

Grundlage für eine Beurteilung des Transmissionsrisikos von
Fasciola hepatica: Logistische Regressionsmodelle zur
Vorhersage des Auftretens von *Galba truncatula* in der
Schweiz

von Anne-Sophie Rößler

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München

Grundlage für eine Beurteilung des Transmissionsrisikos von
Fasciola hepatica: Logistische Regressionsmodelle zur
Vorhersage des Auftretens von *Galba truncatula* in der
Schweiz

von Anne-Sophie Rößler

aus Traunstein

München 2016

Aus dem Zentrum für Klinische Tiermedizin der Tierärztlichen
Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Lehrstuhl für Innere Medizin und Chirurgie der Wiederkäuer

Arbeit angefertigt unter der Leitung von:
Univ.-Prof. Dr. Gabriela Knubben-Schweizer

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians Universität München**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Gabriela Knubben-Schweizer

Korreferenten: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger
Priv.-Doz. Dr. Ivica Medugorac
Priv.-Doz. Dr. Sven Reese
Prof. Dr. Sabine André

Tag der Promotion: 16. Juli 2016

Meiner Familie

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG	1
II.	LITERATURÜBERSICHT	3
1.	Fasciolose	3
1.1.	Epidemiologie der Fasciolose	3
1.2.	Wirtschaftliche Bedeutung der Fasciolose	4
1.3.	Entwicklungszyklus des Großen Leberegels.....	4
1.4.	Der Zwischenwirt <i>Galba truncatula</i>	6
1.4.1.	Allgemeine Charakteristika der Zwergschlammschnecke	6
1.4.2.	Lebensraum und Nahrung von <i>Galba truncatula</i>	6
1.4.3.	Fortpflanzung	8
1.4.4.	Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenheit und Kälte	8
1.5.	Bekämpfung der Fasciolose	10
2.	Mathematische und räumliche Modelle zur Fasciolose.....	11
2.1.	Geschichte mathematischer und epidemiologischer Modelle.....	12
2.2.	Modelle in der Parasitologie	13
2.3.	Modelle zur Fasciolose	14
2.3.1.	Frühe Vorhersagemodelle	14
2.3.2.	Neuere Modelle ab 1992	17
2.3.2.1.	Das Prinzip GIS-gestützter Modelle	17
2.3.2.2.	Chronologie und Inhalte neuerer Modelle	18
2.3.2.3.	Ein Risikomodell für die Schweiz.....	28
III.	MATERIAL UND METHODEN	29
1.	Projektbeschreibung	29
2.	Beteiligte Institutionen	29
3.	Generierung des Datensatzes	29
3.1.	Daten zum Vorkommen von <i>Galba truncatula</i>	30
3.1.1.	Quellen für Rohdaten	30
3.1.2.	Kartieren untersuchter Geländepunkte.....	31
3.1.3.	Datierung der Felduntersuchungen	32
3.1.4.	Selektion und Bereinigung der Daten	32
3.2.	Potentielle Einflussgrößen (Kovariablen).....	33

3.2.1.	Gelände- und bodenabhängige Einflussgrößen.....	33
3.2.1.1.	Schweizer Landeskarten.....	34
3.2.1.2.	Vegetation	35
3.2.1.3.	Höhe über N. N.	36
3.2.1.4.	Hanglagen	37
3.2.1.5.	Biotope für <i>Galba truncatula</i>	37
3.2.1.6.	Bodeneigenschaften	39
3.2.1.7.	Boden- und klimassozierte Eigenschaften	42
3.2.2.	Klimaabhängige Einflussgrößen	44
3.2.2.1.	Temperaturparameter	44
3.2.2.2.	Niederschlag, Feuchte und Sonneneinstrahlung	45
3.2.2.3.	Datengranularität und -zeitraum	45
3.2.2.4.	Datenbezugsquellen	46
3.2.2.5.	Auswahl repräsentativer Wetterstationen.....	46
3.2.2.6.	Reduktion berücksichtigter Klimavariablen.....	50
3.3.	Datenbearbeitung und Konfigurieren weiterer Variablen.....	52
4.	Redefinition übergeordneter Kategorien.....	54
5.	Logistische Regression (<i>LASSO</i>-Verfahren).....	55
IV.	ERGEBNISSE	58
1.	Absolute Häufigkeit kategorialer Merkmalsausprägungen.....	58
2.	Schätzergebnisse beider Regressionsverfahren.....	58
2.1.	Referenzkategorien kategorialer Variablen.....	60
2.2.	Das <i>grplasso</i> -Modell.....	61
2.2.1.	Einflussreichste Kovariablen des <i>grplasso</i> -Modells.....	61
2.2.2.	Einflussärmere Kovariablen des <i>grplasso</i> -Modells	63
2.3.	Das <i>glmmLasso</i> -Modell	64
2.4.	Gemeinsamkeiten beider Modelle.....	66
V.	DISKUSSION	67
1.	Datenerhebung zum Vorkommen von <i>Galba truncatula</i>.....	67
2.	Weiterverarbeitung und Selektion der Daten	69
3.	Genauigkeit der Daten zu Ziel- und Kovariablen	70
4.	Vor- und Nachteile der gewählten Regressionsverfahren.....	77

5.	Nicht auswertbare Kovariablen	78
6.	Nicht-selektierte Kovariablen beider Regressionsmodelle	80
6.1.	Variablen des ökologischen Netzwerkes REN.....	80
6.2.	Vernässung.....	81
6.3.	Gesteinklassierung.....	82
6.4.	Grundwasserzusatz.....	82
6.5.	Nährstoffspeichervermögen.....	83
6.6.	Niederschlagshaushalt und niederschlagsabhängige Klimavariablen.....	83
7.	Von beiden Modellen ausgewählte Kovariablen	86
7.1.	Selektierte boden- und geländeabhängige Einflussfaktoren.....	86
7.1.1.	Die Bedeutung von Riet, Feuchtflächen, Hangwasseraustritten und Gewässern.....	86
7.1.2.	Der Einfluss der Vegetation.....	88
7.1.3.	<i>Grundwasservorkommen</i> und ihre Bedeutung.....	89
7.1.4.	Zusammenhänge zwischen der <i>Höhe über N. N.</i> und dem Schnecken-vorkommen.....	91
7.1.5.	Lithologische Hauptgruppen als selektierte Einflussgrößen.....	93
7.1.6.	<i>Bodeneignung für Kulturland</i> und Zwergschlammschnecken.....	95
7.1.7.	Die Kovariable <i>Klimaeignung Übersicht</i>	98
7.1.8.	Die <i>Wasserdurchlässigkeit</i> des Bodens.....	99
7.1.9.	Die <i>Gründigkeit</i> des Bodens.....	99
7.2.	Selektierte Klimavariablen.....	100
8.	Vergleich der beiden Regressionsmodelle	105
8.1.	Gemeinsamkeiten der Modelle.....	105
8.2.	Vor- und Nachteile des jeweiligen Modells.....	105
9.	Fazit	107
VI.	ZUSAMMENFASSUNG	109
VII.	SUMMARY	111
VIII.	LITERATURVERZEICHNIS	113
IX.	ANHANG	138
1.	Abbildungsverzeichnis	138

2.	Tabellenverzeichnis.....	138
3.	Qualitätsinformationen zu Daten des IDAweb.....	141
3.1.	Plausibilitätsinformationen	141
3.2.	Mutationsinformationen	141
4.	Tabellen des Anhangs	142
X.	DANKSAGUNG.....	166

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Beschreibung
atm	physikalische Atmosphäre
ArcGIS	Geoinformationssystem-Software-Produktgruppe der Firma ESRI (Environmental Systems Research Institute)
BIC	Bayesian Information Criterion (Kriterium zur Auswahl eines Modells in der Statistik unter Ausbalancierung der Anpassungsgüte und Modellkomplexität an die zur Verfügung stehenden Daten)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
bzw.	beziehungsweise
β_0	beta Null (Intercept)
$\widehat{\beta}_p$	beta Dach (geschätzte Regressionskoeffizienten)
CSCF	Centre Suisse de Cartographie de la Faune (Schweizer Zentrum für die Kartografie der Fauna)
CSV	Comma-separated values
d.h.	das heißt
DWD	Deutscher Wetterdienst
e	Eulersche Zahl
ELISA	Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (Antikörper-basiertes Nachweisverfahren mit enzymatischer Farbreaktion)
ETakt	reelle, aktuelle bzw. tatsächliche Verdunstung, die vom jeweiligen Wasserdargebot abhängt (durch Messungen ermittelt)
ETpot	maximal mögliche Verdunstung unter den jeweiligen meteorologischen Bedingungen
EVI	Enhanced Vegetation Index (im Vergleich zum NDVI sensitiverer Vegetationsindex für stark bewachsene Flächen)
F1	erste Tochtergeneration
F2	zweite Tochtergeneration
FAQ	Frequently Asked Questions
GEOSTAT	Vertriebsmodell für Geodaten der Bundesstatistik
GEWISS	Gewässerinformationssystem des Bundesamtes für Umwelt
GIS	Geographisches Informationssystem
GL(M)Ms	Generalized Linear (Mixed) Model (Generalisiertes Lineares (Gemischtes) Regressionsmodell)

Abkürzung	Beschreibung
glmmLasso	Algorithmus zur Variablenselektion für Generalisierte Lineare Gemischte (Regressions-) Modelle via modifiziertem vollem Gradientenverfahren
grplasso	Group Lasso (Lasso-Verfahren, das die Zusammengehörigkeit verschiedener Kategorien einer kategorialen Variablen bei der Variablenselektion berücksichtigt)
ID	Identifikator
IDAweb	Internetportal des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz zur Bereitstellung von Klimadaten
KML	Keyhole Markup Language
KQ-Methode	Methode der kleinsten Quadrate (Methode zur Modellparameterschätzung, die eine Minimierung der Residuenquadratsumme anstrebt)
λ_{opt}	optimaler Tuning-Parameter, der das Ausmaß der Bestrafung von Regressionskoeffizienten und damit die Sparsamkeit eines Modells steuert
LASSO	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (statistisches Verfahren zur Modellschrumpfung und Variablenselektion)
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität
\ln	Logarithmus naturalis
\log	Logarithmus
m	Meter
max.	maximal
MeteoSchweiz	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
min.	minimal
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
N. N.	Normalnull
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index (auf der Messung von Strahlungsreflexion basierender jährlicher Vegetationsindex)
n	Gesamtzahl/ Stichprobenumfang
$P(A)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis A eintritt
P Generation	Elterngeneration
PDF	Portable Document Format
PLZ	Postleitzahl
π_i	pi "i" (Wahrscheinlichkeit eines Schneckenfundes)
R	Open Source Software für die statistische Datenanalyse

Abkürzung	Beschreibung
REN	Réseau Ecologique National (nationales ökologisches Netzwerk; vom Bundesamt für Umwelt herausgegebenes Kartenwerk zur Darstellung ökologischer Lebensräume)
SIR-Modell	Susceptible-Infected-Recovered-Modell (epidemiologisches Modell zur Beschreibung der Ausbreitung ansteckender Krankheiten mit Immunitätsbildung unter Gliederung der Gesamtpopulation in drei Kompartimente)
swissALTI ^{3D}	digitales Höhenmodell des Bundesamtes für Landestopographie swisstopo
swisstopo	Bundesamt für Landestopographie
spp.	Spezies (Plural)
$\hat{\sigma}_b$	geschätzte Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen um ihren Erwartungswert
Temp.	Temperatur
vgl.	vergleiche
v.s.	versus
x_{ip}	Kovariablen/ Faktoren
y_i	Zielvariable (Vorkommen von <i>Galba truncatula</i>)
°C	Grad Celsius
%	Prozent
Ø	Durchschnitt
=	gleich
>	größer als
<	kleiner als
≥	größer oder gleich
≤	kleiner oder gleich
	Betrag von

