist dieser auf die erhöhte Verdunstungsleistung auf den Bewuchs mit z. B. Luzerne zurückzuführen?

Die untersuchten Ganglinien beziehen sich dabei auf die GW-Messstellen 42691 sowie 52341. Erstere befindet sich auf der Kippe auf einer Fläche mit Luzerne-Bewirtschaftung, die zweite im Bereich der Kippe Neukieritzsch auf einer Fläche ohne gezielte Bewirtschaftung (s. ***Abb. 5-15***), aber mit Waldbewuchs.

In ***Abb. 5-16*** ist für beide Messstellen ein negativer Trend in den GW-Ständen erkennbar. Betrachtet man die Ganglinie des südlichen Pegels 52341 normiert auf 42691 (Startwert der Reihe verschoben auf das Niveau von 42691), wird deutlich, dass die Messwerte rechnerisch bei gezielter Bewirtschaftung einen stärkeren negativen Trend aufweisen als ohne gezielte Bewirtschaftung. Beide Ganglinien weisen Schwankungen im Dezimeterbereich auf, die nicht auf Vegetationsperioden von z. B. Luzerne durch erhöhte Verdunstungsleistung zurückzuführen sind.

Die Analysen der GW-Ganglinien zeigen keine Reaktion auf einzelne Niederschlagsereignisse, da das Grundwasser ein schwach bzw. spät reagierender Speicher ist und im Sinne einer Ganglinienseparation den Basisbetrag darstellt.

Zudem sind die Niederschläge ebenfalls von einem Negativ-Trend betroffen (im dargestellten Zeitraum waren die Jahresniederschläge bis auf 2017 immer kleiner als der mittlere Jahresniederschlag), so dass generell im Gebiet sinkende GWN-Raten und damit verbunden abnehmende GW-Stände zu erwarten sind. Des Weiteren ist zu erwarten, dass unter diesen Randbedingungen die GW-Stände auf der Hochlage schneller absinken, als die GW-Stände im Anstrombereich zur Pleiße. Leider gibt es im Untersuchungsgebiet keine vergleichbare Referenzmessstelle, welche gleiche Standortbedingungen (ohne Luzernebewirtschaftung) aufweist. Die aktuelle Analyse der beiden GW-Messstellen 42691 sowie 52341 ist daher nur bedingt aussagefähig.

Derzeit ist die Wirkung der Luzerne anhand der vorliegenden Daten und wegen der fehlenden Referenzmessstelle nicht eindeutig nachweisbar.

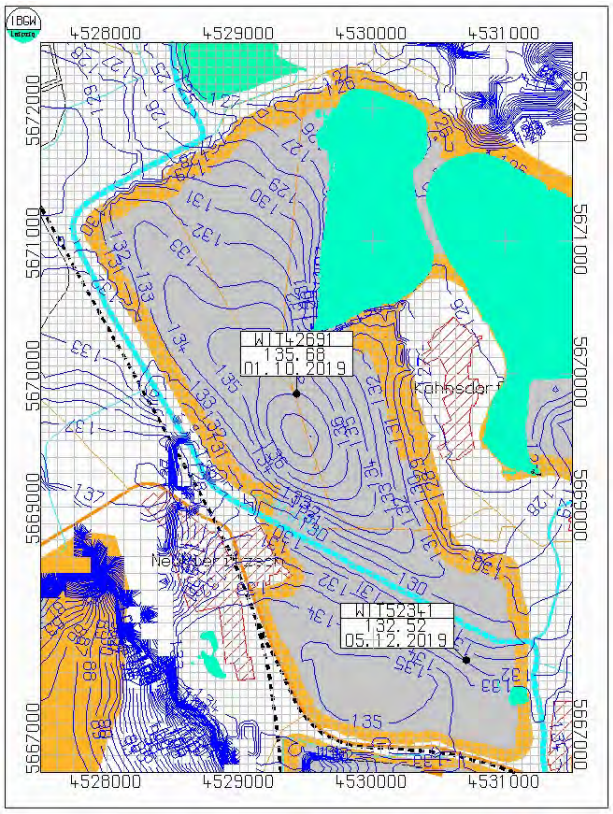

Abb. 5-15 Lage der GW-Messtellen im Gebiet, Isohypsen für Herbst 2019

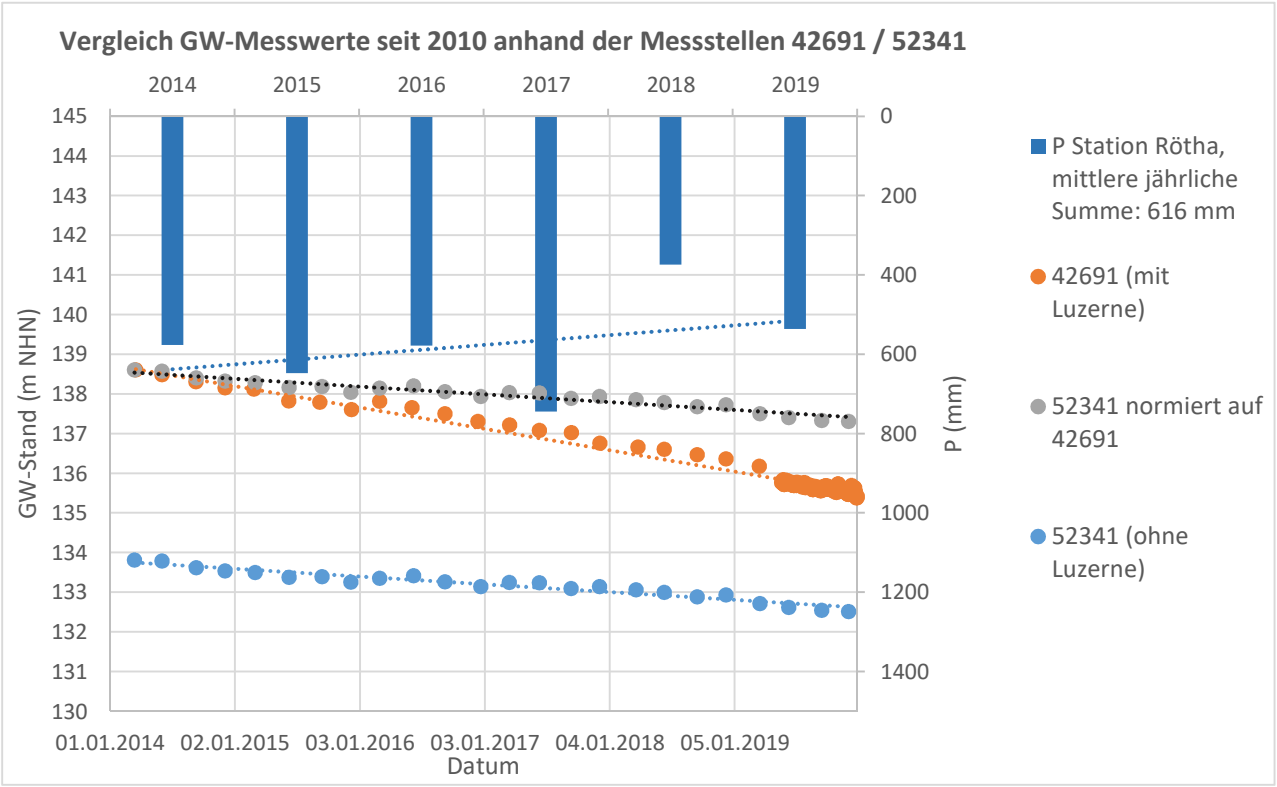

Abb. 5-16 Vergleich der GW-Ganglinien 42691 (orange, Luzerne) und 52341 (blau, ohne Luzerne) mit jeweiligen Trenddarstellungen sowie Jahresniederschläge für 2014-2019; grau zeigt die Ganglinie 52341 verschoben auf das Niveau von 42691

6 Zusammenfassung

Die großtechnische Umsetzung der Erfahrungen des Pilotversuches begann 2014 mit der Luzerneaussaat auf den Teilflächen A, C und D sowie 2015 auf der Teilfläche E. Somit stehen für die Bewertung fünf volle Vegetationsperioden zur Verfügung. Im Jahr 2020 erfolgte auf den Flächen A, C und D ein Fruchtwechsel. Als Folgefrucht wurde Mais und im September 2020 Winterweizen angebaut. Luzerne konnte an drei Kontrollflächen auf den Flächen B und E geerntet werden.

Auf der Lysimeterstation Brandis wurde 2020 parallel die Lysimeter 14/2 und 14/4 mit reiner Luzerne betrieben. Die 12er mit Winterraps und 13er Lysimeter mit Luzerne dienten als Referenzlysimeter.

Auf der ***landwirtschaftlichen Nutzfläche*** wurden 2020 insgesamt 4 Ernten durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen lassen sich folgende Kernaussagen treffen:

- Die Erntemenge an den drei Kontrollflächen betrug durchschnittlich 466 dt FM/ha und war, wie auch die letzten drei Jahre damit sehr niedrig.
- Im Vergleich dazu lagen die höchsten Erträge 2017 bei 792,3 dt FM/ha (5 Ernten).
- Grund für die geringen Erträge war wiederum das trockene Jahr 2020, in welchem nur etwa 82 % (Brandis) des langjährigen mittleren Niederschlags gefallen sind.
- Die Trockenmassen-Erträge auf den drei Kontrollflächen betrug im Mittel 109,9 dt TM/ha und liegen damit unter den Erträgen auf den Kontrollflächen von 2015 bis 2019 mit 134 dt TM/ha.
- Die Frischmassenerträge für Mais auf den Kontrollflächen K1 bis K4 und K6 betrugen 2020 durchschnittlich etwa 442,4 dt FM/ha und waren somit höher, als die Erträge auf den 14er-Lysimetern im Jahr 2019 mit durchschnittlich 335 dt FM/ha.
- Die Erträge auf den Kontrollflächen der Bewirtschaftungsflächen lassen hinsichtlich der 2014 durchgeführten Meliorationsarbeiten keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu.
- Die Erträge auf den gekalkten Flächen waren gegenüber der nicht gekalkten Flächen etwas höher. Unterschiede zwischen den tiefengelockerten Bereichen und nicht tiefengelockerten Bereichen war nicht erkennbar.

Die ***14er Lysimeter*** wurden 2020 nach zweijähriger Bewirtschaftung mit Mais erneut mit Luzerne bewirtschaftet. Es erfolgten zwei Ernten im Juni und im August. Die an den Lysimetern gemessenen Sickerwassermengen betrugen im Jahr 2020

- Lys. 14/2 62,7 mm (Luzerne)
- Lys. 14/4 52,1 mm (Luzerne)
- Lys. 12/1 76,8 mm (Winterraps – Winterweizen)
- Lys. 12/2 70,7 mm (Winterraps – Winterweizen)
- Lys. 12/3 66,4 mm (Winterraps – Winterweizen)

Die Ergebnisse der letzten acht Jahre zeigen, dass nicht zuletzt die stark differenzierten Erträge auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche und den Lysimetern (letztere wurden mit dem Jahresbericht 2016 zur modellgestützten Wirkungsprognose der Maßnahme am Schutzgut Pleiße verwendet) eine Quantifizierung der effektiven Minderung der GW-Neubildung im Kippenkörper erschweren. Die Sickerwassermengen der Luzerne-Lysimeter unterschieden sich im Messzeitraum 2012 bis 2017 kaum zu den konventionell betriebenen Lysimetern.

Eine angestrebte Minderung der Sickerwassermenge auf 25 % gegenüber Getreide ist somit aus den vorliegenden Lysimeter-Ergebnissen bisher noch nicht ersichtlich. Der Vergleich der seit 2009 ermittelten TM-Erträge zeigt jedoch, dass die Erträge auf den Kontrollflächen im Mittel mit 134 dt TM/ha mehr als 60 % höher sind, als auf den Lysimetern mit nur 82 dt TM/ha.

Es ist davon auszugehen, dass die Aufwuchsbedingungen auf den Kippenflächen besser sind, so dass es dort zu einer höheren Evapotranspiration, d. h. einem höheren Sickerwasserrückhalt kommt. Daher wurde 2019 ein Sondermessprofil auf der Kippe errichtet, an welchem die Wirkung des Sickerwassereinflusses auf die GW-Neubildung untersucht wird. Hierbei wird an drei Standorten die Bodenfeuchte und Saugspannung in 1,0 m und 2,5 m Tiefe gemessen.

Ergebnisse des Sondermonitorings

- Die ***Entwicklung der GW-Stände*** im Jahr 2020 zeigt einen deutlichen Abwärtstrend. Bis Ende des Jahres 2020 sanken die GW-Stände im Mittel um 39 cm.
- An allen Bodenwassermessstellen kam es in 1 m Tiefe zu einem Anstieg der Bodenfeuchte bzw. zu einer Abnahme des pF-Wertes im Januar bzw. Februar 2020.
- Die tieferen Bodenwassermessstellen in 2,5 m Tiefe zeigten in der zweiten Hälfte des Winterhalbjahres keinen oder nur teilweise einen Anstieg der Bodenfeuchte 2019/ 2020.
- Am Standort 2 in 2,5 m Tiefe und am Standort 3 in 1,0 m Tiefe weisen die Werte der Bodenfeuchtesonden eine relativ hohe Differenz auf, wobei die Werte-Entwicklung synchron verläuft. Die Messwertdifferenzen sind damit zu begründen, dass sich die Sonden trotz gleicher Einbautiefe und auch geringer Abstände zueinander in unterschiedlichen Bodenarten befinden.
- Während der Versickerungsversuche konnten alle Sonden (außer eine Bodenfeuchte Sonde in 2,5 m Tiefe am Standort 1 und einige Sonden am Standort 2) angesprochen werden.
- Seit Mitte Juli 2020 zeigt jeweils eine pF-Sonde in 1 m Tiefe am Standort 1 und Standort 3 keine Werte mehr an.

Kalibrierung des 2D-Modells

- Die bisherige Kalibrierung umfasst den Zeitraum von 07/2019 bis 05/2020.
- Eine gute Kalibrierung konnte für den Standort 1 und Standort 3 erreicht werden.