BEGRIFFSERKLÄRUNGEN

Begriff	Erklärung
Deterministisches Modell	(im Gegensatz zum stochastischen) nach gesetzmäßigen Ursache-Wirkungsbeziehungen strukturiertes Modell ohne wahrscheinlichkeitstheoretischen Bezug
Clusteranalyse	algorithmisches Verfahren zur Ermittlung von Ähnlichkeitsstrukturen in umfangreichen Datensätzen
Devianz	Maß für die Abweichung zwischen Daten und Modell, basierend auf dem Logarithmus der Maximum Likelihood
Dummycodierung	Verfahren zur Umwandlung einer k -stufigen kategorialen Variable in $k - 1$ dichotome Variablen
Gemischtes Modell	Regressionsmodell, das feste und zufällige Effekte enthält
Kreuzvalidierung	statistisches Testverfahren zur Bestimmung der Anpassungsgüte eines Modells durch Teilung des Datensatzes in Teilmengen zur Parameterschätzung und zur Prüfung des Modellfehlers
Inzuchtdepression	Leistungsminderung (erhöhte Krankheitsanfälligkeit) einer Population infolge von Inzucht
Logit	Logarithmus eines Odds
Logit-Modell	Regressionsverfahren zur Modellierung der Verteilung bestimmter abhängiger Variablen über den Logarithmus des Odds
Odds	Verhältnisse zwischen Wahrscheinlichkeit und Gegenwahrscheinlichkeit
Overfitting	übermäßige Optimierung der Anpassungsgüte eines Modells an die gegebenen Daten mit der Folge einer Berücksichtigung irrelevanter Variablen aufgrund von Zufallseffekten
Penalisierung	„Schrumpfung“ der Absolutbeträge von Schätzparametern mit dem Ziel einer Modellregularisierung und Variablenselektion
Purging	Inzuchterholung (Minderung oder Eliminierung negativer Inzuchteffekte bei Vorherrschen eines starken Selektionsdruckes auf Fitness in der ingezüchteten Population)
random effects	zufällige, individualspezifische Effekte, welche die Ausprägung einer abhängigen Variable im Sinne einer unbeobachtbaren Heterogenität (neben messbaren festen Effekten) beeinflussen

I. EINLEITUNG

Fasciola hepatica, der Große Leberegel, gilt als weltweit vorkommende, pathogene Trematode bei Wiederkäuern (CHARLIER et al., 2014a). Seine unmittelbare Schadwirkung entfaltet der Parasit in erster Linie durch die Zerstörung von Leberparenchym, das Auslösen innerer Blutungen und eine Verkalkung von Gallengängen (ROSS und DOW, 1966; ARMOUR, 1975; SCHNIEDER, 2006). Beim Rind dominieren subklinische, chronische Verläufe. (KAPLAN, 2001). Dennoch muss, neben einer erhöhten Empfänglichkeit für Sekundärinfektionen (AITKEN et al., 1978; VAESSEN et al., 1998), von einem negativen Effekt auf die Gewichtszunahme, Milchleistung und Fruchtbarkeit betroffener Tiere ausgegangen werden (BLACK und FROYD, 1972; LOPEZ-DIAZ et al., 1998; TORGERSON und CLAXTON, 1999), der sich in beträchtlichen wirtschaftlichen Verlusten niederschlägt. So beziffern SCHWEIZER et al. 2005 die mittleren Verluste pro infiziertem Rind in der Schweiz auf 299 Euro. Diese entsprechen einer vermutlich Fasciolose-bedingten Verminderung der Gewichtszunahmen um 9 %, einer Reduktion der Milchleistung um 10 % sowie einer messbaren Verschlechterung von Fertilitätsparametern. Neuere Studien (LOYACANO et al., 2002; CHARLIER et al., 2007; CHARLIER et al., 2009; MEZO et al., 2011; SANCHEZ-VAZQUEZ und LEWIS, 2013) schätzen die Verluste etwas geringer ein, messen der Fasciolose des Rindes aber ebenfalls eine hohe wirtschaftliche Bedeutung bei.

Neben dieser darf jedoch auch der direkte Effekt einer Infestation mit dem Großen Leberegel auf den Menschen nicht unbeachtet bleiben. Die WHO (World Health Organization) warnt vor einer Zunahme humaner Fasciolose-Fälle und stützt sich dabei auf Veröffentlichungen, die von weltweit 2,4 bis 17 Millionen mit *Fasciola hepatica* oder *Fasciola gigantica* infizierten Menschen ausgehen (HOPKINS, 1992; FÜRST et al., 2012).

Aus jener komplexen Bedeutung des Großen Leberegels heraus ergibt sich die Notwendigkeit, Regionen, in denen ein erhöhtes Risiko für die Übertragung von *Fasciola hepatica* besteht, frühzeitig zu erkennen, um weitergehende Untersuchungen einleiten und Bekämpfungsmaßnahmen ergreifen zu können. Erste Versuche, die Inzidenz der Fasciolose in Abhängigkeit von klimatischen

Bedingungen vorherzusagen, wurden 1959 von OLLERENSHAW und ROWLANDS in Großbritannien unternommen.

Es folgten weitere Modelle für die USA, Afrika, den südamerikanischen Kontinent und Australien (MALONE et al., 1992; YILMA und MALONE, 1998; TUM et al., 2004; DURR et al., 2005; DUTRA et al., 2010) sowie für Europa (CRINGOLI et al., 2002; RAPSCH et al., 2008; MCCANN et al., 2010a; BENNEMA et al., 2011; CHARLIER et al., 2011). Die meisten dieser Modelle treffen ihre Vorhersagen jedoch auf der Basis grobmaschiger Raster und wurden nicht oder unzureichend validiert.

Für die Schweiz entwickelten RAPSCH et al. 2008 ein Risikomodell mit einer angestrebten Genauigkeit von 100 Metern x 100 Metern. Der Einfluss verschiedener klimatischer Parameter auf den Entwicklungszyklus des Großen Leberegels wurde hierbei auf der Grundlage von Literaturangaben berechnet. Es entstand eine Risikokarte für die Schweiz, deren Überprüfung im Feld eine nur unzureichende Sensitivität und Spezifität ergab (BAGGENSTOS et al., 2016). Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde der Versuch unternommen, das Vorkommen der Zwergschlammschnecke, *Galba truncatula* (MÜLLER, 1774), in Abhängigkeit von klimatischen und topographischen Gegebenheiten neu zu modellieren. Da *Fasciola hepatica* in seiner Entwicklung auf die Zwergschlammschnecke als essentiellen Zwischenwirt angewiesen ist, stellen die im Folgenden beschriebenen Regressionsmodelle den ersten wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem umfassenden Transmissionsmodell dar.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Fasciolose

Die Fasciolose betrifft weltweit insbesondere Wiederkäuer, aber auch andere pflanzenverzehrende Säugetierarten wie Pferde, Schweine, Kaninchen, Hasen, Biberraten, Alpakas und den Menschen (ECKERT et al., 1975; SCHNIEDER, 2006; CHARLIER et al., 2014a). Sie beruht auf einer Infektion mit *Fasciola hepatica*, dem Großen Leberegel, oder *Fasciola gigantica*, dem Riesenleberegel, wobei letzterer in den Tropen und Subtropen überwiegt. *Fasciola hepatica* ist an das Vorkommen als Zwischenwirte geeigneter Süßwasserschnecken gebunden. Innerhalb Mitteleuropas ermöglicht ihm vorrangig die amphibisch lebende Zwergschlamm Schnecke, *Galba truncatula*, eine Komplettierung seines heteroxenen Entwicklungszyklus (SCHNIEDER, 2006).

1.1. Epidemiologie der Fasciolose

Mit der Ausbreitung der Zwergschlamm Schnecke von Europa auf andere Kontinente ging und geht eine Zunahme der weltweiten Prävalenz von *Fasciola hepatica* einher, die nicht zuletzt auf eine erhöhte Anpassungsfähigkeit des Zwischenwirtes zurückzuführen ist (MURRELL und FRIED, 2007; MAS-COMA et al., 2008; MORGAN et al., 2013; CHARLIER et al., 2014a). Darüber hinaus muss auch innerhalb einzelner Länder mit einer gesteigerten Häufigkeit des Auftretens von *Fasciola*-Infektionen gerechnet werden. Während frühere Studien zur bovinen Fasciolose in der Schweiz eine Prävalenz von etwa 10 % angenommen hatten (ECKERT et al., 1975; DUCOMMUN und PFISTER, 1991; SCHWEIZER et al., 2003), gehen RAPSCH et al. 2006 von einer Prävalenz um 18 % bei Schlachtrindern aus. Ähnliche Anstiege sind in weiteren Ländern zu verzeichnen, wobei die Autoren darauf hinweisen, dass neben einer tatsächlichen Zunahme an Leberegelerkrankungen, auch bessere diagnostische Möglichkeiten die Verhältnisse adäquater widerspiegeln, als es noch vor einigen Jahren der Fall war (RAPSCH et al., 2006; VAN DIJK et al., 2010; FAIRWEATHER, 2011). Tatsächliche Zunahmen der Prävalenz werden auf den Klimawandel mit milderen Wintern und starken Regenfällen sowie auf eine Verschlechterung der Resistenzlage von Anthelminthika zurückgeführt (MAS-COMA et al., 2009b, 2009a; MCCANN et al., 2010b). Hinzu kommt die enorme Adaptivität von *Galba*

truncatula, welche die Aufrechterhaltung von Infektionszyklen selbst in 4000 m Höhe ermöglicht (MAS-COMA et al., 2001). Angesichts dieser Entwicklungen ist der Bedarf an effizienten Bekämpfungsmaßnahmen, die nicht zuletzt auf verlässliche Vorhersagemodelle angewiesen sind, verständlich (MORGAN et al., 2013).

1.2. Wirtschaftliche Bedeutung der Fasciolose

Neben dem eingangs erwähnten zoonotischen Potenzial des Großen Leberegels, liegt seine Bedeutung für den Menschen vor allem im wirtschaftlichen Schaden, der vorrangig auf subklinische Infektionen von Wiederkäuern (KAPLAN, 2001) zurückzuführen ist. Vor dem Hintergrund immer geringerer Gewinnspannen in der Nutztierhaltung, stellen Fasciolose-assoziierte Produktionsverluste eine hohe Belastung für Viehhalter dar (MORGAN et al., 2013). So geht eine Schweizer Studie von mittleren Einbußen in Höhe von € 52 Mio. pro Jahr, ausgelöst durch am Schlachthof verworfene Lebern, geringeres Schlachtgewicht, reduzierte Milchleistung und eingeschränkte Fruchtbarkeit, aus (SCHWEIZER et al., 2005b). Um den Ansatz verschiedener Bekämpfungsstrategien verstehen zu können, bedarf es eines tieferen Einblickes in den Lebenszyklus von *Fasciola hepatica*.

1.3. Entwicklungszyklus des Großen Leberegels

Im heteroxenen Entwicklungszyklus (Abbildung 1) des Großen Leberegels, wie ihn THOMAS 1883 erstmals beschrieben hat, gelangen von adulten Gallengangsstadien ausgeschiedene Eier über die Galle in den Darm und werden anschließend mit den Faeces in die Umwelt ausgeschieden. Unter optimalen klimatischen Bedingungen entwickeln sich in den Eiern innerhalb von zehn bis zwanzig Tagen Mirazidien (Wimpernlarven). Um schlüpfen zu können, sind jene auf Temperaturen über 10 °C, kurzweiliges Licht sowie einen Süßwasserfilm um das Ei bei geringstmöglichen Kotrückständen angewiesen. Sie versuchen binnen eines Tages ihren Zwischenwirt, die Zwergschlammschnecke, via Chemotaxis zu erreichen; andernfalls gehen sie zugrunde. Nach Eindringen in die Zwergschlammschnecke entwickeln sich aus dem Mirazidium über mehrere Zwischenstufen sogenannte Zerkarien (Schwanzlarven). Diese verlassen die Schnecke aktiv, enzystieren sich und haften so als infektiöse Metazerkarien an Pflanzen dicht unterhalb von Wasseroberflächen. Dort werden sie vom Endwirt

zusammen mit Futterpflanzen oral aufgenommen, durchbohren als Jungegel dessen Dünndarmwand und dringen in die Peritonealhöhle und schließlich in die Leber vor. Nach einer sechs- bis achtwöchigen Wanderung durch das Leberparenchym gelangen sie als nahezu geschlechtsreife, zwittrige Stadien in die Gallengänge, wo sie den Kreislauf durch die Produktion von Eiern schließen (THOMAS, 1883; OLLERENSHAW und ROWLANDS, 1959; CHRISTENSEN et al., 1978; SCHNIEDER, 2006).

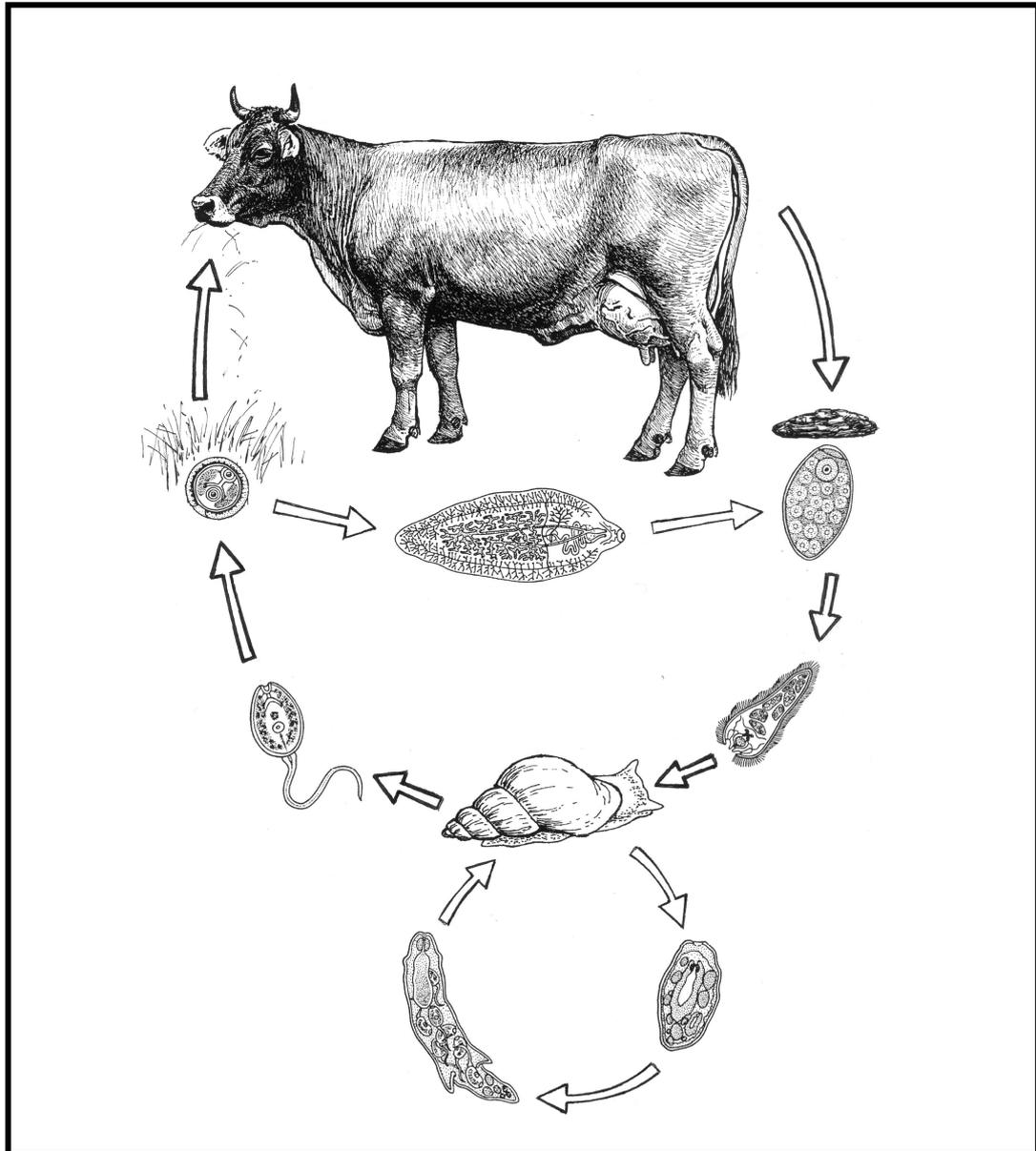


Abbildung 1: Entwicklungszyklus von *Fasciola hepatica* (Illustration von Matthias Haab, modifiziert nach ECKERT (2005))

1.4. Der Zwischenwirt *Galba truncatula*

1.4.1. Allgemeine Charakteristika der Zwergschlamm Schnecke

Mit einer Gehäusegröße von bis zu 10 mm (SCHNIEDER, 2006), seltener bis zu 16 mm (WALTON, 1918), stellt *Galba truncatula* die kleinste Art aus der Familie der Lymnaeidae (Schlamm Schnecken) dar. Diese kommen weltweit in Süßgewässern vor und gehören der Ordnung der Pulmonata (Lungenschnecken) und der Unterordnung der Basommatophora (Wasserlungenschnecken) an (REICHMUTH, 1936; SCHNIEDER, 2006).

Eine große Anzahl an Lymnaeidae gilt nicht nur als experimentell infizierbar, sondern hat sich auch unter natürlichen Bedingungen als geeigneter Zwischenwirt für *Fasciola hepatica* erwiesen. Einige Spezies scheinen jedoch über eine altersabhängige Resistenz zu verfügen (CRUZ-REYES und MALEK, 1987; SCHNIEDER, 2006; NOVOBILSKY et al., 2013). Ungeachtet der Vielfalt potentieller Zwischenwirte ist *Galba truncatula* in Mitteleuropa als bedeutendste empfängliche Schneckenart anzusehen (KENDALL, 1965, 1970; SCHNIEDER, 2006). Aufgrund ihrer hohen Anpassungsfähigkeit gelang es der Zwergschlamm Schnecke sich über die Grenzen Mitteleuropas hinaus auf sämtlichen Kontinenten zu verbreiten und so zur Endemisierung der Fasciolose in Ländern wie Peru und Ägypten beizutragen (MAS-COMA, 2005).

1.4.2. Lebensraum und Nahrung von *Galba truncatula*

Zum bevorzugten Lebensraum von *Galba truncatula* zählen kleine, in der Regel seichte Gewässer stehender Art wie flache Tümpel und Pfützen oder aber Gräben und Bäche mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Letztere werden vorrangig an ufernahen Gräsern, Wurzelwerk und Holzpfählen besiedelt, gerne auch oberhalb des Wasserspiegels (FRÖMMING, 1956). Nach MEHL (1932) lassen sich drei Arten von Fundorten für die Zwergschlamm Schnecke unterscheiden, nämlich Primär-, Sekundär- und Tertiärhabitats:

Bei Primärhabitats handelt es sich um Biotops, die ein Überleben der Schnecke auch bei ungünstigen Konditionen wie Hitze oder Frost ermöglichen. Als Beispiel seien hier flache Bachabschnitte mit tonigen Böden und einer ständigen Tiefe von fünf bis 30 Zentimetern angeführt. Im Gegensatz zu den permanenten Primärhabitats bieten Sekundär- und Tertiärhabitats nur temporär schneckentaugliche Lebensbedingungen. Besonders flache Straßengräben, in

denen das Wasser während längerer Trockenperioden versiegt, sind den Sekundärhabitaten zuzurechnen. Tertiärhabitats entstehen durch vorübergehende Versumpfung meist gewässernaher Wiesenflächen infolge anhaltender Regenfälle oder Regenzeiten. Hier können abgeschwemmte Schnecken oft monatelang überleben. Durch Abschwemmung gelingt es *Galba truncatula* passiv weite Strecken zurückzulegen. Laut Mehl (1932) sind aktive Wanderungen der Schnecken hingegen zu vernachlässigen, da sie dabei meist nur Distanzen von bis zu einem Meter überwinden. Auch PATZNER und SCHREILECHNER legen ihrer Kartierung von Süßwassermollusken im Bundesland Österreich 1998 eine geringe Vagilität und kleine Aktionsradien der Wasserschnecken zugrunde. Dem gegenüber stehen bislang nicht veröffentlichte Beobachtungen von KNUBBEN-SCHWEIZER, denen zufolge Wanderungen von deutlich mehr als einem Meter wahrscheinlich sind (persönliche Mitteilung von KNUBBEN-SCHWEIZER¹, publiziert von BAGGENSTOS (2012)).

Die Aussagen verschiedener Untersuchungen zur Bindung von *Galba truncatula* an einen bestimmten pH-Bereich muten recht gegensätzlich an. Während MEHL (1932) von einer Vorliebe der Zwergschlammschnecke für alkalische Medien schreibt, bestreiten andere Autoren die Richtigkeit dieser Anschauung (REICHMUTH, 1936; HATZKY, 1940; FRÖMMING, 1956). So zieht FRÖMMING 1956 den Schluss, dass mit einem Vorkommen von *Galba truncatula* in Gewässern mit einem pH-Wert von 5,6 bis 8,6 zu rechnen sei. Jahre später weist SOULSBY (1982) der Zwergschlammschnecke eine Präferenz für leicht saure Böden zu. CHARLIER et al. finden 2014 schließlich eine positive Korrelation zwischen Schnecken vorkommen und Wasser- sowie Boden-pH vor.

Darüber hinaus scheint *Galba truncatula* Ton- und Lehmböden zu bevorzugen. Diese dürften das Vorhandensein geeigneter Biotop entscheidend mitbeeinflussen (MEHL, 1932; SCHWEIZER et al., 2007).

Zwergschlammschnecken ernähren sich von verrotteten Pflanzen, Algen, Gräserpollen und Schlamm (MEHL, 1932). Letztlich könnte ein mangelndes Algenwachstum aufgrund minderer Sonneneinstrahlung ((PETZOLD, 1989), zitiert in (BAGGENSTOS, 2012)) Grund dafür sein, dass die Tiere kaum an dicht

¹ Knubben-Schweizer, G. , Ludwig-Maximilians-Universität München, Klinik für Wiederkäuer mit Ambulanz und Bestandsbetreuung, Oberschleißheim, persönliche Mitteilung (2012)

bewachsenen Gewässern wie etwa Bachläufen durch Wälder anzutreffen sind, auch wenn andere Bedingungen das Auftreten einer Schneckenpopulation nahelegten.

1.4.3. Fortpflanzung

Zwergschlammschnecken vermehren sich durch Kopulation oder Selbstbefruchtung. Sie setzen ihre Laichballen im Wasser ab. Im Labor konnte eine ganzjährige Eiablage beobachtet werden, solange die Temperatur nicht unter 10 °C sank. Unter natürlichen Bedingungen umfasst die Hauptlaichzeit die Monate April und Mai. Aus diesen Gelegen geschlüpfte Jungschnecken können sich bereits im August oder September desselben Jahres weiter vermehren. Die Entwicklungszeit des Embryos im Ei variiert in Abhängigkeit von der Wassertemperatur zwischen 7 und 40 Tagen (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956).

Zwergschlammschnecken erreichen je nach Standort ein Alter von 16 bis 24 Monaten (MEHL, 1932).

1.4.4. Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenheit und Kälte

Wie die Beschreibung geeigneter Habitate bereits nahelegt, sind Zwergschlammschnecken an Feuchtigkeit gebunden (FRÖMMING, 1956). Darüber hinaus spielen Umgebungs- und Wassertemperatur eine entscheidende Rolle, wenn es um das Überleben und die Fortpflanzung von *Galba truncatula* geht. Der optimale Temperaturbereich hierfür liegt zwischen 10 °C und 25 °C. Temperaturen von mehr als 25 °C wirken sich schädlich auf die Schneckenpopulation aus (KENDALL, 1953; ARMOUR, 1975). Nach MEHL (1932) kann die Zwergschlammschnecke bis zu viereinhalb Monate ohne tropfend flüssiges Wasser auskommen, ist also gegenüber Austrocknung recht widerstandsfähig. Sogar in Schnecken, die bereits zehn Monate außerhalb des Wassers gelebt hatten, konnten noch lebende Entwicklungsstadien des Großen Leberegels gefunden werden. Während ein aktives Eingraben im Boden während Trockenperioden von manchen Autoren verneint wird (MEHL, 1932; JOKINEN, 1978), unterscheidet GOUMGHAR 2001 zwischen Schnecken aus Flach- und Hochlandpopulationen. Letztere graben sich im Vergleich zu Schnecken aus der Ebene zu einem größeren Anteil in den Boden ein und übersommern auf diese Weise, was zu einer höheren Überlebensrate führt. Jene Fähigkeit scheint bei Jungschnecken deutlicher ausgeprägt zu sein als bei adulten Exemplaren.

MEHL (1932) räumt zwar ein, dass die Schnecken mitunter zwischen feuchten, lockeren Erdkrümeln Schutz vor der Austrocknung suchten, betont aber, sie würden dabei kaum aktive Grabarbeit leisten.