- Am Standort 2 werden die z. T. unplausiblen hohen pF-Werte vom Modell nicht abgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass nur eine schwache Verbindung zwischen den pF-Sonden und dem Substrat vorhanden ist.
- Im nächsten Schritt erfolgt die Kalibrierung des Modells anhand des Zeitraums 10/2020 bis 04/2021. Der Zeitraum zwischen 06/2020 bis 09/2020 ist beeinflusst von den im Mai und Juni 2020 durchgeführten Versickerungsversuchen und wird deshalb von der Kalibrierung ausgeklammert. Nach erfolgreicher Kalibrierung erfolgen bis Ende 2021 die Prognosefortschreibung mit dem 3D-Modell und die Ausweisung der Sickerwassermengen für verschiedene Bewirtschaftungsszenarien.

Fortschreibung Grundwassermodell

- Grundsätzlich beschreibt das Modell HGMS2017 (Version2020) die geohydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet hinreichend gut.
- Die sinkenden GW-Spiegelhöhen auf der Hochlage werden vom Modell nicht abgebildet, weil dieses mittleren Grundwasserneubildungsverhältnissen annimmt. Die geringe GW-Neubildung infolge der Trockenheit seit 2018 wird somit nicht berücksichtigt.
- Die Analyse der Einflüsse von Klima und Landnutzung auf die GW-Ganglinien („Ganglinienseparation“) hat gezeigt, dass keine Reaktion einzelner Niederschlagsereignisse ableitbar ist, da das Grundwasser ein schwach bzw. spät reagierender Speicher ist und im Sinne einer Ganginienseparation den Basisbetrag darstellt.
- Eine Separation der Ganglinien ist somit gegenwärtig anhand der vorliegenden Datenreihe, auch aufgrund der Trockenheit der letzten drei Jahre, nicht möglich.

7 Literatur

[1] BfG (2003): BAGLUVA-Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses, BfG-1342, 2003

[2] Merkblatt DWA-M 504-1 (2018): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen – Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung, Juli 2018

[3] Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, September 2002

[4] Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, 5. Aufl., 438 S., Hannover

[5] Ritchie, J. T. (1972): Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research Vol. 8, No. 5, p. 1204-1213, Oktober 1972

[6] Feddes, R. A.; Kowalik, P.J.; Zaradny, H.: Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Wageningen: Centre for agricultural publishing and documentation, 1978

[7] Simunek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. (1999): The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, version 2.0. U.S. Salinity Laboratory USDA, ARS, April 1999

[8] van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, p. 892-898

[9] GFI GmbH Dresden (2020): Dokumentation zu den Infiltrationsversuchen mittels Einzelring-Infiltration am Sondermessprofil auf der Kippe Witznitz, 01.10.2020

[10] Shukla, M. K., & Lal, R. (2006). Water Infiltration in Soil. The Ohio State University, Columbus, Ohio, U.S.A. Encyclopedia of Soil Science DOI: 10.1081/E-ESS- 120006659.

[11] IBGW GmbH Leipzig (2009): Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs und der daraus folgenden Exfiltration eisenbelasteter Grundwässer aus den Kippen des ehemaligenTagebaus Witznitz in die Fließgewässer Pleiße und Wyhra. Teilbericht 2: Ermittlung der geologischen Verhältnisse der Kippe und Quantifizierung der Stoffmengenverteilung (Eisen / Schwefel) in der Kippe (2. überarbeitete Fassung), 20.04.2009.

[12] GFI GmbH Dresden (2020): (Jahresbericht 2019) Ingenieurtechnische Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme

5.1 zur Reduzierung des Sicker¬wasserstroms durch Bewirtschaftung von Kippenflächen Witznitz (Nachsorgephase 2018-2022), 29.05.2020

[13] GFI GmbH Dresden (2016): (Jahresbericht 2015) Großtechnische Umsetzung der Erfahrung des Pilotversuchs Witznitz zur Reduzierung der Eiseneinträge in die Pleiße, 29.02.2016

[14] GFI GmbH Dresden (2017): (Jahresbericht 2016) Großtechnische Umsetzung der Erfahrung des Pilotversuchs Witznitz zur Reduzierung der Eiseneinträge in die Pleiße, 30.03.2017

[15] Chapter 6 - ETc - Single crop coefficient (Kc): Internetwebseite: http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0b.htm#TopOfPage, aufgerufen im Juni 2020

[16] Busch, Karl-Franz; Luckner, Ludwig; Tiemer, Klaus: Lehrbuch der Hydrogeologie. Bd. 3: Geohydraulik. 3. Auflage. Berlin/Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1993. ISBN: 3-443-1004-0

[17] Carsl, Robert F.; Parrish, Rudolph S. 1998: Developing join propability distribution of soil water retention characteristics. In: Water Resources Research 24(1998), Nr. 5, S. 755-769.

[18] Naseri, M., S.C. Iden, N. Richter, and W. Durner. 2019. Influence of stone content on soil hydraulic properties: Experimental investigation and test of existing model concepts. Vadose Zone J. 18:180163. doi:10.2136/vzj2018.08.0163

Anlage 1

Prüfberichte für
die Bestimmung der Ernteerträge

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden

Prüfbericht 20-Witz-001

Auftraggeber: Michaela Rumpel
Interne Auftrags-Nr. 20-Witz-001
Prüfgegenstand: Biomaterial

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-19633-01-00
Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage aufgeführten Akkreditierungsumfang.

Ausstellungsdatum: 08.10.20

Verfahren: Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts in Schlamm und Sediment nach DIN EN 12880 und in Boden DIN ISO 11465

Probeneingang: 06.04.2020 Messdatum: von 07.04.2020 bis 07.04.2020 Probenahme: Kunde

Prüfergebnisse:

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die dem Prüflabor vorliegenden Prüfgegenstände. Unsachgemäßer Zustand des Prüfgegenstandes bei der Anlieferung kann zur eingeschränkten Aussagekraft der Prüfergebnisse führen.Die in den Vorschriften angegebenen Messunsicherheiten werden eingehalten. Veröffentlichungen, auch auszugsweise nur mit Zustimmung des Prüflabors.

		Proben-Nr.	20/_0212	20/_0213	20/_0214	20/_0215	20/_0216
		Proben-Bezeichnung	K2 neu	K4	K5	K6	K7
Parameter	*Einheit*	*BG*					
Trockenmasse	%		**22,3**	**22,6**	**21,0**	**24,1**	**23,7**

		Proben-Nr.	20/_0217
		Proben-Bezeichnung	K8
Parameter	*Einheit*	*BG*	
Trockenmasse	%		**24,0**

Mit freundlichen Grüßen

Dipl.-Chem. Lorina Schmalz
(tech. Laborleiterin, stellvert. QMB)

Dieser Bericht wurde durch ein validiertes Laborinformationssystem generiert.

Legende: n.n. - nicht nachgewiesen (<Nachweisgrenze) k.Probe - keine Probe TM - Trockenmasse
<Zahl - nachgewiesen, nicht bestimmbar (<Bestimmungsgrenze) n.a. - nicht analysiert Korngröße für Bodenanalyse < 2 mm

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden

Prüfbericht 20-Witz-002

Auftraggeber: Michaela Rumpel
Interne Auftrags-Nr. 20-Witz-002
Prüfgegenstand: Biomaterial

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-19633-01-00
Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage aufgeführten Akkreditierungsumfang.

Ausstellungsdatum: 08.10.20

Verfahren: Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts in Schlamm und Sediment nach DIN EN 12880 und in Boden DIN ISO 11465

Probeneingang: 11.05.2020 Messdatum: von 13.05.2020 bis 13.05.2020 Probenahme: Kunde

Prüfergebnisse:

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die dem Prüflabor vorliegenden Prüfgegenstände. Unsachgemäßer Zustand des Prüfgegenstandes bei der Anlieferung kann zur eingeschränkten Aussagekraft der Prüfergebnisse führen.Die in den Vorschriften angegebenen Messunsicherheiten werden eingehalten. Veröffentlichungen, auch auszugsweise nur mit Zustimmung des Prüflabors.

		Proben-Nr.	20/_0338	20/_0339	20/_0340	20/_0341
		Proben-Bezeichnung	K5	K6*	K7	K8
Parameter	*Einheit*	*BG*				
Trockenmasse	%		**19,1**	**16,8**	**20,6**	**19,4**

Mit freundlichen Grüßen

Dipl.-Chem. Lorina Schmalz
(tech. Laborleiterin, stellvert. QMB)

Dieser Bericht wurde durch ein validiertes Laborinformationssystem generiert.

Legende: n.n. - nicht nachgewiesen (<Nachweisgrenze) k.Probe - keine Probe TM - Trockenmasse
<Zahl - nachgewiesen, nicht bestimmbar (<Bestimmungsgrenze) n.a. - nicht analysiert Korngröße für Bodenanalyse < 2 mm

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden

Prüfbericht 20-Witz-003

Auftraggeber: Michaela Rumpel
Interne Auftrags-Nr. 20-Witz-003
Prüfgegenstand: Biomaterial

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-19633-01-00
Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage aufgeführten Akkreditierungsumfang.

Ausstellungsdatum: 08.10.20

Verfahren: Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts in Schlamm und Sediment nach DIN EN 12880 und in Boden DIN ISO 11465

Probeneingang: 04.06.2020 Messdatum: von 04.06.2020 bis 04.06.2020 Probenahme: Kunde

Prüfergebnisse:

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die dem Prüflabor vorliegenden Prüfgegenstände. Unsachgemäßer Zustand des Prüfgegenstandes bei der Anlieferung kann zur eingeschränkten Aussagekraft der Prüfergebnisse führen.Die in den Vorschriften angegebenen Messunsicherheiten werden eingehalten. Veröffentlichungen, auch auszugsweise nur mit Zustimmung des Prüflabors.

		Proben-Nr.	20/_0466	20/_0467	20/_0468
		Proben-Bezeichnung	K5	K7	K8
Parameter	*Einheit*	*BG*			
Trockenmasse	%		**22,7**	**22,4**	**21,4**

Mit freundlichen Grüßen

Dipl.-Chem. Lorina Schmalz
(tech. Laborleiterin, stellvert. QMB)

Dieser Bericht wurde durch ein validiertes Laborinformationssystem generiert.

Legende: n.n. - nicht nachgewiesen (<Nachweisgrenze) k.Probe - keine Probe TM - Trockenmasse
<Zahl - nachgewiesen, nicht bestimmbar (<Bestimmungsgrenze) n.a. - nicht analysiert Korngröße für Bodenanalyse < 2 mm

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
Meraner Straße 10, 01217 Dresden

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-PL-19633-01-00

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren

Michaela Rumpel - GFI GmbH Dresden
Meraner Str. 10
01217 Dresden

Prüfbericht 20-Witz-004

Auftraggeber: Michaela Rumpel - GFI GmbH Dresden
Probeneingang: 26.08.2020
Prüfgegenstand: Biomaterial
Probenahme: Kunde

Ausstellungsdatum: 08.10.2020
Messdatum: von 28.08.2020 bis 28.08.2020

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die vorliegende(n) Probe(n). Unsachgemäßer Zustand des Prüfgegenstandes bei der Anlieferung kann zur eingeschränkten Aussagekraft der Prüfergebnisse führen. Die in den Vorschriften angegebenen Messunsicherheiten werden eingehalten. Die auszugsweise Vervielfältigung ist nur mit der Zustimmung des Labors erlaubt.

Laborauftrag: 20-Witz-004

Proben-Nr: 20/_1030 Probenbezeichnung K1

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	31,7	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1031 Probenbezeichnung K2

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	37	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1032 Probenbezeichnung K3

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	35,1	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1033 Probenbezeichnung K4

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	28,9	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1034 Probenbezeichnung K5

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	43,2	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1035 Probenbezeichnung K6

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	24,8	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1036 Probenbezeichnung K7

Legende:

BG	- Bestimmungsgrenze	TM	- Trockenmass
<Zahl	- nachgewiesen, nicht bestimmbar (<Bestimmungsgrenze)	(*)	- akkreditiertes Unterauftragslabor
n.n.	- nicht nachgewiesen (<Nachweisgrenze)	PV	- Probenvorbereitung
n.a.	- nicht analysiert	k.Probe	- keine Probe

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	37	%	0,1

Proben-Nr: 20/_1037 Probenbezeichnung K8

Parameter	Verfahren	Messergebnis	Einheit	BG
Trockenmasse	DIN EN 15934:2012-11	34	%	0,1

Dipl.-Chem. L. Schmalz
(tech. Laborleiterin, stellv.QMB)

Dieser Bericht wurde durch ein validiertes Laborinformationssystem generiert

Legende:

BG	- Bestimmungsgrenze	TM	- Trockenmass
<Zahl	- nachgewiesen, nicht bestimmbar (<Bestimmungsgrenze)	(*)	- akkreditiertes Unterauftragslabor
n.n.	- nicht nachgewiesen (<Nachweisgrenze)	PV	- Probenvorbereitung
n.a.	- nicht analysiert	k.Probe	- keine Probe

Anlage 2

Bilddokumentation 2020

Links: Aufwuchs auf Fläche A am 05.02.2020 rechts: Sondermessstelle 7645

Schadensbegutachtung am 03.04.2020; im Hintergrund gepflügtes Feld Fläche A

Gepflügtes Feld auf Fläche D (K3) am 03.04.2020

Luzerneaufwuchs und Ernte auf Fläche C (K4) am 03.04.2020

Luzerneaufwuchs und 1. Ernte auf Fläche E (K7) am 03.04.2020

Luzerneaufwuchs und 2. Ernte auf Fläche B (K5 neu) am 11.05.2020

Luzerneaufwuchs und 2. Ernte auf Fläche E (K7) am 11.05.2020

Luzerneaufwuchs und 2. Ernte auf Fläche E (K8) am 11.05.2020

Maisaufwuchs auf Fläche A (K1) am 28.05.2020

Maisaufwuchs auf Fläche D (K3) 28.05.2020

Maisaufwuchs auf Fläche C (K4) am 28.05.2020

Luzerneaufwuchs auf Fläche B (K5 neu) am 28.05.2020

Luzerneaufwuchs auf Fläche E am 28.05.2020

Maisaufwuchs auf Fläche A (links K1 und rechts K2) am 03.06.2020

Maisaufwuchs auf K3 (Fläche D) am 03.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche C (links K4 und rechts K6)

Luzerneaufwuchs an K5 (Fläche B) und 3. Ernte am 03.06.2020

Luzerneaufwuchs an K7 (Fläche E) und 3. Ernte am 03.06.2020

Luzerneaufwuchs an K8 (Fläche E) und 3. Ernte am 03.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche A (links K1 und rechts K2) am 17.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche D (K3) am 17.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche C (links K4 und rechts K6) am 17.06.2020

Aufwuchs nach Ernte auf Fläche B (K5 neu) am 17.06.2020

abgeerntete Fläche am Kontrollpunkt 7 (links) und noch nicht geerntete Fläche am Kontrollpunkt 8 auf der Fläche E am 17.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche A (links K1 und rechts K2) am 29.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche D (K3) am 29.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche C (links K4 und rechts K6) am 29.06.2020

Luzerneaufwuchs auf Fläche B (K5, neu) am 29.06.2020

Luzerneaufwuchs auf Fläche E (links: K7; rechts: K8 nach Ernte) am 29.06.2020

Maisaufwuchs auf Fläche A (K1) am 09.07.2020

Maisaufwuchs auf Fläche A (K2) am 09.07.2020

Maisaufwuchs auf Fläche D (K3) am 09.07.2020

Maisaufwuchs auf Fläche C (K4) am 09.07.2020

Maisaufwuchs auf Fläche C (K6) am 09.07.2020

Ernte Mais auf Fläche A (K1) am 26.08.2020

Ernte Mais auf Fläche A (K2) am 26.08.2020

Ernte Mais auf Fläche D (K3) am 26.08.2020

Ernte Mais auf Fläche C (K4) am 26.08.2020

Ernte Mais auf Fläche C (K6) am 26.08.2020

4. Ernte auf Fläche B (K5) am 26.08.2020

4. Ernte auf Fläche E (K7) am 26.08.2020

4. Ernte auf Fläche E (K8) am 26.08.2020

Links: Winterweizen auf Fläche A (Nordteil); rechts: Fläche A (Südteil) am 09.12.2020

Anlage 3

Dokumentation

zu den

Infiltrationsversuchen mittels Einzelring-Infiltration am Sondermessprofil auf der Kippe Witznitz

GFI Grundwasser-Consulting-Institut
GmbH Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden

Dokumentation

zu den

Infiltrationsversuchen mittels Einzelring-Infiltration am Sondermessprofil auf der Kippe Witznitz

Infiltrationsring am Standort 1

Dresden, den 01.10.2020

Titel	**Ingenieurtechnische Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognose-fortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch Bewirtschaftung von Kippenflächen Witznitz (Nachsorgephase 2018-2022)** **Hier: Dokumentation zu den Infiltrationsversuchen mittels Einzelring-Infiltration am Sondermessprofil auf der Kippe Witznitz**
Auftraggeber	**LMBV** Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH Walter-Köhn-Straße 2, 04356 Leipzig LMBV Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
Auftragnehmer	GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden Meraner Str. 10, 01217 Dresden
Auftragsnummer	45058342 vom 25.03.2020
Bearbeiter	Dr. rer. nat. Raneem Madi Dipl.-Ing. M. Rumpel L. Rotte M. Rabe
Datum	Dresden, den 01.10.2020

M. Rumpel
Dipl.-Ing. M. Rumpel
(Projektleiter)

Dr.-Ing. R. Giese
(Geschäftsführer)

Anschrift:
GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
Meraner Straße 10
01217 Dresden
Fon +49.351.4050660
Fax +49.351.4050669
info@gfi-dresden.de
www.gfi-dresden.de

Bankverbindung:
Deutsche Kreditbank AG
IBAN DE18 1203 0000 1020 0151 43
SWIFT BIC: BYLADEM1001

Handelsregister:
Amtsgericht Dresden
HR B 10748
USt-IdNr. DE 169148266

Geschäftsführer
Dr.-Ing. habil. Th. Luckner
Dr.-Ing. habil. F. Bilek
Dr.-Ing. R. Giese

INNOVATIV DURCH FORSCHUNG
Zertifiziert vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft
unter GFI4872DRE
www.stifterverband.de

Inhaltsverzeichnis

1 Veranlassung und Zielstellung 4

2 Planung und Vorversuche 5

3 Infiltrationsversuch 1 am Standort 1 (GWM 4269) 8

3.1 Versuchsaufbau 8

3.2 Vorläufige Auswertung 9

4 Infiltrationsversuch 2 am Standort 3 (GWM 7645) 12

4.1 Versuchsaufbau 12

4.2 Vorläufige Auswertung 13

5 Infiltrationsversuch 3 am Standort 2 (GWM 7642) 16

5.1 Versuchsaufbau 16

5.2 Vorläufige Auswertung 17

6 Zusammenfassung 20

7 Literatur 21

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Schichtprofil für die Standorte 1, 2 und 3

Anlage 2 Infiltrationsmengen

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Lage der neu errichteten GWM 7642 und 7645 auf der Kippe Witznitz 4
Abb. 2-1 Infiltrationsring für den Vorversuch am Standort 1 5
Abb. 2-2 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate if) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate if in mm/h während des Versuchs 6
Abb. 2-3 Literaturangaben zu stationären Infiltrationsraten in mm/h in Abhängigkeit der Bodenart (links aus Shukla & Lal, 2006; rechts aus Al-Hassoun, 2009) 6
Abb. 3-1 Schematischer Aufbau des Standortes 1 (GWM 4269) 8
Abb. 3-2 Lagebeschreibung am Standort 1 und Lage der Sonden 9
Abb. 3-3 links: Infiltrationsring am Standort 1; rechts: Versuchsdurchführung am Standort 1 9
Abb. 3-4 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate if) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate if in mm/h während des Versuchs 10
Abb. 3-5 Messwerte der Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren unter dem Versickerungsring in 1 m und 2,5 m Tiefe am Standort 1 11
Abb. 3-6 Messwerte der TDR-Sonden innerhalb und außerhalb des Versickerungsrings an der Oberfläche (OF) und in 0,5 m Tiefe (Anordnung siehe Abb. 3-2) 11
Abb. 4-1 Schematischer Aufbau des Versickerungsversuchs 2 am Standortes 3 (GWM 7645) 12
Abb. 4-2 links: Versuchsaufbau am Standort 3; rechts: Wasserzugabe während des Versuchs 12
Abb. 4-3 Lagebeschreibung am Standort 3 und Lage der Sonden 13
Abb. 4-4 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate if) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate if in mm/h während des Versuchs 14
Abb. 4-5 Vernässung während des Versuchs am Standort 3 14
Abb. 4-6 Messwerte der Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren in 1 m und 2,5 m Tiefe am Standort 3 15
Abb. 4-7 Messwerte der TDR-Sonden innerhalb und außerhalb des Versickerungsrings an der Oberfläche (OF) und in 0,5 m Tiefe (Anordnung siehe Abb. 4-3) 15
Abb. 5-1 Schematischer Aufbau des Standortes 2 (GWM 7642) 16
Abb. 5-2 Lagebeschreibung am Standort 2 und Lage der Sonden 16
Abb. 5-3 links: Aufbau des Versuchs am Standort 2; rechts: Wasserzugabe während des Versuchs 17
Abb. 5-4 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate if) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate if in mm/h während des Versuchs 18
Abb. 4-6 Messwerte der Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren in 1 m und 2,5 m Tiefe am Standort 2 18
Abb. 5-6 Messwerte der TDR-Sonden innerhalb und außerhalb des Versickerungsrings an der Oberfläche (OF) und in 0,5 m Tiefe (Anordnung siehe Abb. 5-2) 19

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Randbedingungen für die Vorversuche am Standort 1 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 2-2) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate if.. 7
Tab. 3-1 Randbedingungen für den Feldversuch am Standort 1 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 3-4) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate if 10
Tab. 4-1 Randbedingungen für den Feldversuch am Standort 3 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 4-4) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate if 13
Tab. 5-1 Randbedingungen für den Feldversuch am Standort 2 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 5-4) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate if 17

1 Veranlassung und Zielstellung

Im Zuge der Ingenieurtechnischen Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Kippenfläche Witznitz wurde für die Nachsorgephase ein erweitertes Monitoringkonzept für den Zeitraum 2018 – 2022 erstellt. Dieses Konzept beinhaltete die Errichtung eines Sondermessprofils.

Dieses Sondermessprofil dient der Nachverfolgung des Sickerwasserstroms auf der Kippe Witznitz und dessen Einfluss auf die GW-Neubildung. Ziel ist durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung mit Luzerne (5 Jahre) die GW-Neubildung nachhaltig zu reduzieren, um die Exfiltration von eisen- und sulfathaltigem Wasser in die Pleiße vermindern.

Die Errichtung des Sondermessprofils erfolgte 06/2019. Hierbei wurden zwei neue Grundwassermessstellen (GWM) auf der Kippe Witznitz errichtet (s. Abb. 1-1).

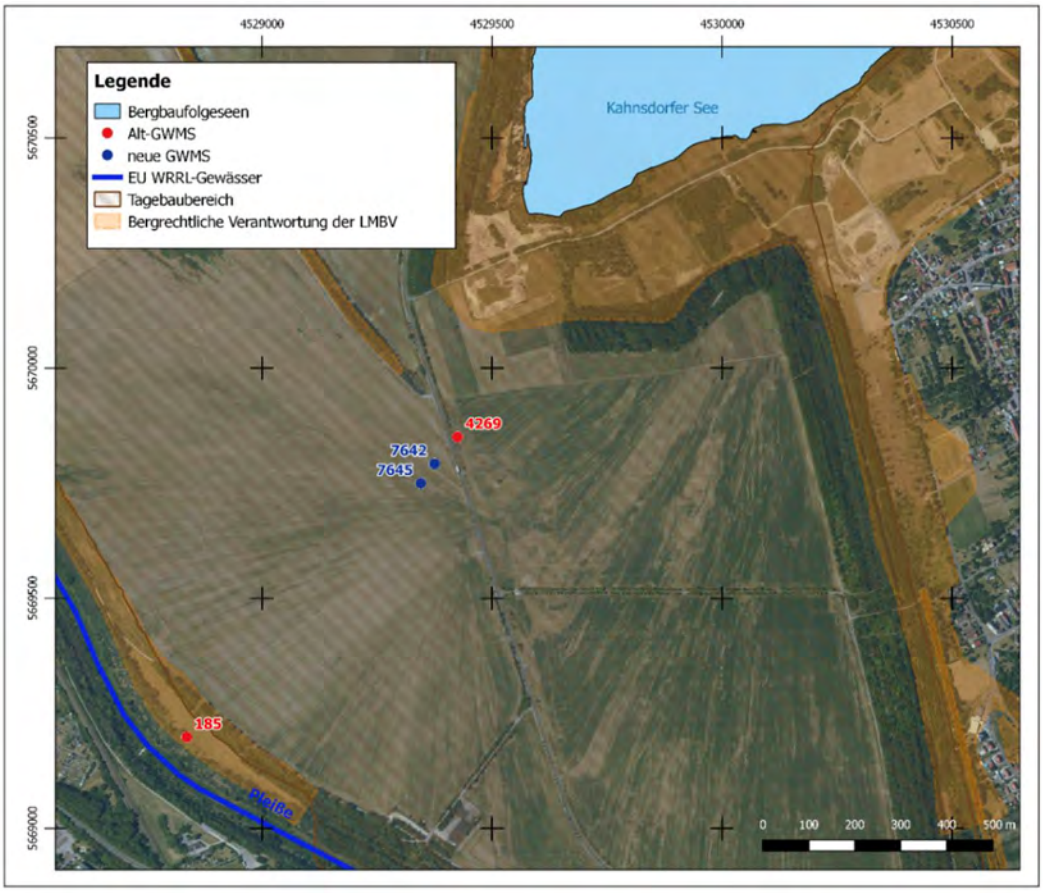

Abb. 1-1 Lage der neu errichteten GWM 7642 und 7645 auf der Kippe Witznitz

An einer bereits bestehenden GWM (4269) und an den beiden neu errichteten GWM (7642 und 7645) wurden des Weiteren Bodenwassermessstellen installiert. Diese bestehen aus vier Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren, welche in zwei Teufen (1 m und 2,5 m) installiert wurden. Für die Prognosefortschreibung, die 2021 erfolgt, wurde 2019 ein 2D-Bodenwasserhaushaltsmodell mit HYDRUS 2D aufgebaut, welches anhand der Messdaten an den Bodenwassermessstellen fortlaufend kalibriert wird. Aufgrund der anhaltenden Trockenheit seit der Errichtung dieser Bodenwassermessstellen konnte die Kalibrierung des Modells

bisher nur ungenügend erfolgen. Deshalb wurde vorgeschlagen, an mindestens zwei Standorten des Sondermessprofils Versickerungsversuche bzw. Infiltrationsversuche durchzuführen.

Die Infiltrationsversuche dienen der Ermittlung des Versickerungsverhaltens zur Formierung der GW-Neubildung unterhalb der durchwurzelnden Bodenzone. Dazu werden mithilfe des Programmsystems HYDRUS 2D die bodenhydraulischen Parameter berechnet. Im vorliegenden Bericht werden die Infiltrationsversuche dokumentiert und die hydraulische Leitfähigkeit an den jeweiligen Versuchsstandorten abgeschätzt.

2 Planung und Vorversuche

Das Ziel ist, über die geplanten Infiltrationsversuche möglichst die installierten Sonden (Bodenfeuchte, Saugspannung) in den Teufen von 1,0 m und 2,5 m anzusprechen. Daher wurden für die Versuche große Durchmesser der Infiltrationsringe (Einzelring-Infiltration) gewählt. Große Radien erzeugen ein größeres Verhältnis von Fläche zu Umfang, wodurch die räumliche Variabilität vermindert wird und somit ein aussagekräftiges Ergebnis mit einem Einzelring erzielt wird.