Neben der Übersommerung muss auch das Überwinterungsvermögen von *Galba truncatula* berücksichtigt werden. Niedrige Temperaturen können die Entwicklung verzögern und die Mortalität erhöhen (ROBERTS, 1950; TROUVE et al., 2005). Um sich vor Frost zu schützen, ziehen sich die Zwergschlammschnecken in den nicht gefrierenden Schlamm zurück und sind in der Lage, über mehrere Monate hinweg Temperaturen bei wiederholten Kältegraden von -8 °C zu ertragen (MEHL, 1932). Bei Temperaturen um $1,5\text{ °C}$ bleiben die Schnecken laut KENDALL (1953) voll aktiv, während HODASI (1976), ebenfalls unter Laborbedingungen, bereits bei 5 °C zwar noch keine Winterruhe, jedoch eine deutliche Reduktion von Aktivität und Futteraufnahme, sowie ein Ausbleiben der Fortpflanzung beobachtet. Nach Wiedereinstellen optimaler Temperaturen von 16 bis 22 °C im Anschluss an die dreimonatige Kälteperiode zeigen sich in der Population erwachsener Schnecken weiterhin negative Effekte auf Wachstum und Reproduktion. Junge Schnecken hingegen reagieren im Vergleich zur Kontrollgruppe, die keinen niedrigen Temperaturen ausgesetzt war, mit einer intensiveren Größenzunahme und starken Vermehrung (HODASI, 1976).

Berichte, dass Zwergschlammschnecken auf saisonale und tägliche Schwankungen des Wasserspiegels reagieren, indem sie sich bei Überflutung in die Randbereiche ihrer Habitate zurückziehen (HOURDIN et al., 2006), legen den Verdacht nahe, dass zu große Wassermassen, beispielweise infolge immenser anhaltender Regenfälle, einen negativen Einfluss auf das Vorkommen der Mollusken haben könnten oder zumindest durch Abschwemmung zu einer Verlagerung von Habitaten führen können.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass makroklimatische Parameter die meteorologischen Bedingungen für Schneckenpopulationen vermutlich nur unzureichend widerspiegeln. Vielmehr muss eine Betrachtung des Mikroklimas auf Ebene der Habitate erfolgen, um adäquat einschätzen zu können, welchen Einflüssen die Zwergschlammschnecken ausgesetzt sind (SMITH und WILSON, 1980).

1.5. Bekämpfung der Fasciolose

In Anlehnung an KNUBBEN-SCHWEIZER et al. (2011) lassen sich zwei Herangehensweisen an die Bekämpfung der bovinen Fasciolose unterscheiden. Die einfacher durchzuführende Strategie stellt hierbei eine rein medikamentelle Behandlung (potenziell) infizierter Rinder zu geeigneten Zeitpunkten dar, wie sie unter anderem von FAIRWEATHER (1999) und PARR (2000) beschrieben wurde. Sie ist in der Lage, die Wurmbürde sowie die Ausscheidung von *Fasciola*-Eiern (HANNA et al., 2006) nach Weideaustrieb im Frühjahr zu vermindern. Zulassungsbeschränkungen für laktierende Rinder sowie eine zunehmende Resistenzproblematik (WOLSTENHOLME et al., 2004) erschweren jedoch ein effizientes Ansprechen aller Leberegelstadien. Auch wirtschaftliche Verluste durch entstehende Wartezeiten und die Behandlung mitunter nicht-infizierter Tiere wecken berechtigte Zweifel an der Eignung dieser Vorgehensweise. Ihr ist eine gezielte Bekämpfung, die unmittelbar auf die Gegebenheiten im landwirtschaftlichen Betrieb zugeschnitten ist, vorzuziehen. Dabei erfolgt, neben einer labordiagnostischen Untersuchung der Tiere, eine Untersuchung der Weiden auf das Vorkommen geeigneter Zwergschlammschnecken-Habitate. So können erwiesenermaßen betroffene Tiergruppen konsequent behandelt und Bekämpfungsmaßnahmen auf Ebene des Weidemanagements ergriffen werden (KNUBBEN-SCHWEIZER et al., 2011). Zu nennen ist in diesem Zusammenhang das in den siebziger Jahren entstandene Weiderotationssystem nach Boray (BORAY, 1971, 1972). Durch getakteten Weidewechsel soll eine Ausscheidung von infektiösen Leberegeleiern auf Weiden, die Zwischenwirthabitate beherbergen, verhindert werden. Ermöglichen die Gegebenheiten auf dem Betrieb ein solches Vorgehen nicht, sind andere Maßnahmen zur Verhinderung der Aufnahme von Metazerkarien und zur Beseitigung von Zwergschlammschnecken und deren Habitaten angeraten. Dies kann durch Auszäunen von Habitaten, Trockenlegung betroffener Weiden und Verrohren von Abflussgräben erfolgen. Schnittgras von kontaminierten Flächen sollte nicht verfüttert werden. Weidetränken dürfen nicht aus natürlichen Gewässern gespeist werden und sind an erhöhten, drainierten Plätzen anzubringen, um einer Entstehung von Sekundärhabitaten vorzubeugen (HERTZBERG et al., 2002; ECKERT et al., 2008).

Aus ökologischen Gründen ist es nicht vertretbar, mit Molluskiziden gegen die Zwischenwirte vorzugehen (SCHNIEDER, 2006). Formen der biologischen Schneckenbekämpfung durch Einsatz natürlicher Feinde von *Galba truncatula* (TAYLOR, 1964) wie Hornfliegenlarven (BERG, 1953), Schwimmkäfer (RONDELAUD, 1979a), Enten (SCHNIEDER, 2006) und andere Schnecken (RONDELAUD, 1979b; XIMENES et al., 1993) konnten sich bislang nicht durchsetzen.

Ein weiterer natürlicher Ansatz besteht darin, Pellets, die bestimmtes Pilzmycel enthalten, oral an infizierte Rinder zu verabreichen. Der Pilz, *Pochonia chlamydosporia*, ist in der Lage, Leberegelier im Kot zu befallen und abzutöten (DIAS et al., 2012; DIAS et al., 2013).

2. Mathematische und räumliche Modelle zur Fasciolose

Wissen ist die Voraussetzung für Denken und zielgerichtetes Handeln (WICKERT, 2001).

So stellt das Wissen um die Epidemiologie der Fasciolose sowie das Vorkommen von *Galba truncatula* und ihrer Habitate die Voraussetzung für den gezielten Einsatz oben genannter Bekämpfungsmaßnahmen dar. Erst die Kenntnis vom Vorliegen eines Infektionsrisikos oder gar einer Erkrankungssituation kann die nötige Handlungsbereitschaft wecken, da chronisch-subklinische Krankheitsverläufe und damit einhergehende wirtschaftliche Verluste oftmals übersehen werden (SCHWEIZER et al., 2005b). Daraus ergibt sich der Bedarf an einem mathematischen Modell, mit dessen Hilfe sich die Gefahr einer Infektion mit *Fasciola hepatica* zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem festzulegenden Ort vorherbestimmen lässt. Dies sollte auf Basis einfach zu beziehender Daten erfolgen, sodass aufwendige labordiagnostische Untersuchungen von Einzeltieren nur dann erforderlich werden, wenn mit Hilfe des Modelles ein erhöhtes Infektionsrisiko festgestellt werden konnte. Auf diese Weise können Risikomodelle zu einem strategischen Einsatz von Faszioziden beitragen und damit der zunehmenden Resistenzbildung entgegenwirken (MCCANN et al., 2010a).

2.1. Geschichte mathematischer und epidemiologischer Modelle

Einen ersten Versuch, mathematische Modelle für epidemiologische Zwecke zu nutzen, unternahm Daniel Bernoulli der Ältere im 18. Jahrhundert, indem er sich befließigte, den Effekt der Variolation zu berechnen (NÖBAUER, 1979). Den entscheidenden Schritt ging Ross am Beginn des 20. Jahrhunderts als er das erste zweidimensionale deterministische Modell zur Übertragung von Malaria erstellte. Es berücksichtigte zwei Variablen: Den Menschen und die Population der Anophelesmücken als Überträger. Ross erkannte die Bedeutung von Schwellenwerten und stellte fest, dass eine Dezimierung der Mücken auf eine bestimmte Zahl genügte, um Malaria erfolgreich zu bekämpfen (ROSS, 1915; MANDAL et al., 2011; OLANIYI und OBABIYI, 2013). Sein Modell erfuhr in den folgenden Jahrzehnten Verbesserung, unter anderem durch MCDONALD (1957) sowie ANDERSON und MAY (1991) ((MANDAL et al., 2011)). Mit seiner quantitativen Beschreibung der Populationsdynamik von Räuber-Beute-Beziehungen begründete VOLTERRA (1990) (Originalausgabe von 1931) die mathematische Ökologie. Sie beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen zwischen Bewohnern ein und desselben Lebensraumes (NÖBAUER, 1979). In den Jahren von 1927 bis 1933 entwickelten KERMACK und MCKENDRICK Modelle zur epidemischen Verbreitung von Infektionskrankheiten, darunter ein einfaches deterministisches Modell, welches die Gesamtpopulation in drei Kompartimente unterteilt, nämlich in: S : susceptible (empfindlich), I : infected (infiziert) und R : removed (genesen, immun oder verstorben). Dieses SIR -Modell kann das epidemiologische Muster des Londoner Pestzuges nur unzureichend wiedergeben, wird jedoch zutreffender, wenn man es um stochastische, also zufällige Prozesse erweitert. Ferner bedarf es einer zweiten Ergänzung: Nagetiere müssen als Reservoir miteinbezogen werden, insbesondere um Wiederausbrüche erklären zu können. Auch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass das Kompartiment S nicht nur durch die Infektion empfänglicher Personen, sondern zusätzlich durch fortwährende Geburten verändert wird und, dass die Infektionsrate saisonalen Schwankungen unterliegen kann (EARN, 2008).

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, wie eine Vielzahl epidemiologischer Modelle funktioniert: Sie unterteilen die Gesamtpopulation unter bestimmten Annahmen in verschiedene Kompartimente und versuchen, deren Interaktionen mittels einfacher Differentialgleichungen zu beschreiben. Ausgehend von den drei

Klassen der Gesunden bzw. Infizierbaren (S), der Infizierten bzw. Infizierenden (I) und der Gesamtpopulation (N), kann das System um weitere Kompartimente erweitert werden, um den Eigenheiten der jeweils zu modellierenden Krankheit Rechnung zu tragen und zusätzlich einwirkende Faktoren miteinzubeziehen. Der Wechsel von einem in ein anderes Kompartiment wird in Übergangskoeffizienten festgehalten. Wird β als Übergangskoeffizient für den Wechsel aus der Klasse der Infizierbaren und damit als Infektionsrate festgelegt und γ als Übergangskoeffizient für das Verlassen der Gruppe I , so lässt sich die sogenannte Reproduktionszahl R_0 berechnen: $R_0 = \frac{\beta N}{\gamma}$, gesetzt den Fall, dass die gesamte Population empfänglich ist ($N = S$). Die Reproduktionszahl stellt eine zentrale Kennziffer epidemiologischer Modelle dar. Mit ihrer Hilfe lässt sich entscheiden, ob ein Krankheitsausbruch das Potenzial zur Epidemie hat. Dies ist dann gegeben, wenn $R_0 > 1$, das heißt ein Individuum mehr als eine andere Person infiziert (EARN, 2008; MATHEA, 2015).

2.2. Modelle in der Parasitologie

Was Ross zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit seinem Modell zur Übertragung von Malaria begonnen hatte (ROSS, 1915), wurde in den folgenden Jahrzehnten in einer Vielzahl weiterer Modellierungsversuche fortgesetzt. Da es üblich ist, das einfachste Modell zu wählen, welches vorhandene Daten hinreichend beschreibt, muss es nicht verwundern, dass bestehende Modelle mit der Verfügbarkeit neuer Datensätze oftmals zufriedenstellender Aussagen entbehren. Sie müssen dann unter Berücksichtigung zusätzlicher Interaktionen neu angepasst werden. Aus diesem Grund ist die Geschichte (nicht nur) der Malaria-Modelle lang. Die Treffsicherheit von Vorhersagen lässt sich durch die Kombination einzelner Modelle erhöhen (MANDAL et al., 2011). So gibt es neben den typischen Kompartiment-Modellen, welche die Transmission innerhalb und zwischen der Endwirt- und Vektorpopulation beschreiben (KERMACK und MCKENDRICK, 1927) auch solche, die Abläufe im Wirt oder die Verfügbarkeit von Vektoren wiedergeben (HOSHEN et al., 2000; ANTAO und HASTINGS, 2011). Bei allen Bemühungen aber bleibt ein Modell der Versuch, die komplexe Realität näherungsweise abzubilden (MANDAL et al., 2011).

Dieser Versuch wurde im Laufe der Jahre für die verschiedensten parasitären oder durch Parasiten übertragenen Erkrankungen unternommen. Ganze Lebenszyklen oder Teile davon wurden unter vielen anderen in Modellen zur Schistosomiasis (WOOLHOUSE, 1991; ZHAO und MILNER, 2008; FRENCH et al., 2010), Echinokokkose beziehungsweise Zystizerkose (ROBERTS et al., 1986), zur Toxoplasmose (SULLIVAN et al., 2012), Babesiose (ARANDA et al., 2012), Onchozerkose (BARRO und OYANA, 2012) und zur Infektion mit *Dictyocaulus viviparus* (PLOEGER und EYSKER, 2000) aufgearbeitet. Neben diesen speziellen verfolgten Forscher oftmals auch allgemeinere Fragestellungen, indem sie beispielsweise die Entstehung von Anthelminthika-Resistenzen bei Nematoden mit direktem Entwicklungszyklus (SMITH, 1990) mathematisch zu erklären suchten. Auch eine Modellierung der Prozesse, die im Anschluss an eine *Eimeria*-Infektion im Wirt ablaufen, sollte – unter Berücksichtigung der Immunantwort – übertragbare Erkenntnisse für Protozoen im Allgemeinen liefern (KLINKENBERG und HEESTERBEEK, 2005).

2.3. Modelle zur Fasciolose

2.3.1. Frühe Vorhersagemodelle

Noch heute basieren die monatlichen Vorhersagen des NADIS (National Animal Disease Information Service) zum Fascioloserisiko im Vereinigten Königreich auf dem Prinzip des Ollerenshaw Index von 1959 (MCCANN et al., 2010a). Ursprünglich beschrieb dieser den Zusammenhang zwischen der Inzidenz akuter Fasciolose bei Schafen und den klimatischen Bedingungen auf der Insel Anglesey in den Jahren 1947 bis 1957, wurde dann aber übertragen, um Vorhersagen für England und Wales treffen zu können (OLLERENSHAW, 1966). Der Index M_t berechnet sich aus den Parametern Niederschlag, potenzieller Transpiration sowie der Anzahl von Regentagen und gilt als monatliches Maß für feuchte Klimaverhältnisse, wie sie den Ablauf des Leberegelzyklus begünstigen würden (OLLERENSHAW und ROWLANDS, 1959). Unter der Annahme, dass bei gleichen klimatischen Bedingungen wie in Anglesey geologische Strukturen, Bodenarten, die Topographie, Drainagen und der Viehbesatz im Rest des Landes schlechtere Bedingungen für Zwischenwirt und freilebende Parasitenstadien bieten, ist dort mit einer geringeren Inzidenz der akuten Fasciolose zu rechnen. Eine solche Validierung anhand von Landkarten zur Inzidenz und Klimakarten

zum Index M_t ließ eine gute Übereinstimmung erkennen. Ungenau wurden auf dem Index beruhende Vorhersagen nur dann, wenn sie bereits sehr früh (August) getroffen wurden und man die Niederschlagsverhältnisse für die Monate August bis Oktober überschätzte (OLLERENSHAW, 1966). Eine Berücksichtigung mikroklimatischer Verhältnisse auf Ebene der Habitate erfolgte hier nicht. Auch beziehen sich die Prognosen auf ein sehr grobes Raster, was die Brauchbarkeit auf Betriebsebene infrage stellt (MCCANN et al., 2010a).

Darüber hinaus kritisierte THOMAS (1979), der Ollerenshaw Index ließe die Dynamik der Infektion selbst außer Acht. Viele Ansätze für eine Modellierung der Fasciolose stellten rein mathematische Spielereien unter Vernachlässigung relevanter Einflussgrößen dar. So übersähen beispielsweise GETTINBY et al. (1974) einige bedeutende Merkmale des Leberegelzyklus. Hieraus ergäbe sich die Notwendigkeit eines Modelles, das wichtige Eigenheiten des Leberegel-Zyklus miteinbeziehen, Vorhersagen in Abhängigkeit von Klimadaten ermöglichen und eingesetzt werden könne, um den Effekt verschiedener Kontroll-Strategien zu vergleichen. In seinem Ansatz unterschied THOMAS drei große Gruppen: nicht infizierte Schnecken, infizierte Schnecken und Parasiten. Diese gliederte er in 15 Subpopulationen, fasste die Übergänge zwischen ihnen in Einzelgleichungen und setzte daraus verschiedene Modelle zusammen. Sie könnten als Grundlage für ein endgültiges Modell dienen (THOMAS, 1979).

Doch stützten sich seine Gleichungen ausschließlich auf Daten, die in Experimenten von NICE unter Laborbedingungen erhoben worden waren (NICE und WILSON, 1974).

In Anlehnung an den Ollerenshaw Index schuf MALONE 1987 ein Vorhersagesystem für Louisiana, indem er Klimadaten mit dem jährlichen Fasciolose-Infektionsrisiko korrelierte. Hierzu verwandte er Daten zur Herdenprävalenz, Übertragung auf Leberegel-freie Sentinelkälber und zur Schneckenpopulationsdynamik einerseits und das sogenannte Thornthwaite Water Budget andererseits. Letzteres stellt ein Maß für den Effekt von Feuchte und Überschwemmungen in Schneckenhabitaten dar und stützt sich unter anderem auf die potenzielle Evapotranspiration. Der Begriff Evaporation bezeichnet die Verdunstung von der unbewachsenen, mehr oder weniger feuchten Erdoberfläche oder von freien Wasserflächen. Die Verdunstung von Pflanzen über ihre Spaltöffnungen (Stomata) nennt man Transpiration. Da die Effekte beider

Prozesse zusammen auftreten und eine Trennung der Vorgänge nur schwer möglich ist, wird üblicherweise ihre Summe, die Evapotranspiration, betrachtet (Abbildung 2). Die maximal mögliche Verdunstung unter den jeweiligen meteorologischen Bedingungen nennt man potentielle Evapotranspiration (ETPot). Bei der tatsächlichen Verdunstung, die vom jeweiligen Wasserdargebot abhängt, spricht man von reeller, aktueller beziehungsweise tatsächlicher Evapotranspiration (ETakt). Diese lässt sich nur durch Messungen ermitteln (GERICS und CLIMATE SERVICE CENTER GERMANY, 2015). Verglichen mit modifizierten Formen des Ollerenshaw Index erwies sich jenes Louisiana-Modell als überlegen und konnte die Anzahl der Übertragungen von Fasciiose auf Sentinelkälber in fünf von sechs Jahren korrekt einstufen (THORNTHWAITE, 1948; MATHER et al., 1978; MATHER, 1979; MALONE et al., 1987).

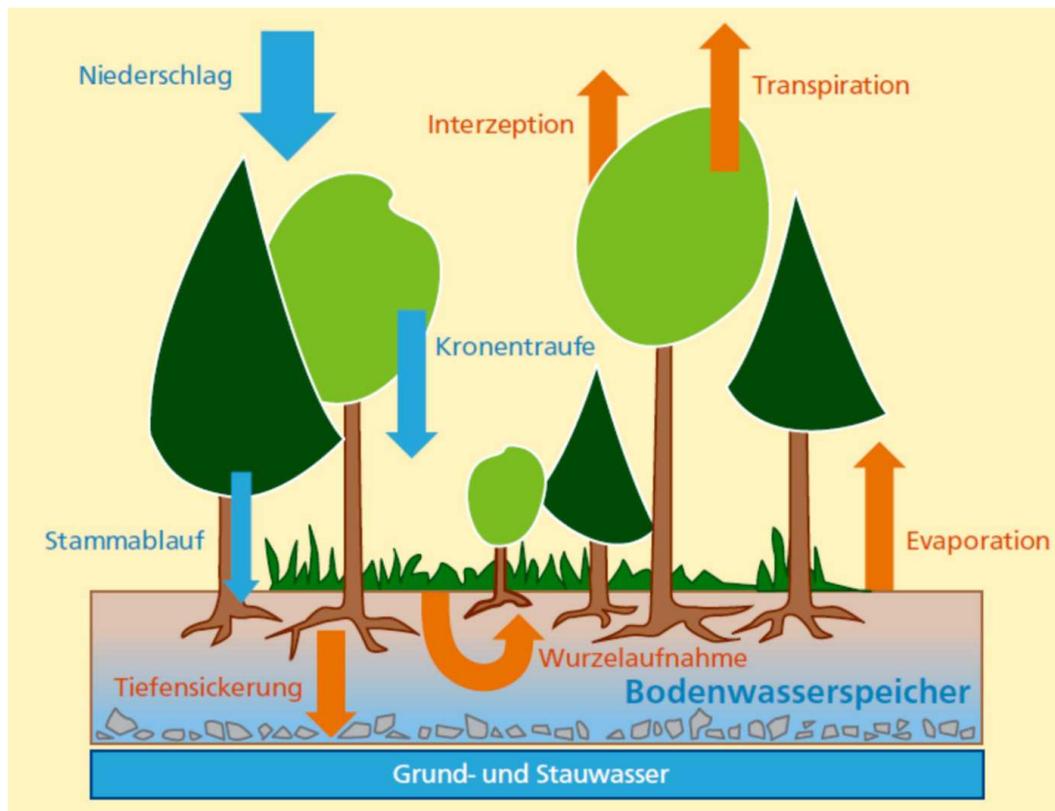


Abbildung 2: Komponenten des Wasserhaushalts von Wäldern (ZIMMERMANN et al., 2008)

2.3.2. Neuere Modelle ab 1992

Nachfolgend sollen Modelle beschrieben werden, die nach den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts entstanden. Sie stützten sich in der Mehrzahl auf die Verwendung geographischer Informationssysteme und läuteten gewissermaßen eine neue Ära von Vorhersagemodellen ein.

2.3.2.1. Das Prinzip GIS-gestützter Modelle

Der Einsatz von neuartigen Technologien wie geographischen Informationssystemen (GIS) kann die Entwicklung räumlicher Risikomodelle für die Fasciolose deutlich erleichtern. Geeignete Software ist in der Lage, Klima- und Umgebungsdaten gleichermaßen zu inkorporieren, um sie anschließend mit epidemiologischen Daten zu Prävalenzen zu korrelieren und auf diese Weise letztlich Risikofaktoren für das Auftreten einer Erkrankung zu bestimmen. Die Kartierung der Risikofaktoren im GIS ermöglicht alsdann Vorhersagen zur Verbreitung einer Erkrankung in Gebieten, für die keine Prävalenzdaten vorliegen, und hilft dabei, zu Tage tretende Verteilungsmuster zu erklären (CLEMENTS und PFEIFFER, 2009; MCCANN et al., 2010a).

Der Vorteil geographischer Informationssysteme besteht folglich darin, dass digitale Daten beispielsweise zu Bodenarten und -hydrologie sowie zu klimatischen Verhältnissen und Prävalenzen (Malones Red River Basin Modell (MALONE et al., 1992)) gleichermaßen in das Programm integriert, dort in verschiedenen Layern dargestellt und dabei Korrelationen aufgedeckt werden können (MALONE et al., 1998). Derart kombinierte Datensätze lassen sich graphisch in Form von Landkarten visualisieren. Die Rasterung hängt dabei vom Auflösungsvermögen verwendeter Daten ab.

Geographische Informationssysteme hatten unter anderem bereits Einsatz in Modellen zum Riftalfieber (LINTHICUM et al., 1987) und zur Theileriose (LESSARD et al., 1990) gefunden.

Zukowski war der erste, der den Versuch unternahm, das Fasciolose-Risiko betriebsspezifisch auf der Basis eines GIS-Modelles vorherzusagen (ZUKOWSKI, 1990; ZUKOWSKI et al., 1991).