Zur Durchführung wurde im Vorfeld zu jedem Standort ein Lageplan erstellt, an welchem die geeignete Ringgröße festgelegt wurde. Zusätzlich wurde südlich der GWM 4269 eine Rammkernsondierung bis 2,71 m u GOK durchgeführt, um ein Schichtprofil für diesen Standort zu erhalten (siehe Anlage 1). Für die Standorte 7642 und 7645 existieren Schichtenprofile aus dem Messstellenbau. Des Weiteren wurden am 29.04.2020 nördlich der GWM 4269 zwei Vorversuche mit kleineren Ring-Durchmessern durchgeführt. Die Vorversuche sollen verdeutlichen, wie und ob die geplanten großflächigen Infiltrationsversuche durchführbar sind, welche Wassermengen benötigt werden und welche Zeit diese in Anspruch nehmen.

Der Bodenwassergehalt des Oberbodens auf den Versuchsflächen war durch die langanhaltende Trockenheit sehr gering, was den Einbau der Infiltrationsringe erschwerte. Die Infiltrationsringe für die Vorversuche bestanden aus einem PVC-Rohr DN 400 mit einem Innendurchmesser von 0,37 m bzw. einer Fläche von 0,108 m². Der untere Rand wurde zu einer umlaufenden Fase verschliffen.

Abb. 2-1 Infiltrationsring für den Vorversuch am Standort 1

Für den Einbau wurde eine Rinne angelegt, in welcher der Ring eingesetzt wurde. Zusätzlich wurde der Ring von außen mit Boden abgedichtet bzw. verfüllt. Ein Versuch erfolgte mit Bewuchs. Für den zweiten Versuch wurde der Bewuchs sowie die oberste Schicht (ca. 5 cm) entfernt. Es wurde eine Überstauhöhe von 5 cm eingestellt (Abb. 2).

Die Wasserzugabe erfolgte aus einem IBC Behälter (1 m³). Die Wassermenge wurde manuell auf die Infiltrationsfläche gegeben. Der Infiltrationsversuch hatte eine Dauer von etwa 5 Stunden.

Für beide Versuche wurden die stationären Infiltrationsraten i_f mithilfe der kumulativen Infiltration berechnet. Die stationäre Infiltrationsrate ergibt sich hierbei als Steigung der Geraden im stationären Bereich (vgl. Abb. 2-2). Die stationäre Infiltrationsrate i_f beträgt für Vorversuch 1 (mit Bewuchs) etwa ***11,3 mm/h*** und für Vorversuch 2 (ohne Bewuchs) etwa ***3,4 mm/h***.

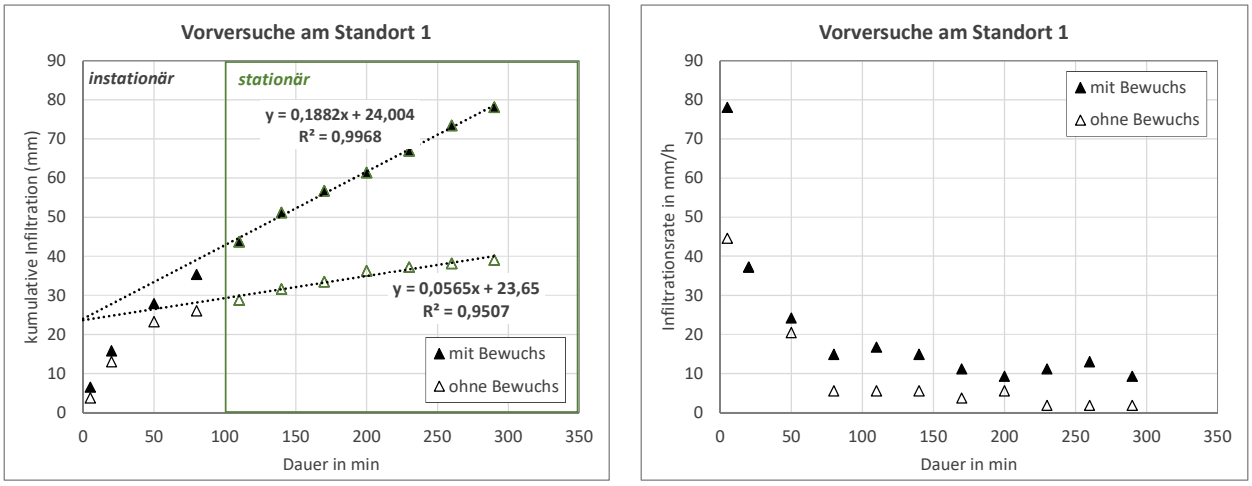

Abb. 2-2 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate i_f) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate i_f in mm/h während des Versuchs

Anhand der stationären Infiltrationsraten kann hiervon die Bodenart abgeleitet werden. In der Literatur finden sich hierzu beispielsweise folgende Angaben:

Bodenart	stationäre Infiltrationsrate mm/h
Sand	>30
Sandiger Lehm	20-30
Lehm	10-20
Toniger Lehm	5-10
Ton	1-5

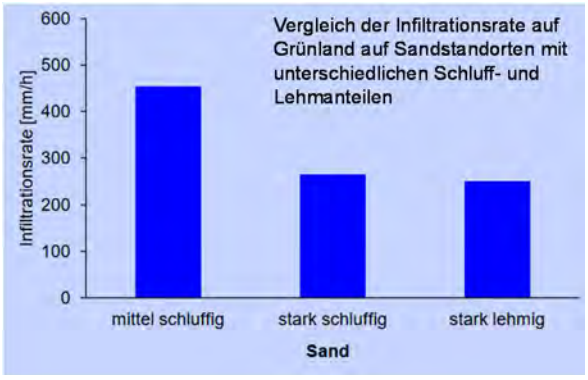

Abb. 2-3 Literaturangaben zu stationären Infiltrationsraten in mm/h in Abhängigkeit der Bodenart (links aus Shukla & Lal, 2006; rechts aus Al-Hassoun, 2009)

Aus den Vorversuchen lässt sich somit für den Standort 1 ableiten, dass es sich bei der Bodenart um einen Lehm bis tonigen Lehm handelt.

Die Randbedingungen für die beiden Vorversuche am Standort 1 sind in der folgenden Tab. 2-1 zusammengestellt.

Tab. 2-1 Randbedingungen für die Vorversuche am Standort 1 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 2-2) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate i_f

	Einheit	Vorversuch 1	Vorversuch 2
		mit Bewuchs	ohne Bewuchs
Ring-Durchmesser	m	0,370	0,370
Fläche	m²	0,108	0,108
Überstauhöhe	m	0,05	0,05
Infiltrierte Wassermenge	l	8,40	4,20
stationäre Infiltrationsrate i_f	mm/min	0,1882	0,0565
	mm/h	11,3	3,4
Bodenart (Abschätzung*)	-	Lehm	Ton

*) gem. Shukla & Lai, 2006

Mithilfe der folgenden Beziehung für Einzelring-Infitrometer kann im Weiteren die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s abgeschätzt werden (Wu & Pan, 1999)

$$i_f = f \cdot K_s \qquad \text{mit,} \qquad f = \frac{H + (1/\alpha)}{z + r/2} + 1$$

mit

i_f… stationäre Infiltrationsrate (z. B in mm/h oder m/s)
K_s… gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
f… Korrekturfaktor
H… Überstauhöhe in m
r… Infiltrometerradius in m
α kapillare Steighöhe: Faktor je nach Bodentyp in cm^{-1} nach (Carsel & Parrish, 1988)
z… Einbautiefe in m.

Der Korrekturfaktor f wird für beiden Versuche anhand der resultierten stationären Infiltrationsraten bzw. den abgeschätzten Bodentypen berechnet und beträgt für den Vorversuch 1 (mit Bewuchs) etwa 3,30 ($\alpha \approx 0{,}036\ cm^{-1}$) und für den Vorversuch 2 (ohne Bewuchs) etwa 5,04 ($\alpha \approx 0{,}019\ cm^{-1}$). Somit beträgt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit für:

Vorversuch 1 (mit Bewuchs) K_s = 0,1882 mm/min / 3,30 = 0,082 mm/min = ***9,5 · 10⁻⁷ m/s***

Vorversuch 2 (ohne Bewuchs) K_s = 0,0565 mm/min / 5,04 = 0,017 mm/min = ***1,9 · 10⁻⁷ m/s***

3 Infiltrationsversuch 1 am Standort 1 (GWM 4269)

3.1 Versuchsaufbau

Der Infiltrationsversuch 1 am Standort 1 wurde im Zeitraum vom 25.05.2020 bis 27.05.2020 durchgeführt. Der Einbau des Infiltrationsringes (∅ 2,10 m) erfolgte im Vorfeld. Die Einzelring-Infiltrometer bestehen aus 1,5 mm starken Edelstahl-Segmenten. Um den gewünschten Durchmesser zu erhalten, wurden mehrere Segmente hergestellt und entsprechend zusammengesetzt. Die Blechsegmente wurden mit einer Überlappung von 5,0 cm miteinander befestigt. Die Bleche wurden im GFI vorbereitet und der Ring anschließend vor Ort zusammengesetzt.

Außerhalb des Einzel-Infiltrationsrings wurden oberflächlich TDR-Sonden zur Überwachung des lateralen Flusses eingebracht. Zusätzlich wurden TDR-Sonde in einer Tiefe von 0,4 bis 0,7 m u. GOK eingebaut. Hierfür wurden Rammkernbohrungen abgeteuft und in diese die Sonden eingebracht. Dabei wurden die Sonden in einem Stahlrohr in den Boden eingefahren. Dies diente zum einen dem Schutz der Sonden und zum anderen konnte so eine Umläufigkeit des Wassers im Boden verhindert werden.

Für den Versickerungsversuch wurde die benötigte Wassermenge über einen Wassertank (8 m³) von der Osterland Agrargenossenschaft zur Verfügung gestellt. Aus dem 8 m³-Tank wurde das Wasser für den Versuch in einen höher gelagerten 1 m³-IBC-Tank umgeleitet (s. Abb. 3-1).

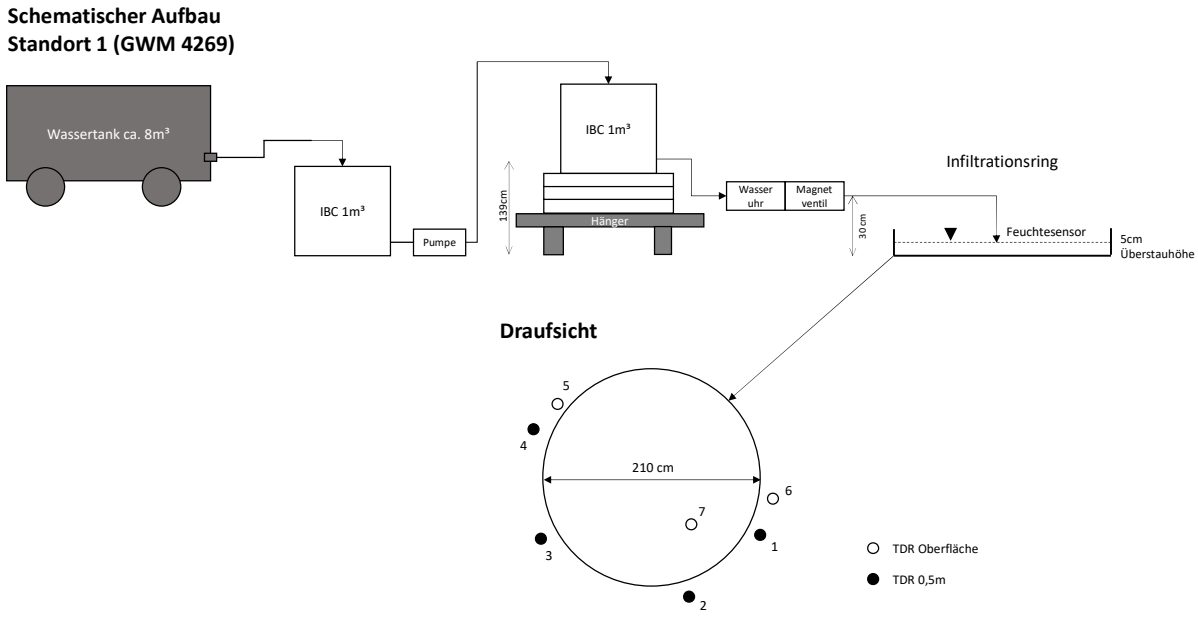

Abb. 3-1 Schematischer Aufbau des Standortes 1 (GWM 4269)

Am Standort 1 konnte somit eine größere Druckhöhe erreicht werden. Zur Regulierung der Überstauhöhe wurde ein elektrisch betriebenes Magnetventil installiert, welches netzstromunabhängig mittels 12 Volt Batteriespannung betrieben wurde. Im Infiltrationsring wurde ein Sensor in 5,0 cm Höhe angebracht, der bei Wasserkontakt das Ventil schließt bzw. bei Nicht-Kontakt öffnet. Damit wurde die Überstauhöhe konstant gehalten. Die verbrauchte Wassermenge wurde über eine Wasseruhr gemessen. Die Infiltrationsmengen sind in Anlage 2 aufgeführt.

Um die Verdunstung und den Eintrag von Niederschlag zu minimieren wurde eine Plane über die gesamte Fläche gespannt. Zusätzlich wurde ein Behältnis mit Wasser gefüllt und morgens und abends gewogen, um die Verdunstung zu ermitteln.

Die Lage des Infiltrationsringes am Standort 1 ist in Abb. 3-2 dargestellt.