2.3.2.2. Chronologie und Inhalte neuerer Modelle

Sein GIS-Modell zu Habitaten von *Lymnaea bulimoides*, die im Südwesten von Louisiana als Zwischenwirt für *Fasciola hepatica* gilt, stützte sich vorrangig auf bodenhydrologische Aspekte (ZUKOWSKI et al., 1991). Mit dem Ziel einer standortspezifischen Habitat-Modellierung für Marschland, das als Weideland genutzt wurde, überarbeitete er es 1993, indem er neugewonnene Erkenntnisse zu bevorzugten Habitaten und weitere Faktoren wie Viehbesatz miteinfließen ließ. Im Abgleich mit aus früheren Studien bekannten Habitaten, wies sein Ansatz eine sehr gute Übereinstimmung auf (ZUKOWSKI et al., 1993).

Auch Malone war sich dessen bewusst, dass vorausgegangene Modelle, welche die Transmission in den Kontext jährlicher Klimaschwankungen gestellt hatten, nur für Regionen geeignet waren, nicht aber für den Einsatz auf Betriebsebene, da standortspezifische Eigenheiten wie etwa die Bodenhydrologie, Bodenarten, Gefälle und damit die Präsenz von Habitaten, aber auch Managementfaktoren nicht oder nur bedingt miteinbezogen worden waren. In Anlehnung an ZUKOWSKI et al. (1991 und 1993) entwickelte er für das Red River Basin von Louisiana ein vergleichbares GIS-Modell, um dieser Erkenntnis Rechnung zu tragen (MALONE et al., 1992).

Es folgte 1992 ein Review von MALONE und ZUKOWSKI. Dieses konstatierte, dass ein geeignetes Vorhersagesystem folgende Informationen kombinieren müsse: Klimatische Bedingungen wie Regen und Temperaturen unter Berücksichtigung klimazonen- und jahresabhängiger Schwankungen, Indikatoren der Bodenhydrologie, um das Vorhandensein von Habitaten zu prüfen, und schließlich Modelle der Populationsdynamik zur Entwicklung und Überprüfung von Kontrollmaßnahmen (MALONE und ZUKOWSKI, 1992).

Unter Beteiligung von Malone wurden wenige Jahre später zwei Projekte in Äthiopien (YILMA und MALONE, 1998) und Ostafrika (MALONE et al., 1998) auf den Weg gebracht, die beide eine Chance in der Nutzung agroklimatischer Datenbanken sahen. Als Vorbild dienten in der Landwirtschaft eingesetzte Modelle, welche die Eignung von Standorten für bestimmte Pflanzen beschreiben und Empfehlungen zum optimalen Zeitpunkt für Anbau und den Einsatz von Düngemitteln geben (VAN VELTHUIZEN et al., 1995). Eine vergleichbare Herangehensweise auf Grundlage agroklimatischer Daten sollte auch bei der Bestimmung von Gebieten, die das Auftreten einer Erkrankung begünstigen,

hilfreich sein. Solche Daten standen sowohl für Äthiopien (YILMA und MALONE, 1998) als auch für Ostafrika zur Verfügung (MALONE et al., 1998).

Um GIS-gestützt Prognosen für das Risiko einer Infektion mit *Fasciola hepatica* und *Fasciola gigantica* in Äthiopien erstellen zu können, griffen YILMA und MALONE 1998 wieder auf das 1987 an der Louisiana State University entwickelte Vorhersagesystem (MALONE et al., 1987) zurück. Dieses verarbeitete Daten zu minimalen und maximalen Tagestemperaturen sowie Niederschlägen im Konzept des Thornthwaite Water Budget und der Growing Degree Days (Wachstumsgradtage). Im Gegensatz dazu wurde die potenzielle Evapotranspiration im Modell für Äthiopien nun nicht mehr über die Thornthwaite Formel kalkuliert, sondern nach Penman. Durch die rechnerische Kombination von potenzieller Evapotranspiration, Wachstumsgradtagen und Niederschlagsmengen entstand ein Vorhersageindex. Erst ab Indexwerten über 600 war mit einem Fascioloserisiko zu rechnen. Des Weiteren wurde auf Korrelationen zwischen der bekannten Verteilung der Fasciiose, dem Vorhersage-Index und in ein GIS eingespeisten Daten zu Klima (Niederschlag, potenzielle Evapotranspiration, mittlere Temperatur), Vegetation und Gelände (Gefälle, Bodenfeuchte, mittlere Höhe über N. N.) getestet. Man entdeckte regional spezifische Transmissionsmuster in Abhängigkeit von der geographischen Lage und der Höhe über N. N. Für vier verschiedene agroklimate Zonen Äthiopiens ergab sich hieraus ein monatliches Vorhersagemodell, aus dem die Autoren Empfehlungen für die strategische *Fasciola*-Bekämpfung in jeder der vier Zonen ableiteten. Es wurde anhand von Prävalenzdaten aus der Literatur erfolgreich validiert (YILMA und MALONE, 1998).

Parallel hierzu war Malone in die Entwicklung eines GIS-Modelles für Ostafrika involviert, wo wiederum *Fasciola hepatica* und *Fasciola gigantica* gleichermaßen als Erreger der Fasciiose gelten. Via GIS fanden Einflussgrößen wie der normalisierte differenzierte Vegetationsindex, der Bewässerungsstatus, die Höhe über N. N., verschiedene Bodenarten und Boden-pH-Werte Eingang in das Modell. Sie wurden in Bezug zu Prävalenzdaten für die einzelnen Rasterfelder des Systems gesetzt. Dem Vorgehen für Äthiopien entsprechend berechneten MALONE und GOMMES (1998) einen klimabasierten Vorhersageindex. Voraussetzung hierfür war die jeweilige Bestimmung eines standortabhängigen

Normalrisikos auf der Basis von Klimadaten aus dreißig Jahren, die ein „typisches“ Jahr am betreffenden Ort repräsentieren sollten. Davon ausgehend ließen sich Abweichungen bemessen, die in die Vorhersage miteinbezogen wurden. Da es zu zeitaufwendig war, vorhandene Tagesdaten zu verwenden und daraus Basiswerte für den Vergleich mit täglichen Vorhersagen zu schätzen, ging man dazu über, mit monats- und jahresbezogenen Daten zu rechnen. Der resultierende Vorhersageindex ermöglichte in Kombination mit dem GIS-Modell Prognosen, die in Einklang mit Prävalenzen aus Überwachungs- und Literaturdaten standen. Es zeigten sich Unterschiede in Verbreitung und Häufigkeit des Auftretens von *Fasciola spp.* je nach Region (feucht vs. trockenheit). Niedrige pH-Werte schienen dem Vorkommen von Lymnaeiden und damit auch der *Fasciola spp.* nicht zuträglich. Um standortspezifische Vorhersagen treffen zu können, so die Autoren, wären genauere Daten, beispielsweise tägliche anstelle von monatlichen Klimadaten notwendig. Nach wie vor existiere kein ausreichendes Wissen darüber, welche Temperaturgrenzen und weiteren Toleranzbereiche für die Existenz von *Fasciola spp.* bestünden. Bislang durch Experimente oder Untersuchungen vor Ort gewonnene Erkenntnisse hierzu könnten künftig über Beobachtungen in GIS-Modellen ergänzt werden (MALONE et al., 1998).

Ohne Zuhilfenahme eines geographischen Informationssystems entwickelten BOSSAERT et al. (1999) im darauffolgenden Jahr ein klimaabhängiges Modell nach Vorbild von HOPE-CAWDERY (1978). Sie betrachteten dabei die einzelnen Entwicklungsschritte im Zyklus des Großen Leberegels einschließlich der Zwischenwirtpopulation, um vorhersagen zu können, welche Zeit es dauern würde, ehe die Entwicklung der Leberegelstadien außerhalb des Rindes abgeschlossen wäre. Ihr Modell verglichen sie mit serologischen und koprologischen Untersuchungsdaten. Sie zogen den Schluss, dass Niederschlag innerhalb Belgiens keine größere Rolle für das Fascioloserisiko spiele. Vielmehr stellt ihrer Erkenntnis nach die Temperatur mit einem Cut-Off-Wert von 10 °C für Schneckenaktivität und Entwicklung von *Fasciolastadien* in der Außenwelt den erstlimitierenden Faktor dar. Ihr Versuch, durch das Ausbringen von Molluskiziden auf Testweiden Effekte der Schneckenpopulation selbst zu überprüfen, scheiterte an der mangelhaften Wirksamkeit schneckenabtötender Maßnahmen (BOSSAERT et al., 1999).

Ein weiteres in der Reihe von GIS-Modellen zur Fasciolose (TUM et al., 2004) beschäftigt sich mit deren Vorkommen in den Rinder- und Büffelherden Kambodschas mit dem Ziel der Unterscheidung von vier Risikogruppen. Potenzielle Einflussfaktoren wie die Nähe zu Flüssen, das Auftreten von Überschwemmungen, die Art der Flächennutzung einschließlich des Viehbesatzes und Gefälle sowie Höhenverhältnisse wurden aus der Erfahrung heraus subjektiv gewichtet. Nachdem sich die Temperaturen in Kambodscha relativ konstant innerhalb der für Schnecken geeigneten Grenzen bewegen und Überflutungen infolge der Schneeschmelze den Niederschlägen an Bedeutung weit überlegen sind, flossen Daten zu Temperatur und Niederschlag nicht in das Modell mit ein (TUM et al., 2004). Eine Validierung des Modelles, durchgeführt anhand einer Provinz, welche drei der vier Risikogruppen beinhaltet, ergab vor allem für stark gefährdete Gebiete korrekte Risikoeinschätzungen. Ungenauigkeiten traten in Form von Prävalenzen um 5 % in Gebieten, für die laut Modell kein Risiko vorhergesagt worden war, zutage. Sie wurden auf Grenzüberschreitungen weidender Viehherden zwischen benachbarten Regionen mit und ohne Fascioloserisiko zurückgeführt, eine Tatsache, die in zukünftigen Prognoseversuchen Berücksichtigung finden sollte (TUM et al., 2007).

Aus Prävalenzdaten, die auf Schlachthofuntersuchungen beruhten, und vier Kovariablen, nämlich dem jährlichen Niederschlag, temperaturkorrigiertem Niederschlag, dem jährlichen Vegetationsindex (NDVI) und gegebenenfalls vorhandener Bewässerung, generierten DURR et al. 2005 vier hierarchische Bayes-Modelle für Victoria, Australien. Ob eine Bewässerung des Geländes vorgenommen worden war oder nicht, schien der wichtigste Aspekt zu sein, wenn es darum ging, die Verteilung der Prävalenzen erklären zu können. Niederschlag und Vegetationsindex müssten laut Autoren als Confounder gesehen werden, könnten aber, sofern mit Vorsicht interpretiert, ebenfalls wichtige Informationen für Vorhersagen zu Krankheitsprävalenzen liefern (DURR et al., 2005).

Keine Modellierung im bisherigen Sinne, sondern eine Langzeitstudie vollzogen KLEIMANN et al. (2007) über drei Jahre in einem patagonischen Betrieb in den Tälern der Anden, Argentinien. Hierzu zählten: Koprologische Untersuchungen zur Bestimmung der Fasciolose-Prävalenz, die Beobachtung der Zwischenwirtpopulation durch wiederholte standardisierte Schneckensuche und schließlich die Prüfung auf einen Zusammenhang dieser Untersuchungsergebnisse

mit Temperatur- und Niederschlagsdaten. Durch die Berechnung der Wasserbilanz nach THORNTHWAITE und MATHER 1955 und die Erfassung von Bodenarten konnten Eigenheiten der Regionen und Habitate miteinkalkuliert und in Bezug zu Fascioloseprävalenzen und dem Schneckenvorkommen gesetzt werden. Mit Recht wiesen KLEIMANN et al. (2007) darauf hin, dass bei der Erstellung mathematischer Modelle nicht nur erstlimitierende Faktoren wie beispielsweise die Temperatur in Gebieten mit guter Wasserspeicherkapazität der Böden relevant wären. So könnten abnehmende Niederschlagsmengen parallel dazu die Bedingungen für Zwergschlamm Schnecken in temporären Habitaten verschlechtern, gleichzeitig aber in permanenten durch die Förderung der Entstehung matschiger Uferländer verbessern. Darüber hinaus dürfte die Bedeutung anderer Wirte wie Schafe, Hasen, Wild und Sumpfbiber als Reservoir für *Fasciola hepatica* mit unbekanntem Effekt auf die Populationsdynamik von Parasit und Zwischenwirt nicht vernachlässigt werden (KLEIMANN et al., 2007).