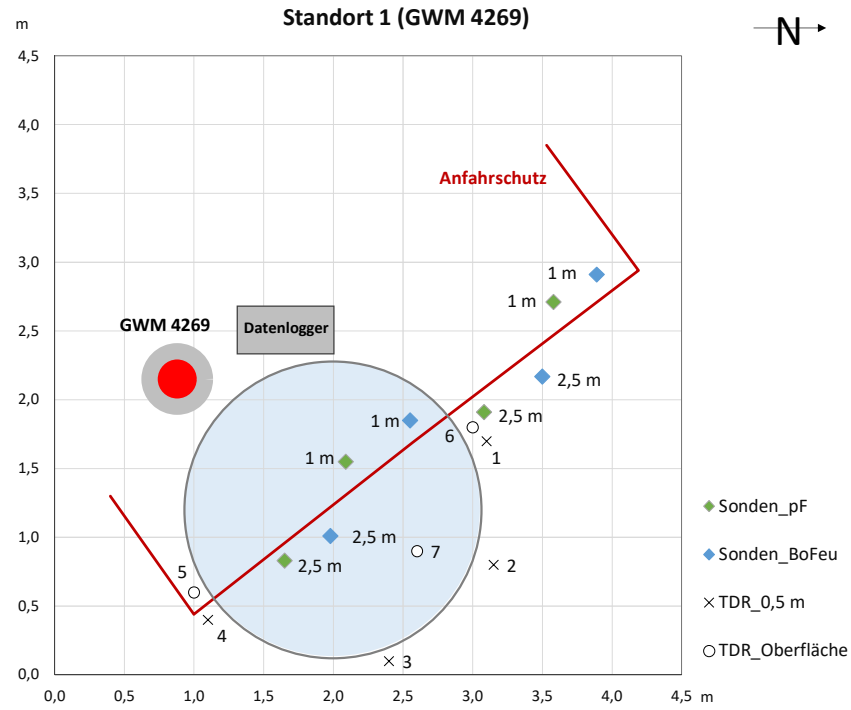

Abb. 3-2 Lagebeschreibung am Standort 1 und Lage der Sonden

Abb. 3-3 links: Infiltrationsring am Standort 1; rechts: Versuchsdurchführung am Standort 1

3.2 Vorläufige Auswertung

Für den Infiltrationsversuch am Standort 1 wurden die stationären Infiltrationsraten i_f mithilfe der kumulativen Infiltration berechnet. Die stationäre Infiltrationsrate ergibt sich hierbei als Steigung der Geraden im stationären Bereich (vgl. Abb. 3-4). Die stationäre Infiltrationsrate i_f beträgt für den Versuch 1 (ohne Bewuchs) etwa 1,14 mm/min bzw. 68,4 mm/h.

Die Randbedingungen für den Versuch am Standort 1 ist in der folgenden Tab. 3-1 zusammengestellt.

Tab. 3-1 Randbedingungen für den Feldversuch am Standort 1 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 3-4) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate i_f

	Einheit	Versuch Standort 1
		ohne Bewuchs
Ring-Durchmesser	m	2,1
Fläche	m^2	3,464
Überstauhöhe	m	0,05
Infiltrierte Wassermenge	m^3	6,19
stationäre Infiltrationsrate i_f	mm/min	1,14
	mm/h	68,4
Bodenart (Abschätzung)[*)]		stark lehmiger Sand

[*)] gem. Shukla & Lai, 2006

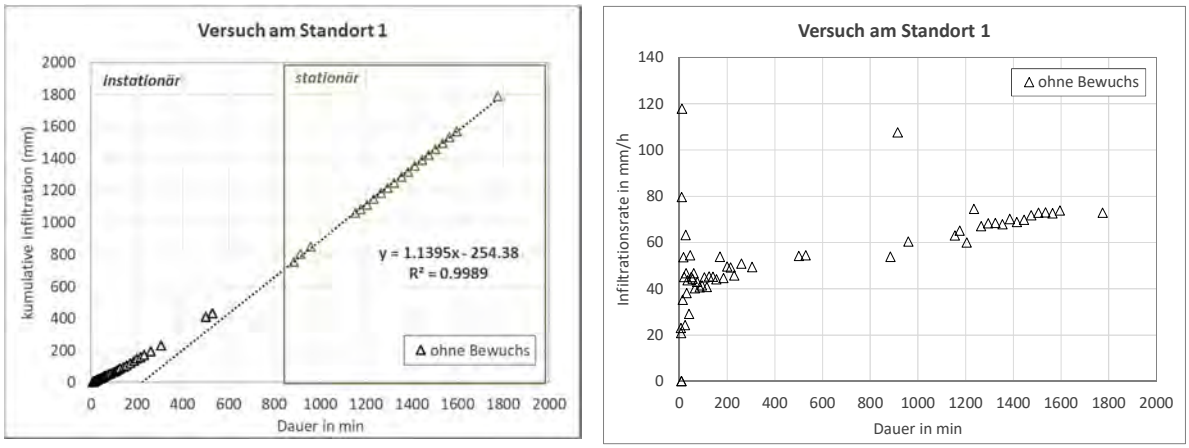

Abb. 3-4 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate i_f) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate i_f in mm/h während des Versuchs

Aus Abb. 3-4 ist erkennbar, dass die Infiltrationsrate zu Beginn des Versuchs stark schwankt und etwa nach 800 min konstant ansteigt.

Entsprechend dem Wert der stationären Infiltrationsrate in Höhe vom 68,92 mm/h kann der Boden grob als stark lehmiger Sand klassifiziert werden (vgl. Abb. 2-3).

Der Korrekturfaktor f wurde für den Versuch mittels der resultierten stationären Infiltrationsraten bzw. den abgeschätzten Bodenparameter α = 0.075 cm^{-1} (Carsel & Parrish, 1988) mit etwa 1,32 berechnet. Somit beträgt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit etwa

K_s = 1,14 mm/min / 1,32 = 0,864 mm/min = ***1,4 · 10^{-5} m/s***.

Die Sensoren aus dem Sondermessprofil innerhalb des Infiltrationsringes in 1 m Tiefe zeigten etwa 60 min nach Versuchsbeginn einen Anstieg der Bodenfeuchte von 23 % auf 35 % bzw. einen Abfall des pF-Wertes von 2 auf 0. Die Sensoren außerhalb des Ringes zeigten eine verzögerte Reaktion. Nur die Bodenfeuchte in 2,5 m außerhalb des Ringes zeigte keine Reaktion. Nach Beendigung des Versickerungsversuchs sinkt die Bodenfeuchte relativ schnell von 30 % auf 24 % und sinkt anschließend allmählich weiter. Der Abtrocknungsprozess ist noch nicht vollständig abgeschlossen.

Für die Kalibrierung des 2D-Modells bzw. die inverse Modellierung zur Ermittlung der bodenspezifischen Parameter wird der Abtrocknungsprozess im Mittelpunkt stehen.

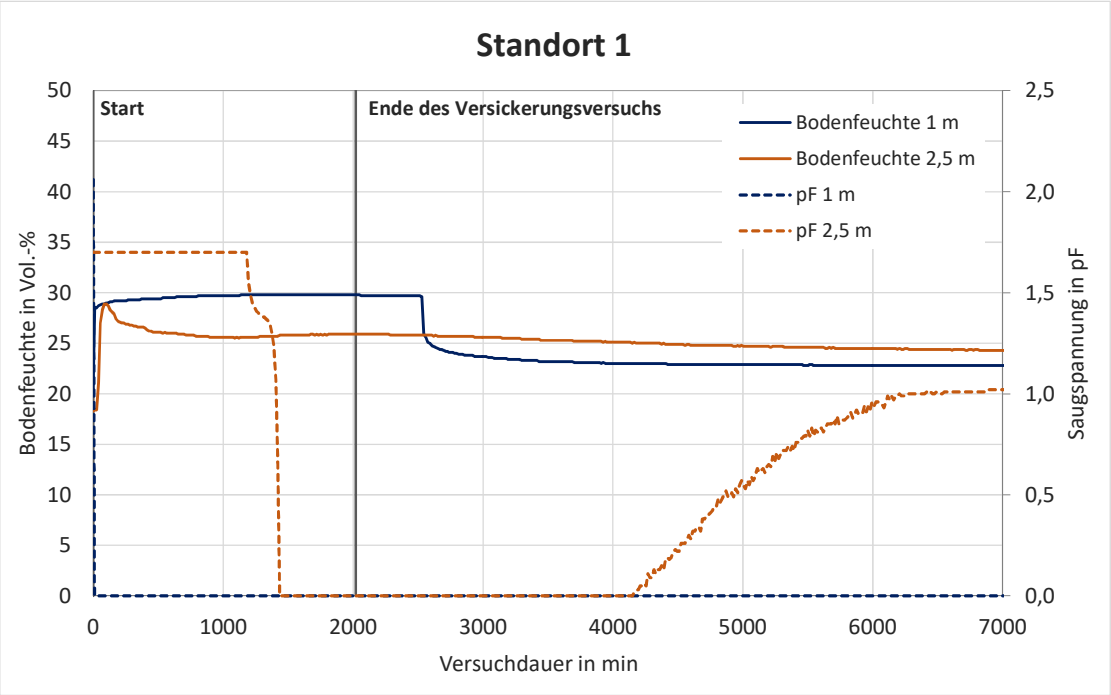

Abb. 3-5 Messwerte der Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren unter dem Versickerungsring in 1 m und 2,5 m Tiefe am Standort 1

Um den Ring wurde im Laufe des Versuchs eine Vernässung beobachtet (lateraler Fluss) beobachtet, der sich auch in der Auswertung der TDR-Messungen zeigt. Die vorläufige Auswertung lässt zudem den Schluss zu, dass die Feuchtefront nach Norden verläuft.

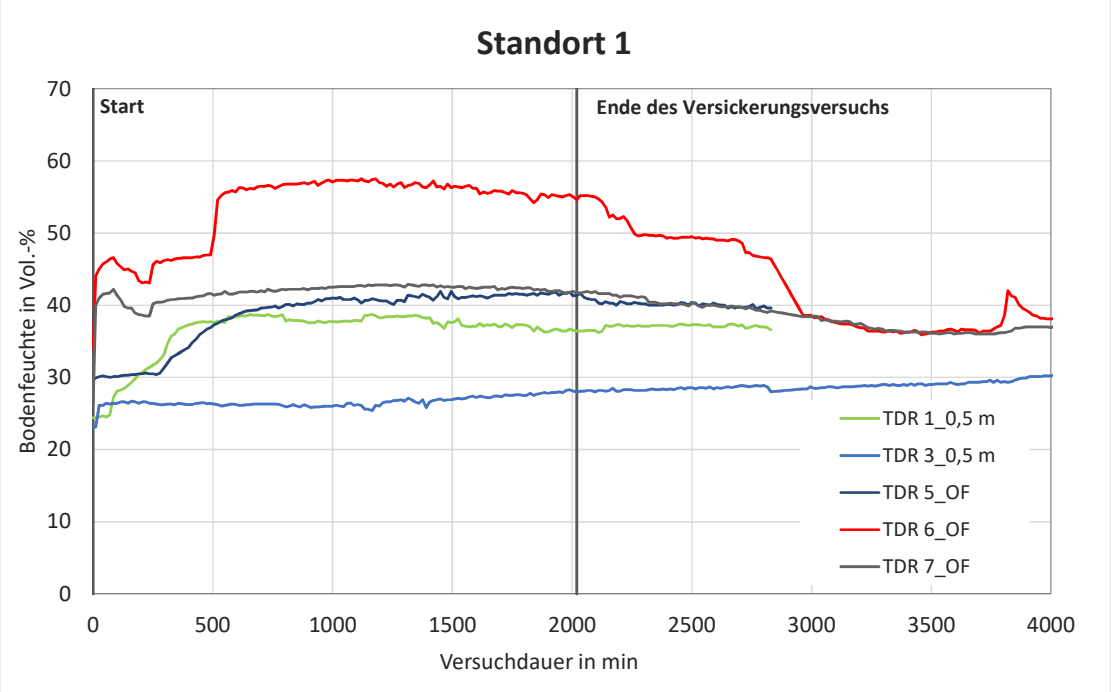

Abb. 3-6 Messwerte der TDR-Sonden innerhalb und außerhalb des Versickerungsrings an der Oberfläche (OF) und in 0,5 m Tiefe (Anordnung siehe Abb. 3-2)

4 Infiltrationsversuch 2 am Standort 3 (GWM 7645)

4.1 Versuchsaufbau

Der Infiltrationsversuch 2 am Standort 3 wurde im Zeitraum vom 08.06.2020 bis 09.06.2020 durchgeführt. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 4-1 dargestellt.

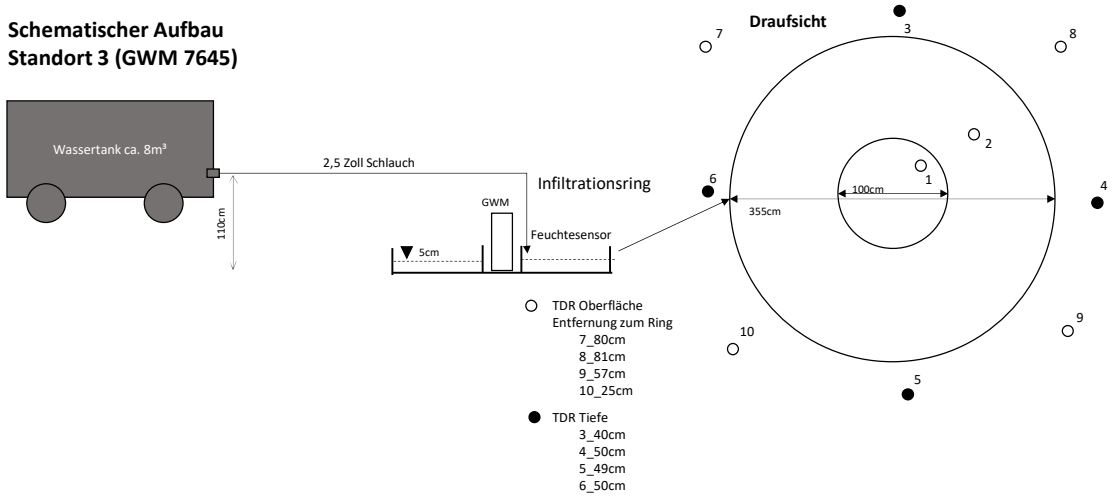

Abb. 4-1 Schematischer Aufbau des Versickerungsversuchs 2 am Standortes 3 (GWM 7645)

Der Versuchsaufbau unterschied sich hierbei zum Versuch 1 darin, dass sich im Zentrum des Einzelrings die Grundwassermessstelle befand. Zudem wurde um die GWM ein zweiter Ring gesetzt, um hier eine bevorzugte Versickerung an der Messstelle im oberen Bodenbereich auszuschließen. Der Ring-Durchmesser war zudem mit 3,10 m wesentlich größer, als am Standort 1. Außerhalb des Einzel-Infiltrationsrings wurden oberflächlich TDR-Sonden zur Überwachung des lateralen Flusses eingebracht. Zusätzlich wurden TDR-Sonden oberflächlich und in einer Tiefe von etwa 0,5 m u. GOK eingebaut.

Die Befüllung des Ringes und Einstellung der konstanten Druckhöhe von 5 cm erfolgte aufgrund des erhöhten Wasserbedarfs diesmal direkt aus dem 8 m³-Tank von Osterland. Die Wasserzugabe erfolgt manuell. Die Infiltrationsmengen sind in Anlage 2 aufgeführt Zur Minderung der Verdunstung und zum Schutz vor Niederschlag wurde eine Plane über den Ring gespannt. Zusätzlich wurde ein Behältnis mit Wasser gefüllt und morgens und abends gewogen, um die Verdunstung zu ermitteln.

Abb. 4-2 links: Versuchsaufbau am Standort 3; rechts: Wasserzugabe während des Versuchs

Die Lage des Infiltrationsringes am Standort 3 ist in Abb. 4-3 dargestellt.

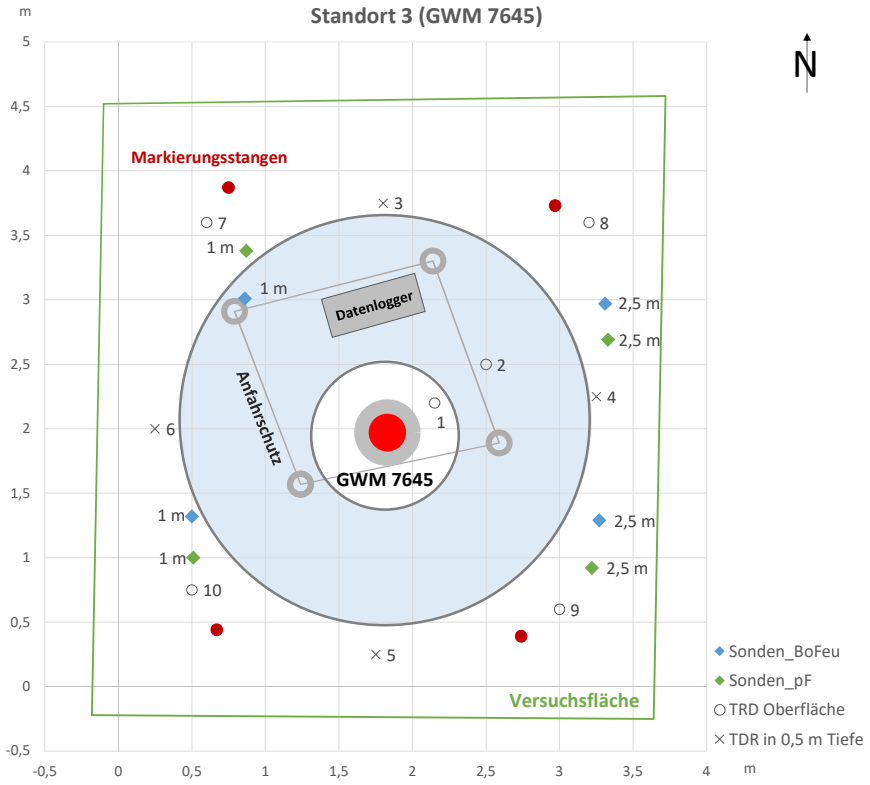

Abb. 4-3 Lagebeschreibung am Standort 3 und Lage der Sonden

4.2 Vorläufige Auswertung

Für den Infiltrationsversuch am Standort 3 wurden die stationären Infiltrationsraten i_f mithilfe der kumulativen Infiltration berechnet. Die stationäre Infiltrationsrate ergibt sich hierbei als Steigung der Geraden im stationären Bereich (vgl. Abb. 4-4). Die stationäre Infiltrationsrate i_f beträgt für den Versuch 2 am Standort 3 (ohne Bewuchs) etwa 2,56 mm/min bzw. 153,6 mm/h. Die Randbedingungen für den Versuch am Standort 3 ist in der folgenden Tab. 4-1 zusammengestellt.

Tab. 4-1 Randbedingungen für den Feldversuch am Standort 3 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 4-4) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate i_f

	Einheit	Versuch Standort 3
		ohne Bewuchs
Ring-Durchmesser innen/außen	m	1 / 3,1
effektive Fläche	m^2	6,762
Überstauhöhe	m	0,05
Infiltrierte Wassermenge	m^3	6,69
stationäre Infiltrationsrate i_f	mm/min	2,56
	mm/h	153,6
Bodentyp (Abschätzung)*)		stark lehmiger Sand

*) gem. Shukla & Lai, 2006

Wie Abb. 4-4 zeigt, schwankte die Infiltrationsrate anfänglich sehr stark. Nach etwa 130 min ist eine stationäre Infiltrationsrate erkennbar.

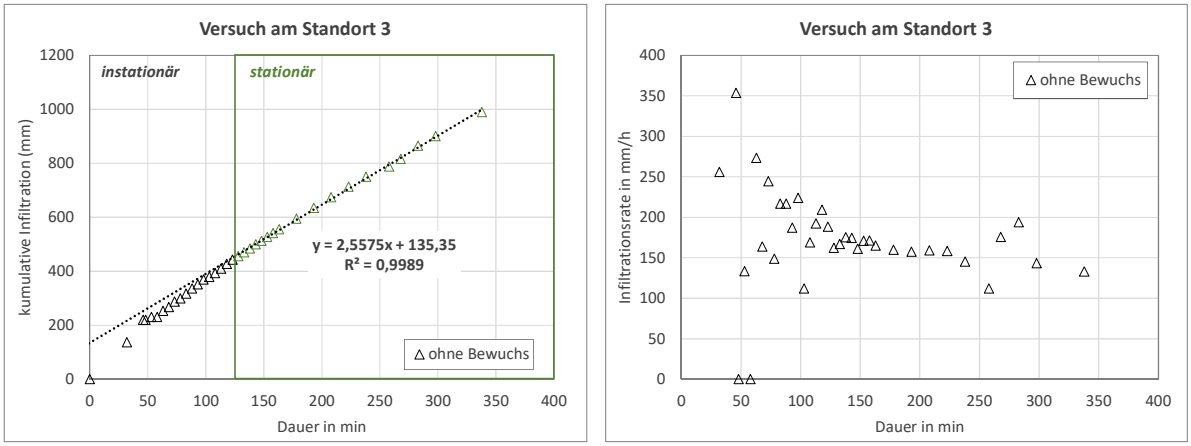

Abb. 4-4 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate i_f) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate i_f in mm/h während des Versuchs

Entsprechend dem Wert der stationären Infiltrationsrate in Höhe von 153,6 mm/h kann die Bodenart grob als stark lehmiger Sand klassifiziert werden (vgl. Abb. 2-3).

Der Korrekturfaktor f wurde für den Versuch am Standort 3 mittels der resultierten stationären Infiltrationsraten bzw. den abgeschätzten Bodenparameter $\alpha = 0.075\ cm^{-1}$ (Carsel & Parrish, 1988) mit etwa 1,19 berechnet. Somit beträgt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit etwa

K_s = 2,558 mm/min / 1,19 = 2,15 mm/min = ***3,6 · 10^{-5} m/s***.

Sechs der acht Sensoren aus dem Sondermessprofil konnten während des Versickerungsversuchs angesprochen werden. Die pF-Sonde 1 in 1,0 m Tiefe und die pF-Sonde 4 in 2,5 m Tiefe waren fehlerhaft bzw. lagen bereits vor dem Versuch bei 0. Die Bodenfeuchtesensoren in 1 m Tiefe stiegen bereits 30 min nach Versuchsbeginn von etwa 24 % auf 36 % bzw. von 16 % auf 44 %. Der Saugspannungssensor in 1 m Tiefe sank ebenfalls 30 min nach Versuchsbeginn sprunghaft von 2,9 auf 0 und in 2,5 m Tiefe von 1,1 auf 0. Dies lässt darauf schließen, dass die Sondenbohrlöcher Gängigkeiten aufweisen.

Abb. 4-5 Vernässung während des Versuchs am Standort 3

Nach Beendigung des Versickerungsversuchs sinkt die Bodenfeuchte in 1 m Tiefe nur langsam ab. Auch der pF-Wert steigt nur langsam (s. Abb. 5-5). Der Abtrocknungsprozess ist bisher

noch nicht vollständig abgeschlossen. Für die Kalibrierung des 2D-Modells bzw. die inverse Modellierung zur Ermittlung der bodenspezifischen Parameter wird der Abtrocknungsprozess im Mittelpunkt stehen.

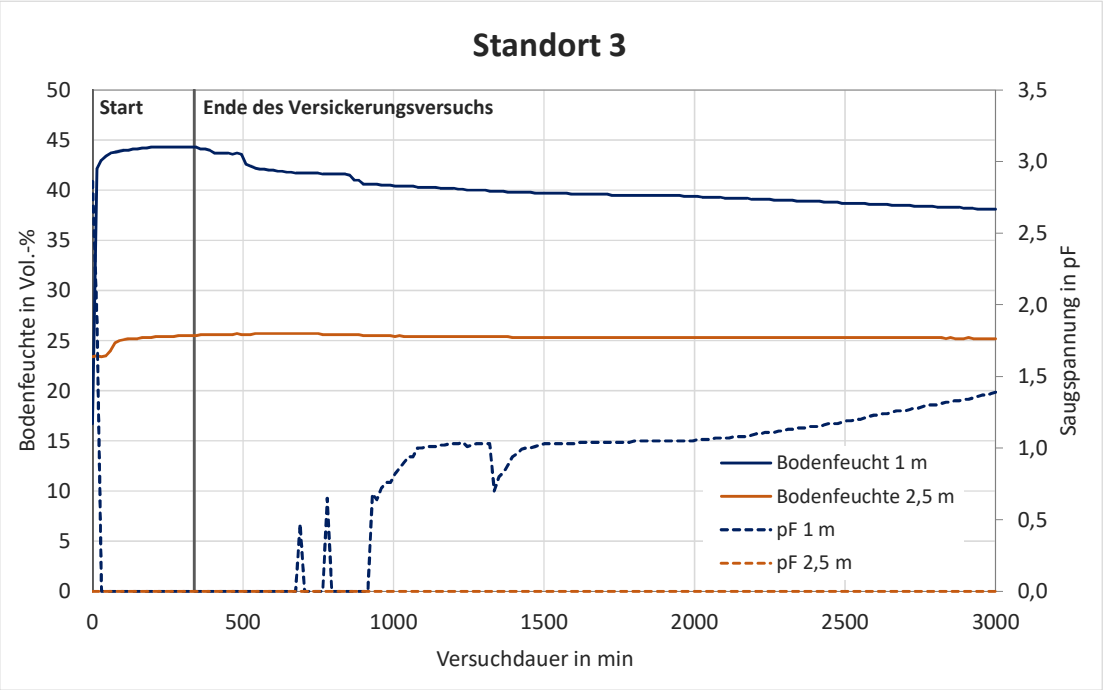

Abb. 4-6 Messwerte der Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren in 1 m und 2,5 m Tiefe am Standort 3

Des Weiteren wurde ein lateraler Fluss um den Ring beobachtet (Vernässung), der sich auch in der Auswertung der TDR-Messungen zeigt (s. Abb. 4-5). Die vorläufige Auswertung lässt zudem den Schluss zu, dass die Feuchtefront auch am Standort 3 Richtung N bzw. NO verläuft.

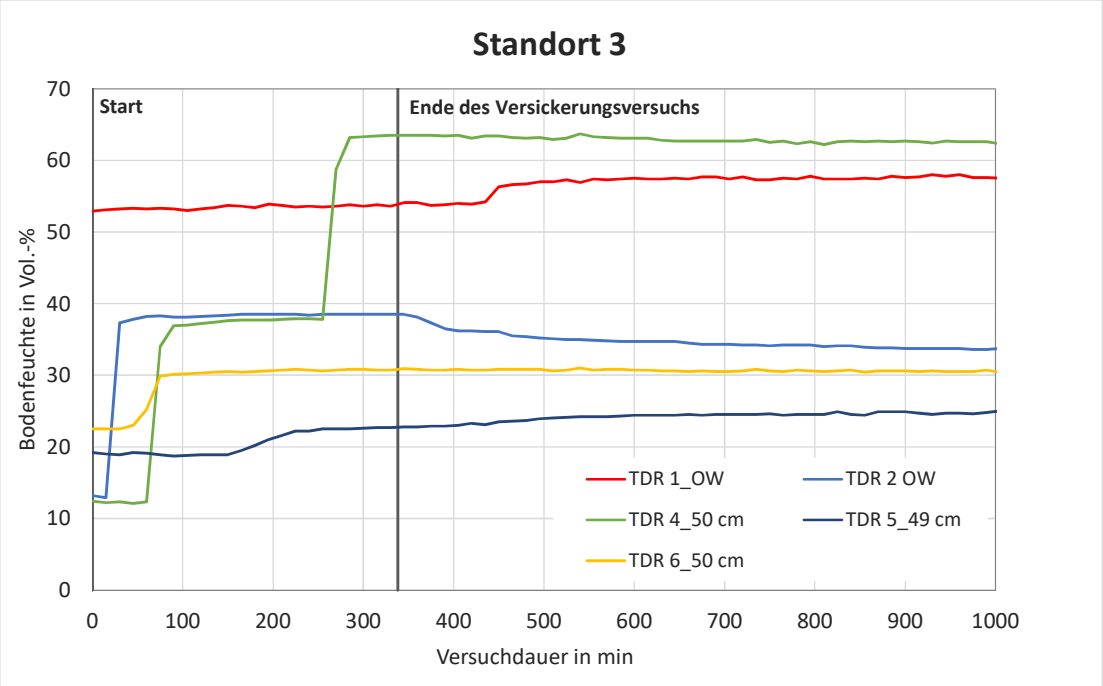

Abb. 4-7 Messwerte der TDR-Sonden innerhalb und außerhalb des Versickerungsrings an der Oberfläche (OF) und in 0,5 m Tiefe (Anordnung siehe Abb. 4-3)

5 Infiltrationsversuch 3 am Standort 2 (GWM 7642)

5.1 Versuchsaufbau

Der Infiltrationsversuch 3 am Standort 2 wurde im Zeitraum vom 10.06.2020 bis 11.06.2020 durchgeführt. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 5-1 dargestellt.