Ein weiteres südamerikanisches Modell prüfte den Zusammenhang zwischen der Anzahl geschlachteter Tiere, der Anzahl verworfener Lebern, den geographischen Koordinaten sowie den Klimadaten und Höhenangaben der Herkunftsgemeinden betroffener Tiere in drei brasilianischen Staaten. Die einzelnen Gemeinden wurden drei verschiedenen Risikogruppen zugeordnet. Mittels Kriging-Funktion von ArcGIS konnten Werte zu Orten, für die keine Stichproben vorlagen, durch Interpolation umliegender Messwerte geschätzt werden. Niederschlagswerte wurden nicht miteingerechnet (DUTRA et al., 2010).

Da Vorhersagen zum Fascioloserisiko im Vereinigten Königreich wie bereits erwähnt bis heute auf Basis des Ollerenshaw-Index getroffen werden, bemühten sich MCCANN et al. (2010b), ein GIS-gestütztes Fasciolosemodell im deutlich genaueren Maßstab von Postleitzahlengebieten zu erstellen. Ausgehend von Tankmilch-ELISA-Ergebnissen wurden positive Rinderherden georeferenziert und in unterschiedlichen multiplen Regressionsmodellen mit Kovariablen assoziiert. Zu letzteren zählten maximale, mittlere und minimale Tagestemperaturen und Niederschlagsmengen aus allen fünf Jahren vor dem Beprobungszeitpunkt, zusammengefasst in unterschiedlich granulierten Datensätzen, Angaben zu Textur des Oberbodens, Boden-pH und Gehalt an verschiedenen chemischen Elementen, die Höhe über N. N., das Gefälle und die Landqualität. Das Modell, welches die Prävalenzdaten am präzisesten erklären

konnte, wies die Niederschlagsmengen aus den fünf Jahren vor der Beprobung als bessere Prädiktoren für Fasciolose aus denn den Niederschlag im Jahr der Beprobung. Daneben stellte sich die Abweichung der Maximaltemperatur im Jahr der Probennahme vom Muster der Jahre davor als signifikante Variable dar. Es handelte sich um einen besonders warmen Sommer. Prinzipiell gingen die Autoren davon aus, dass in Gebieten mit ganzjährigem Niederschlag vorrangig die Temperatur als limitierender Faktor anzusehen wäre (MCCANN et al., 2010a).

Über einen Zeitraum von drei Jahren untersuchten BENNEMA et al. (2011) die Zusammenhänge zwischen Klima-, Umgebungs- sowie Managementfaktoren und der Verbreitung von Infektionen mit *Fasciola hepatica* in Flandern, Belgien. Letztere wurde anhand der Ergebnisse wiederholter Tankmilchuntersuchungen bestimmt. Die Resultate einer Kombination der genannten Größen in einem geographischen Informationssystem legten den Schluss nahe, dass in gemäßigten Klimazonen, die keinen größeren Klima- und Umweltschwankungen unterliegen, insbesondere Managementfaktoren Einfluss auf die räumliche Verteilung der Fasciolose hätten und daher unbedingt Berücksichtigung in Risikomodellen finden müssten. Zu den Managementfaktoren zählte unter anderem das Mähen von Weideland, die Länge der Weidesaison, das Auszäunen von natürlichen Gewässern und der Einsatz von Anthelminthika. Informationen dazu waren in Fragebogen erhoben worden (BENNEMA et al., 2011).

Eine aufwendige Studie führten CRUZ-MENDOZA et al. 2011 in Mexiko durch: 42 Monate lang wurden in einer hyperendemischen Region Schafe, Ziegen und Rinder koprologisch auf Fasciolose getestet und Zwischenwirtsschnecken einschließlich Zerkarien untersucht. Die Wiederkäuer wurden wiederholt einer Behandlung mit Anthelminthika und Faszioziden unterzogen. Nach Bildung monatlicher Durchschnitte aus täglich erhobenen Daten zu Regenmenge und Bodentemperatur korrelierten CRUZ-MENDOZA et al. (2011) diese mit den Angaben zu Wirten und Zwischenwirten. Peaks in der Population der Schnecken konnten parallel zu oder unmittelbar nach niederschlagsreichen Zeiten beobachtet werden. Vier Monate später waren Infektionsspitzen in der Population der Wiederkäuer zu verzeichnen. Effekte des Einsatzes von Faszioziden ließen sich an reduzierten Zerkarienzahlen etwa fünf Monate nach der Therapie ablesen (CRUZ-MENDOZA et al., 2011).

In den Jahren 2011 und 2014 stellten CHARLIER et al. zwei Studien zur räumlichen Verteilung der Fasciolose und deren Risikofaktoren in Belgien vor. Feinskalierte Risikomodelle wären notwendig, weil Betriebe mit und ohne Fascioloseproblematik in risikoreichen und risikoarmen Gebieten nebeneinander vorkommen könnten. In Anlehnung an ZUKOWSKI et al. (1993) setzten sie folglich auf Betriebsebene an und untersuchten 39 belgische Betriebe serologisch mittels Tankmilch-ELISA sowie zugehörige Weiden auf Habitate und diese wiederum auf Zwergschlammschnecken. Habitate wurden georeferenziert und in einem GIS mit Daten zu Management und bekanntem Risiko der Gebiete verbunden. Nachdem das Vorkommen von Zwischenwirtsschnecken – noch vor Faktoren wie der Anzahl potenzieller Habitate selbst, der Art der Viehtränken, der Drainage von Weiden und dem Zeitpunkt des Weideauftriebes – starken Einfluss auf die Exposition gegenüber *Fasciola hepatica* hatte, wurden Risikofaktoren für die Besiedelung potenzieller Schneckenhabitats ermittelt. Größere Habitate hatten eine höhere Wahrscheinlichkeit, *Galba truncatula* oder *Radix* spp. als mögliche Zwischenwirte zu beherbergen. Zusätzlich begünstigten lehmige Böden das Vorkommen der Schnecken (CHARLIER et al., 2011).

Um weitere Grundlagen für eine feinskalierte Risikokarte zu schaffen, beobachteten CHARLIER et al. 2014 vier Betriebe, die im Tankmilch-ELISA Fasciolose-positiv reagiert hatten, über die gesamte Weidesaison. Habitate wurden identifiziert und klassifiziert. Zur Beschreibung der Populationsdynamik von *Galba truncatula* wurde eine monatliche Inspektion potenzieller Habitate einschließlich Schneckensuche, Unterscheidung von Alt- und Jungschnecken sowie einer Temperatur- und pH-Messung von Wasser und Boden vor Ort vorgenommen. Das Auftreten sogenannter Indikatorpflanzen, deren Wachstum positiv mit dem Schneckenvorkommen korreliert sein dürfte, fand Berücksichtigung. Auch auf Managementfaktoren wie etwa ein Auszäunen oder Mähen von Habitats wurde geachtet. Temperatur- und Niederschlagswerte einer 18 Kilometer entfernt gelegenen Wetterstation unterzog man einer Validierung auf der Basis an Ort und Stelle gemessener Werte. Um den Infektionsverlauf in den Herden nachvollziehen zu können, nahmen CHARLIER et al. (2014) Blut- und Kotproben vor, nach und im Winter nach der Weideperiode. Die Ergebnisse demonstrierten eine derart enge Korrelation zwischen Luft- und Bodentemperatur, dass nach Meinung der Autoren die Lufttemperatur aussagekräftig genug sei, um

einen möglichen Zusammenhang zur Schneckenhäufigkeit zu erklären. Bei einer Temperatur von mindestens 10 °C ließe diese in gemäßigten Klimazonen ohnehin jeglichen Einfluss auf das Schneckenvorkommen missen. Das Auftreten von *Galba truncatula* erwies sich ferner als positiv korreliert mit der Art des Habitates, gemessenen Niederschlagsmengen, dem Boden- und Wasser-pH-Wert und der Anwesenheit von *Ranunculus spp.* im Habitat. Eine negative Korrelation ergab sich für die Faktoren „Mähen“ und „Wassertemperatur“. Keine aussagekräftigen Zusammenhänge konnten zwischen der Schneckenhäufigkeit und der Herdenprävalenz nachgewiesen werden, was darauf zurückgeführt wurde, dass einige Tiere behandelt worden waren und neben *Galba truncatula* auch andere, nicht untersuchte Schnecken als Zwischenwirte infrage kommen könnten. Dennoch wären die Habitate als Flaschenhals der Leberegeltransmission zu betrachten, könnten künftig beispielsweise über Luftbilder von Drohnen leichter erfasst und gemeinsam mit oben genannten Einflussfaktoren in ein GIS zur Modellgenerierung eingegliedert werden (CHARLIER et al., 2014b).

An diesem Punkt setzen DE ROECK et al. (2014) an. Da das Aufspüren potenzieller Zwischenwirthabitate mittels Geländeuntersuchungen oder Fotoaufnahmen mit sehr viel Aufwand verbunden ist, schlugen sie vor, ein hochauflösendes satellitengestütztes Fernerkundungssystem einzusetzen. Mit Hilfe der Daten aus der Studie von CHARLIER et al. (2011) gelang es ihnen, eine Methode zur semi-automatisierten Erkennung potenzieller Habitate wie Teiche, Gräben und Feuchtgebiete zu erarbeiten. Jene Daten dienten auch dazu, die Methodik zu evaluieren. Diese ermöglichte die Detektion von Gewässern mit einer Fläche von mehr als einem Quadratmeter mit einer Genauigkeit von 87 % und war in der Lage, selbst Feuchtgebiete auszumachen. Auf diese Weise erhobene Daten könnten zukünftig in GIS-Modelle aufgenommen werden (DE ROECK et al., 2014).

KUERPICK et al. (2013) erhoben Daten zur Seroprävalenz der Fasciolose in deutschen Milchviehherden via Tankmilchproben. Diese wurden 2012 auf der Ebene von Postleitzahlengebieten gemeinsam mit mutmaßlichen Risikogrößen in ein GIS integriert. Letztere beinhalteten folgende Faktoren: Vieh- und Betriebsdichte, Monatsdurchschnitte von Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit im Jahr der Beprobung, Art der Flächennutzung, anteilige Fläche von stehenden Gewässern am jeweiligen PLZ-Gebiet. Für Niederschlagsvariablen

ergaben sich keine relevanten Einflüsse auf die serologische Fasciolose-Prävalenz. Ein positiver Zusammenhang wurde unter anderem zwischen den Prävalenzdaten und dem Anteil beweideter Flächen und der Gewässer je PLZ-Gebiet gefunden. Erklärbar ist dies durch die Biologie des Zwischenwirtes und den Weidegang als Hauptinfektionsquelle für Rinder. Das Modell zeigte jedoch auch an, dass noch andere nicht berücksichtigte Faktoren eine Rolle spielen müssten (SCHWEIKLE, 1997).

In jüngster Zeit entstand ein Modell zur Fasciolose im Iran. Es unterstellt einen starken Zusammenhang zwischen klimatischen Bedingungen und Fascioloseausbrüchen. Aus der Verknüpfung des Ollerenshaw-Index und GIS-assoziiierter Daten ging eine klimabasierte Risikokarte für den Iran hervor, die entsprechend verschiedenen Indizes vier Risikoklassen identifizierte. Insgesamt urteilte man, dass nur 3 % der Landesfläche auf Grund starker Regenfälle in Sommer und Herbst ein hohes Fascioloserisiko bärigen (HALIMI et al., 2015).

SELEMETAS et al. beschäftigten sich ebenfalls 2015 im Zuge zweier Arbeiten mit der Fasciolose in Irland. Sie führten eine Clusteranalyse zum Leberegelbefall von Milchviehherden in der Provinz Munster durch. Nach Erhebung des Infektionsstatus via Tankmilchproben im Jahr 2012 wurden die Herden in einem GIS georeferenziert. Durchschnittstemperaturen, Niederschlagswerte, Regentage und nasse Tage aus dem Jahr der Beprobung und dem Zeitraum von 1981 bis 2010 wurden ebenso in das System integriert wie der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), der Enhanced Vegetation Index (EVI) und die Bodenbeschaffenheit inklusive Drainage. Im Vergleich der Rasterfelder des Systems waren 16 Cluster mit hohem und 24 mit geringem Risiko zu erkennen. Die high-risk und low-risk Cluster unterschieden sich am deutlichsten in folgenden Variablen: Nasse Tage, Regentage, Regenmenge, NDVI, Temperatur und Bodenbeschaffenheit (SELEMETAS et al., 2015b).