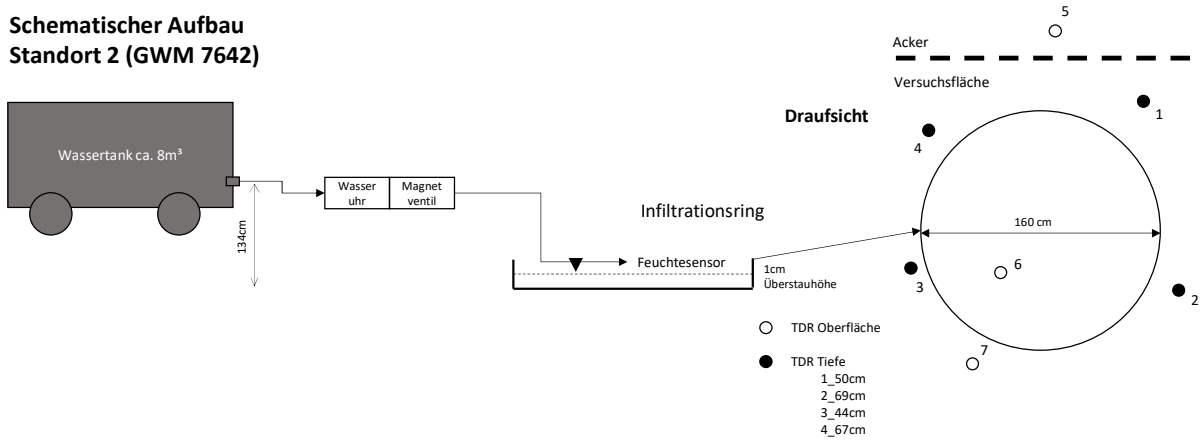

Abb. 5-1 Schematischer Aufbau des Standortes 2 (GWM 7642)

Am Standort 2 wurde ein kleinerer Ring-Durchmesser von 1,6 m verwendet. Damit wurde vermieden, dass sich die Sondenschächte der Bodenfeuchte- und pF-Sensoren innerhalb des Ringes befinden. So sollte eine oberflächliche Wassergängigkeit verhindert werden. Außerhalb des Einzel-Infiltrationsrings wurden oberflächlich TDR-Sonden zur Überwachung des lateralen Flusses eingebracht. Zusätzlich wurden TDR-Sonden oberflächlich und in einer Tiefe von etwa 0,5 bis 0,7 m u. GOK eingebaut. Die Wasserzugabe erfolgt hierbei wieder direkt aus dem 8 m³-Tank, wobei die konstante Druckhöhe von 1 cm im Infiltrationsring über den Sensor und das Magnetventil geregelt wurde. Die Infiltrationsmengen sind in Anlage 2 aufgeführt

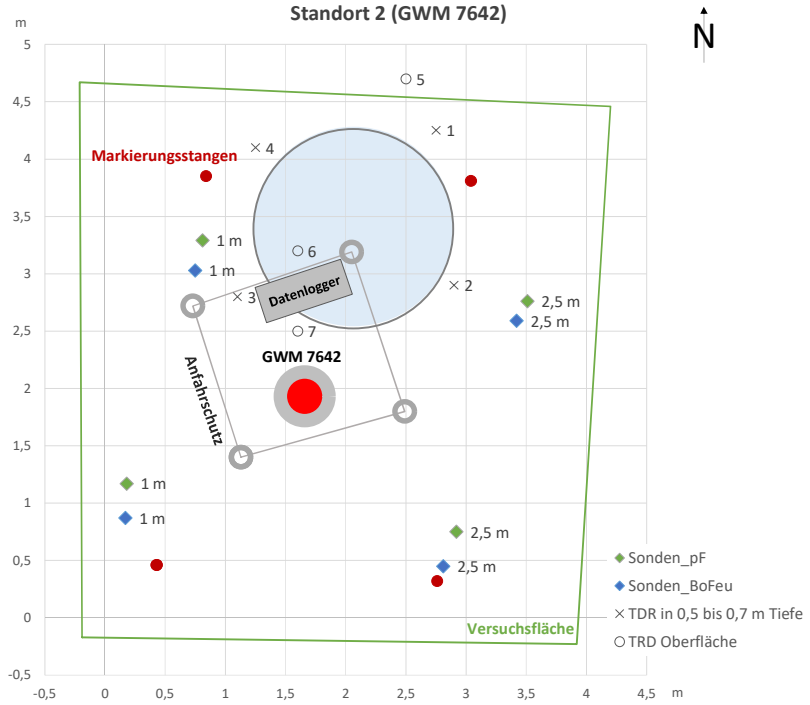

Abb. 5-2 Lagebeschreibung am Standort 2 und Lage der Sonden

Abb. 5-3 links: Aufbau des Versuchs am Standort 2; rechts: Wasserzugabe während des Versuchs

5.2 Vorläufige Auswertung

Für den Infiltrationsversuch am Standort 2 wurden die stationären Infiltrationsraten i_f mithilfe der kumulativen Infiltration berechnet. Die stationäre Infiltrationsrate ergibt sich hierbei als Steigung der Geraden im stationären Bereich (vgl. Abb. 5-4). Die stationäre Infiltrationsrate i_f beträgt für den Versuch 3 am Standort 2 (ohne Bewuchs) etwa 6,13 mm/min bzw. 367,8 mm/h. Die Randbedingungen für die den Versuche am Standort 3 ist in der folgenden Tab. 5-1 zusammengestellt.

Tab. 5-1 Randbedingungen für den Feldversuch am Standort 2 sowie die aus der kumulativen Infiltration (s. Abb. 5-4) die ermittelte stationäre Infiltrationsrate i_f

	Einheit	Versuch Standort 2
		ohne Bewuchs
Ring-Durchmesser	m	1,60
Fläche	m²	2,011
Überstauhöhe	m	0,02
Infiltrierte Wassermenge	m³	8,34
stationäre Infiltrationsrate i_f	mm/min	6,13
	mm/h	367,8
Bodentyp (Abschätzung)[*)]		mittel schluffiger Sand

[*)] gem. Shukla & Lai, 2006

Entsprechend dem Wert der stationären Infiltrationsrate in Höhe von 367,8 mm/h kann die Bodenart grob als mittel schluffiger Sand klassifiziert werden (vgl. Abb. 2-3).

Der Korrekturfaktor f wurde für den Versuch am Standort 2 mittels der resultierten stationären Infiltrationsraten bzw. den abgeschätzten Bodenparameter $\alpha = 0{,}124\ cm^{-1}$ (Carsel & Parrish, 1988) mit etwa 1,22 berechnet. Somit beträgt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit etwa

K_s = 6,13 mm/min / 1,22 = 5,02 mm/min = ***3,4 · 10^{-5} m/s***.

Insgesamt konnten aufgrund der Reichweite des Versickerungsversuchs nur das in 2,5 m befindliche Sondenpaar angesprochen werden. Hierbei zeigte sich, wie auch in den beiden anderen Versuchen, dass die Feuchtefront in Richtung N/NO strömt. Die westlich liegenden Sensoren in 1 m Tiefe zeigten keine Reaktion (vgl. Lage der Sensoren in Abb. 5-2).

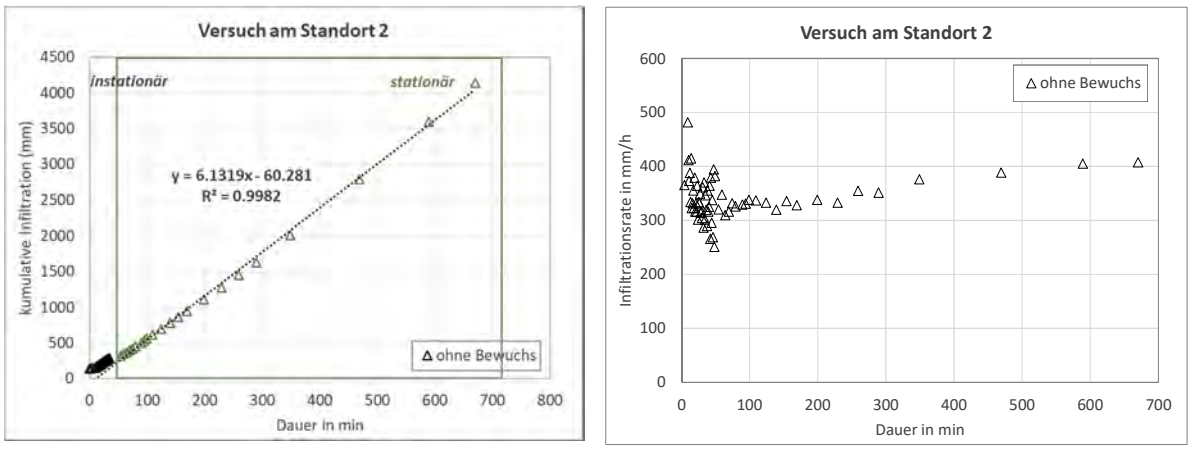

Abb. 5-4 links: Darstellung der kumulativen Infiltration in mm und die ermittelte Steigung (≙ Infiltrationsrate if) unter stationären Bedingungen; rechts: Entwicklung der Infiltrationsrate if in mm/h während des Versuchs

Aus Abb. 5-5 ist erkennbar, dass der Bodenfeuchtesensor und auch der Saugspannungssensor nach etwa 30 min sprunghaft von 26 % auf 42 % ansteigt, bzw. von 1,7 auf 0 absinkt. Auch hier scheint eine Gängigkeit in den Sondenbohrlöchern vorzuliegen.

Nach Beendigung des Versickerungsversuchs sinkt die Bodenfeuchte allmählich ab. Die pF-Kurve zeigt hingegen eine leichte Verzögerung, ehe eine Zunahme des pF-Wertes sichtbar wird. Der Abtrocknungsprozess ist bisher noch nicht vollständig abgeschlossen.

Für die Kalibrierung des 2D-Modells bzw. die inverse Modellierung zur Ermittlung der bodenspezifischen Parameter wird der Abtrocknungsprozess im Mittelpunkt stehen.

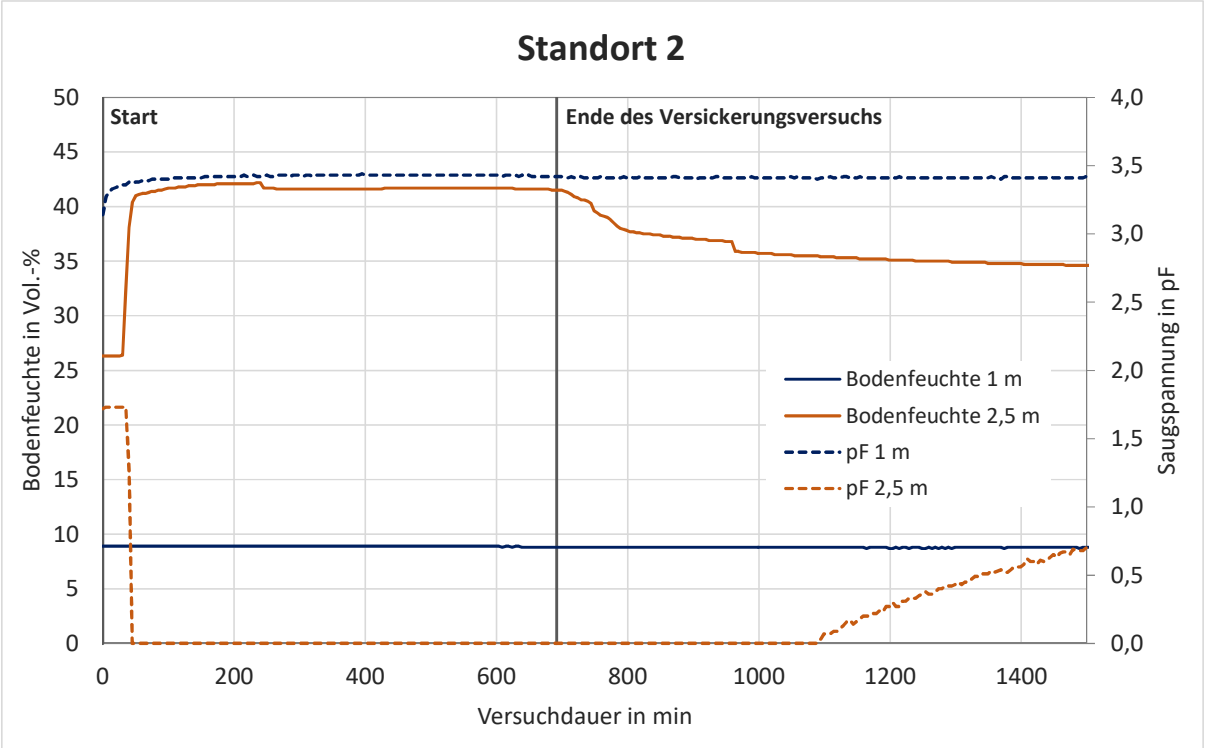

Abb. 5-5 Messwerte der Bodenfeuchte- und Saugspannungssensoren in 1 m und 2,5 m Tiefe am Standort 2

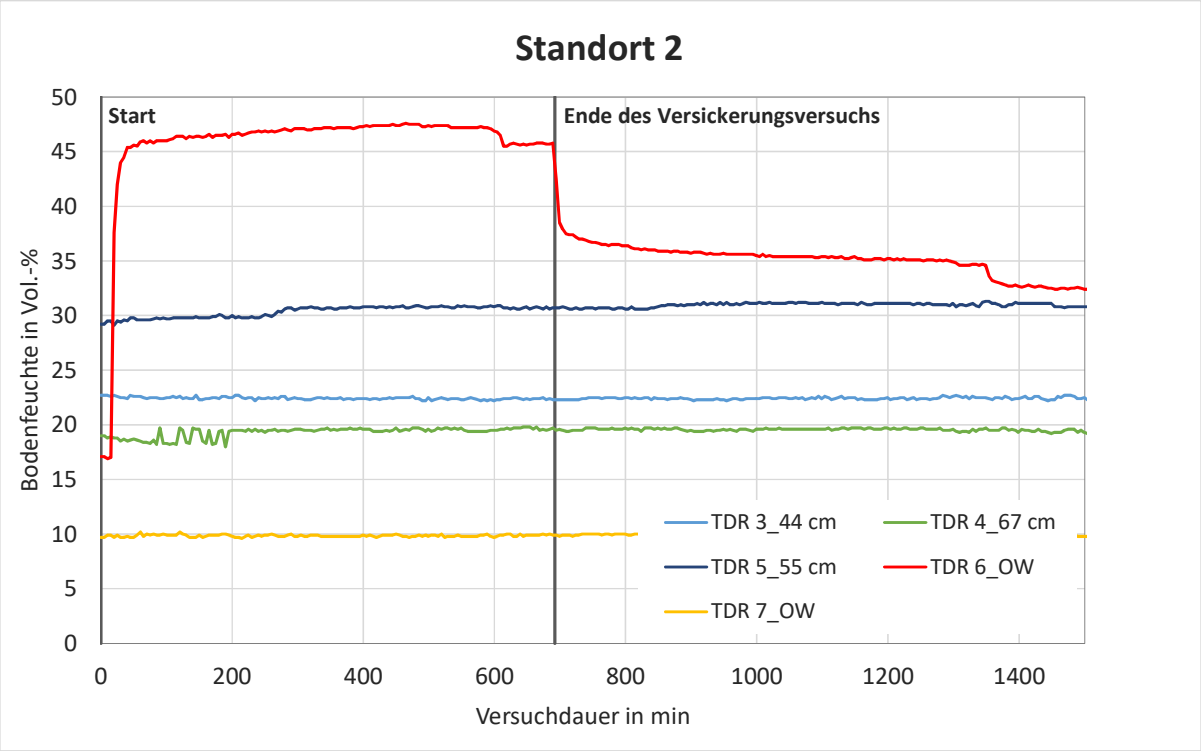

Abb. 5-6 Messwerte der TDR-Sonden innerhalb und außerhalb des Versickerungsrings an der Oberfläche (OF) und in 0,5 m Tiefe (Anordnung siehe Abb. 5-2)

6 Zusammenfassung

Im Jahr 2019 erfolgte im Rahmen der *„Ingenieurtechnischen Begleitung zur Erfolgskontrolle und Prognosefortschreibung der Wirkungsprognosen der Maßnahme 5.1 zur Reduzierung des Sickerwasserstroms durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Kippenfläche Witznitz“* der Aufbau des Sondermessprofils an denen seither die Entwicklung der Bodenfeuchte und der Saugspannung an drei Standorten in zwei Tiefen (1,0 m und 2,5 m) beobachtet wird. Dieses Sondermessprofil dient der Nachverfolgung des Sickerwasserstroms auf der Kippe Witznitz und dessen Einfluss auf die GW-Neubildung. Ziel ist es, durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung mit Luzerne die GW-Neubildung nachhaltig zu reduzieren, um die Exfiltration von eisen- und sulfathaltigem Wasser in die Pleiße vermindern.

Des Weiteren wird im Jahr 2021 die Langfristprognose zur Entwicklung der Kippen-Grundwasserstände in Abhängigkeit der Bewirtschaftung aktualisiert.

Für die Langfristprognose wurde ein 2D-Modell mit HYDRUS aufgebaut, welches anhand der Messwerte des Sondermessprofils kalibriert werden soll. Aufgrund der Trockenheit im Jahr 2019 und auch 2020 wurden insbesondere an den tiefen Beobachtungspunkten keine Änderung der Bodenfeuchte und der Saugspannung (pF) beobachtet. Um eine verbesserte Kalibrierung des 2D-Modells zu erreichen, wurden deshalb großräumige Versickerungsversuche (1,6 bis 3,1 m Ring-∅) durchgeführt.

Es wurde am Standort 1 etwa 6,2 m³, am Standort 2 etwa 8,3 m³ und am Standort 3 etwa 6,7 m³ Wasser infiltriert. Am Standort 1 und 3 konnten während des Infiltrationsversuches alle Sonden angesprochen werden. Allerdings zeigten die Messwerte einen sehr schnellen Anstieg der Bodenfeuchte bzw. sehr schnellen Abfall der pF-Werte, was darauf schließen lässt, dass die Bohrlöcher, in denen die Sonden verbracht wurden, Gängigkeiten aufweisen. Am Standort 2 wurde ein kleinerer Ring verwendet, der außerhalb der Sondenbohrlöcher lag. Aber auch hier wurde eine Gängigkeit an einem Sondenpaar festgestellt.

Für die Kalibrierung des 2D-Modells bzw. die inverse Modellierung zur Ermittlung der bodenspezifischen Parameter wird aufgrund der zu schnellen Messsignale der Abtrocknungsprozess im Mittelpunkt stehen.

Aus den ermittelten Versickerungsraten kann geschlussfolgert werden, dass es sich bei dem anstehenden Kippenmaterial voraussichtlich um mittel schluffigen Sand bis stark lehmigen Sand handelt. Die abgeschätzten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten liegen demnach bei etwa $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ m/s bis $3{,}6 \cdot 10^{-5}$ m/s und sind somit höher, als bisher angenommen.

Es konnte aber auch festgestellt werden, dass die hydraulischen Leitfähigkeiten lokal (horizontal wie auch vertikal) sehr große Unterschiede aufweisen. So wurden bei kleinskaligen Vorversuchen am Standort 1 wesentlich geringere Infiltationsraten gemessen (k_f = 1,9 - $9{,}5 \cdot 10^{-7}$ m/s), die auf Lehm oder Ton hinweisen. Es konnte somit bestätigt werden, dass der Kippenkörper eine hohe Anisotropie aufweist.

Die Versickerungsversuche führten insgesamt zu einem besseren Verständnis über den Aufbau und der Zusammensetzung des Untergrundes und helfen, die Anpassung des 2D-Modells voranzutreiben.

7 Literatur

Al-Hassoun, R. (2009). Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.

Carsel, R. F. & Parrish, R. S. (1988). Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. Water Resources Research, Vol. 24, No. 5, p. 755-769.

Shukla, M. K., & Lal, R. (2006). Water Infiltration in Soil. The Ohio State University, Columbus, Ohio, U.S.A. Encyclopedia of Soil Science DOI: 10.1081/E-ESS- 120006659.

Wu, L.; Pan, L.; Mitchell, J. & Sanden, B. (1999). Measuring Saturated Hydraulic Conductivity using a Generalized Solution for Single-Ring Infiltrometers. Soil Science Society of America Journal, Vol. 63, No. 4, p. 788-792.

Anlage 1

Schichtenprofile für den Standort 1, 2 und 3

Anlage 2

Infiltrationsmengen am Standort 1, 2 und 3

Versuch 1 am Standort 1

Dauer	Durchflussmenge Wasseruhr	Differenz	Durchflussmenge kumuliert
min	m³	m³	m³
0	3,1742	0,0000	0,00
6	3,1822	0,0080	0,01
7	3,1834	0,0012	0,01
8	3,1834	0,0000	0,01
9	3,1834	0,0000	0,01
10	3,188	0,0046	0,01
11	3,1948	0,0068	0,02
14	3,2009	0,0061	0,03
17	3,2102	0,0093	0,04
20	3,218	0,0078	0,04
24	3,2236	0,0056	0,05
26	3,2309	0,0073	0,06
28	3,2363	0,0054	0,06
30	3,2407	0,0044	0,07
35	3,2533	0,0126	0,08
40	3,2617	0,0084	0,09
45	3,2774	0,0157	0,10
50	3,2904	0,0130	0,12
55	3,3032	0,0128	0,13
60	3,3167	0,0135	0,14
65	3,3283	0,0116	0,15
75	3,3531	0,0248	0,18
85	3,3765	0,0234	0,20
95	3,4004	0,0239	0,23
105	3,4263	0,0259	0,25
115	3,4498	0,0235	0,28
125	3,476	0,0262	0,30
140	3,5151	0,0391	0,34
155	3,5532	0,0381	0,38
170	3,5998	0,0466	0,43
185	3,6384	0,0386	0,46
200	3,6814	0,0430	0,51
215	3,724	0,0426	0,55
230	3,7636	0,0396	0,59
260	3,8516	0,0880	0,68
305	3,9799	0,1283	0,81
501	4,5922	0,6123	1,42
530	4,6833	0,0911	1,51
885	5,7866	1,1033	2,61
915	5,973	0,1864	2,80

Dauer	Durchflussmenge Wasseruhr	Differenz	Durchflussmenge kumuliert
min	m³	m³	m³
960	6,1299	0,1569	2,96
1155	6,8398	0,7099	3,67
1175	6,915	0,0752	3,74
1205	7,019	0,1040	3,84
1235	7,1482	0,1292	3,97
1265	7,2642	0,1160	4,09
1295	7,3825	0,1183	4,21
1325	7,501	0,1185	4,33
1355	7,6185	0,1175	4,44
1385	7,74	0,1215	4,57
1415	7,8593	0,1193	4,69
1445	7,9802	0,1209	4,81
1475	8,1043	0,1241	4,93
1505	8,2306	0,1263	5,06
1535	8,357	0,1264	5,18
1565	8,4828	0,1258	5,31
1595	8,6107	0,1279	5,44
1775	9,3679	0,7572	**6,19**

Versuch 2 am Standort 3

Dauer	Durchflussmenge Wasseruhr	Differenz	Durchflussmenge kumuliert
min	m³	m³	m³
0	1308,01	0,0000	0,00
32	1308,93	0,9236	0,92
46	1309,49	0,5581	1,48
48	10,42	0,0000	1,48
53	10,49	0,0753	1,56
58	1309,75	0,0000	1,56
63	1309,91	0,1540	1,71
68	1310,00	0,0922	1,80
73	1310,14	0,1378	1,94
78	1310,22	0,0840	2,02
83	1310,34	0,1221	2,15
88	1310,47	0,1223	2,27
93	1310,57	0,1055	2,37
98	1310,70	0,1262	2,50
103	1310,76	0,0632	2,56
108	1310,86	0,0952	2,66
113	1310,96	0,1083	2,77
118	1311,08	0,1180	2,89
123	1311,19	0,1062	2,99
128	1311,28	0,0915	3,08
133	1311,37	0,0942	3,18
138	1311,47	0,0988	3,28
143	1311,57	0,0983	3,37
148	1311,66	0,0908	3,47
153	1311,76	0,0963	3,56
158	1311,85	0,0965	3,66
163	1311,95	0,0930	3,75
178	1312,22	0,2703	4,02
193	1312,48	0,2662	4,29
208	1312,75	0,2688	4,56
223	1313,02	0,2677	4,82
238	1313,27	0,2456	5,07
258	1313,52	0,2524	5,32
268	1313,72	0,1978	5,52
283	1314,04	0,3281	5,85
298	1314,29	0,2425	6,09
338	1314,89	0,5988	**6,69**

Versuch 3 am Standort 2

Dauer	Durchflussmenge Wasseruhr	Differenz	Durchflussmenge kumuliert
min	m³	m³	m³
0	10,494	0,0000	0,00
4	10,543	0,0490	0,05
9	10,624	0,0807	0,13
10	10,638	0,0138	0,14
11	10,650	0,0125	0,16
12	10,663	0,0130	0,17
13	10,675	0,0112	0,18
14	10,688	0,0139	0,19
15	10,699	0,0108	0,20
16	10,710	0,0111	0,22
17	10,722	0,0119	0,23
18	10,733	0,0108	0,24
19	10,746	0,0127	0,25
20	10,756	0,0106	0,26
21	10,767	0,0111	0,27
22	10,778	0,0106	0,28
23	10,790	0,0122	0,30
24	10,800	0,0101	0,31
25	10,812	0,0112	0,32
26	10,823	0,0111	0,33
27	10,834	0,0117	0,34
28	10,845	0,0105	0,35
29	10,855	0,0106	0,36
30	10,866	0,0102	0,37
31	10,878	0,0121	0,38
32	10,887	0,0096	0,39
33	10,900	0,0124	0,41
34	10,910	0,0101	0,42
35	10,921	0,0116	0,43
36	10,932	0,0107	0,44
37	10,942	0,0097	0,45
38	10,954	0,0119	0,46
39	10,964	0,0106	0,47
40	10,975	0,0109	0,48
41	10,987	0,0122	0,49
42	10,996	0,0089	0,50
43	11,009	0,0127	0,51
44	11,019	0,0099	0,52
45	11,030	0,0113	0,54
46	11,039	0,0090	0,54

Dauer	Durchflussmenge Wasseruhr	Differenz	Durchflussmenge kumuliert
min	m³	m³	m³
47	11,052	0,0132	0,56
48	11,061	0,0084	0,57
49	11,074	0,0128	0,58
54	11,127	0,0536	0,63
59	11,185	0,0582	0,69
64	11,237	0,0518	0,74
69	11,290	0,0529	0,80
74	11,346	0,0555	0,85
79	11,400	0,0546	0,91
89	11,510	0,1102	1,02
94	11,566	0,0554	1,07
99	11,622	0,0566	1,13
109	11,735	0,1128	1,24
124	11,902	0,1670	1,41
139	12,063	0,1606	1,57
154	12,232	0,1687	1,74
169	12,396	0,1648	1,90
199	12,736	0,3395	2,24
229	13,070	0,3346	2,58
259	13,427	0,3563	2,93
289	13,780	0,3531	3,29
349	14,535	0,7556	4,04
469	16,098	1,5621	5,60
589	17,725	1,6272	7,23
670	18,830	1,1054	**8,34**