Alsdann wurde in einer zweiten Studie eine Risikokarte für ganz Irland entworfen. Wiederum sollten Tankmilchproben die Fascioloseprävalenzen widerspiegeln. Getestete Betriebe wurden Postleitzahlgebieten zugewiesen. SELEMETAS et al. (2015a) kalkulierten 108 Kovariablen zu Klima, Boden, Landbeschaffenheit und -nutzung mit ein. Die Rasterung der im GIS entwickelten Karte reflektierte die einzelnen Gemarkungen Irlands, sogenannte townlands. Das mittels Random Forest Methode gewonnene Modell erkannte vor allem niederschlagsassoziierte

Parameter als einflussreich. Im Gegensatz zu den Schlussfolgerungen von MCCANN et al. (2010b) wurde den nah am Beprobungszeitpunkt gelegenen Klimaparametern eine stärkere Bedeutung beigemessen als den Werten vergangener Jahre. Daneben könnten täglich erhobene Messwerte mehr Aussagekraft besitzen als monatliche oder saisonale Durchschnittswerte. Unter den übrigen Parametern ergab sich nur für die Bodenart eine mäßige Relevanz mit Hinblick auf das Fascioloserisiko (SELEMETAS et al., 2015a).

Basierend auf Tankmilch-ELISA-Ergebnissen von Belgien, Deutschland, Irland, Polen und Schweden wurden im Rahmen des GLOWORM-Projektes parallel zwei Modellierungsansätze verfolgt, nämlich Random Forests und Boosted Regression Trees. Sie schlossen 49 Kovariablen mit ein, darunter die Oberflächentemperatur, Vegetationsindizes und Niederschlagswerte. Einen wichtigen Zwischenschritt stellte das Clustering von Datenpunkten dar, um der Heterogenität des untersuchten Gebietes und den somit je nach Region vermutlich variierenden limitierenden Faktoren gerecht zu werden. Beide Modelle enthüllten Temperatur und Niederschlag als wichtigste Faktoren, wenn es darum ging, ein Expositionsrisiko für die Fasciolyse vorherzusagen. Die Vegetation schien hierfür keine größere Rolle zu spielen. Für viele Regionen, insbesondere aus anders gearteten klimatischen Zonen, fehlten allerdings noch für eine großflächige Modellierung erforderliche Daten (DUCHEYNE et al., 2015).

Eine Analyse von OLSEN et al. (2015) beleuchtete die Zusammenhänge zwischen Prävalenzdaten, die auf den Ergebnissen amtlicher Fleischuntersuchungen beruhten, und potenziellen Risikofaktoren für das Auftreten der Fasciolyse in Dänemark. Einzelheiten zu Herdengrößen und -zusammensetzung, zum Zukaufverhalten der Betriebsleiter und Daten zu Eigenschaften der Umgebung wurden berücksichtigt. Via Clusteranalyse ließen sich Hotspots für *Fasciola*-Infektionen bestimmen. Das Vorhandensein von Wasserläufen, Feuchtgebieten und Weideland war positiv mit dem Fascioloserisiko assoziiert. Anbauflächen und Trockengebiete offenbarten negative Korrelationen zum Infektionsrisiko. Zu einer Erhöhung des Risikos konnte es durch Zukauf und die Nähe zu positiv getesteten Herden in der Nachbarschaft kommen. Ebenso zeichneten sich nicht-milchliefernde Herden mittlerer Größe durch ein erhöhtes Fascioloserisiko aus (OLSEN et al., 2015).

2.3.2.3. Ein Risikomodell für die Schweiz

RAPSCH et al. entwickelten 2008 eine interaktive Risikokarte für die Schweiz auf der Basis von 100 m x 100 m Rasterfeldern. Sie beschreibt das potenzielle Vorkommen des Zwischenwirtes und der freilebenden Stadien von *Fasciola hepatica* in Abhängigkeit von Parametern, die deren Überleben und Fortpflanzung beeinflussen. So fanden die Bodenbeschaffenheit einschließlich des Grundwasservorkommens, die Bewaldung und Höhe über N. N. sowie monatliche Durchschnittswerte von Temperatur und Niederschlag aus den Jahren 1994 bis 2004 als Risikofaktoren Eingang in das Modell. Zur Beurteilung des jeweiligen Risikos unter bestimmten Klima- und Umweltbedingungen wurde auf Angaben in einschlägiger Literatur zurückgegriffen. Davon ausgehend unterscheidet die Karte insgesamt fünf Risikograde für eine mögliche Übertragung der Fasciolose und weist monatsabhängig jedes der oben genannten Rasterfelder einer bestimmten Risikoklasse zu (RAPSCH et al., 2008).

Eine Validierung jener Karte durch Felduntersuchungen (BAGGENSTOS et al., 2016) ließ, je nach Auswahl unterschiedlicher Referenzdaten, wechselnde, doch meist unzureichende Sensitivitäten, Spezifitäten und positive prädiktive Werte für die Vorhersage des Fascioloserisikos erkennen. Dies mag unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass relevante Habitate des Zwischenwirtes wie kleinere Bachläufe und Hangwasseraustrittsstellen in der Risikokarte nicht berücksichtigt worden waren. Ferner hatten RAPSCH et al. (2008) bei der Beurteilung des monatsabhängigen Infektionsrisikos nur klimatische Bedingungen des aktuellen Monats, nicht aber die der Vormonate miteinbezogen (BAGGENSTOS, 2012). Neben den Abläufen im und Interaktionen mit dem Endwirt, die das Modell gezielt außen vor lässt, ignoriert es dadurch jedoch auch die Populationsdynamik des Zwischenwirtes und bedarf einer Verbesserung.

III. MATERIAL UND METHODEN

1. Projektbeschreibung

Gegenstand der vorliegenden Dissertation war es, ein mathematisches Modell zu schaffen, welches zu jedem beliebigen Zeitpunkt eine exakte Vorhersage des Vorkommens von *Galba truncatula* innerhalb der Schweiz ermöglichen sollte. Anhand realer Daten zum Schneckenvorkommen wurden mittels Regressionsanalyse relevante klima- und standortabhängige Einflussfaktoren identifiziert und gewichtet. Erst das Wissen um ein Vorhandensein von Zwergschlammschnecken schafft die Voraussetzung zur Bestimmung eines feinskalierten, betriebsspezifischen Infektionsrisikos (CHARLIER et al., 2011; CHARLIER et al., 2014b; CHARLIER et al., 2014a).

Die mathematische Modellierung des Auftretens von Zwischenwirten soll den ersten Schritt hin zu einem umfassenden Transmissionsmodell, welches alle Etappen im Kreislauf der *Fasciola*-Infektion beschreibt, darstellen.

2. Beteiligte Institutionen

Die Modelle entstanden in einer Zusammenarbeit der Klinik für Wiederkäuer mit Ambulanz und Bestandsbetreuung und dem Mathematischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München. Darüber hinaus ermöglichten die Bundesämter für Landestopografie swisstopo, Landwirtschaft (BLW) und Umwelt (BAFU) sowie das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Deutsche Wetterdienst (DWD) das Zustandekommen der Modelle durch die Bereitstellung geeigneter Daten.

3. Generierung des Datensatzes

Voraussetzung für die Durchführung einer Regressionsanalyse, die Beziehungen zwischen dem Vorkommen von Zwergschlammschnecken und potenziellen Einflussfaktoren modellieren sollte, war die Verfügbarkeit vollständiger Datensätze. Ist bekannt, ob an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt Zwergschlammschnecken auftraten, so lassen sich mit Hilfe eines geeigneten Regressionsmodelles aus einer Gruppe getesteter Parameter diejenigen herausfinden, welche das Vorkommen der Schnecken begünstigt oder verhindert

haben könnten. Die Vorselektion der geprüften Parameter wurde in unserem Fall auf Basis von Literaturangaben und ersten Eindrücken bei der Sichtung des Datenmaterials vorgenommen.

3.1. Daten zum Vorkommen von *Galba truncatula*

Als abhängige Variable oder Zielvariable gilt in unserem Ansatz das Vorhandensein von Schnecken der Spezies *Galba truncatula*. Registrierte Schneckenfunde wurden als solche übernommen. Für Orte, die nach Erfahrung des Untersuchers als Zwischenwirthabitate vollkommen ungeeignet waren, musste angenommen werden, dass keine Schnecken vorkamen. Diesen Entscheidungen wurden in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von RONDELAUD et al. (2011) vorrangig hydrographische und botanische Gegebenheiten zugrunde gelegt.

3.1.1. Quellen für Rohdaten

Angaben zum Vorkommen von *Galba truncatula* wurden insbesondere Felduntersuchungen von G. Knubben-Schweizer entnommen, die 2007 in einer Studie (SCHWEIZER et al., 2007) publiziert worden waren. In den Zeitperioden August bis Oktober 1999, Mai bis Oktober 2000 und Juli 2004 war hierbei Weideland von 74 landwirtschaftlichen Betrieben abgegangen und auf Zwergschlammschnecken überprüft worden. Zweimalig in verschiedenen Jahren positiv untersuchte Orte erfuhren in der vorliegenden Arbeit jeweils eine Wertung als Schneckenfund, da zeitabhängige Einflussvariablen, wie Temperaturen und Niederschläge in den Vormonaten, jeweils andere Werte annehmen konnten. Aufzeichnungen zu den Schneckenfundorten bestanden in Form markierten Kartenmaterials. Dazu zählten Parzellenpläne der Betriebe, Landkartenausschnitte und selbstgezeichnete Lagepläne, ergänzt durch Fotoaufnahmen der Habitate.

Zwergschlammschneckenfunde aus den jeweils dreißigminütigen Feldbegehungen von BAGGENSTOS (2012), die eine Validierung der interaktiven Risikokarte von RAPSCH et al. aus dem Jahr 2008 zum Ziel hatten (BAGGENSTOS et al., 2016), flossen ebenfalls in unseren Datensatz mit ein. Sie umfassten den Zeitraum von Juli bis September 2010. Ferner wurden in derselben Studie bis Oktober 2010 zufällig ausgewählte Felder auf ihre Eignung als Zwischenwirthabitate überprüft. Je anders geartetem Feldabschnitt (z. B. Acker vs. Wiese), der keine Voraussetzungen für das Auftreten von *Galba truncatula* bot, fand ein

Geländepunkt Eingang in unsere Modelle. Für ihn wurde angenommen, dass keine Zwergschlammschnecken vorkamen.

Alle untersuchten Gebiete konnten geographisch zehn Kantonen aus vier Großregionen der Schweiz zugeordnet werden, nämlich der Großregion Ostschweiz mit den Kantonen Thurgau, St. Gallen, Glarus, Appenzell Ausserrhoden und Schaffhausen, der Zentralschweiz mit den Kantonen Schwyz, Luzern und Zug, der Großregion Zürich mit dem Kanton Zürich und schließlich dem Kanton Aargau in der Nordwestschweiz.

3.1.2. Kartieren untersuchter Geländepunkte

Für Schneckenfundorte aus der Arbeit von BAGGENSTOS (2012) waren die zugehörigen geographischen Koordinaten bereits bekannt. Auf Kartenausschnitten, Parzellenplänen und selbstgezeichneten Lageplänen markierte Fundorte von G. Knubben-Schweizer bedurften zunächst einer Digitalisierung und Kartierung. Hierzu wurde der frei zugängliche Kartenviewer map.geo.admin.ch (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO et al., 2015) genutzt. geo.admin.ch ist die Geoinformationsplattform der Schweizerischen Eidgenossenschaft innerhalb der Bundesverwaltung. Als Anwender kann man hier direkt auf Geoinformationen, -daten, -dienste und Metadaten des Bundes zugreifen (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO, 2015e). Der Kartenviewer ermöglicht ein Hineinzoomen und wechselt dabei zwischen Schweizer Landeskarten unterschiedlichen Maßstabes. Zudem lassen sich über die Bedienungsleiste des Viewers deckungsgleiche Luftbildkarten einstellen. Tabelle 1 (Kapitel 3.2.1.1.) vermittelt eine Übersicht der Kartenmaßstäbe für die einzelnen Zoomstufen einschließlich der jeweiligen Lagegenauigkeit der Karten. Durch den Vergleich des markierten Kartenmaterials mit der Ansicht im Kartenviewer ließen sich exakte geographische Koordinaten für die einzelnen Fundorte von Zwergschlammschnecken bestimmen. In Fällen, in denen die genaue Lage der Fundorte nicht mit Sicherheit rekonstruiert werden konnte, wurden diese aus dem Datensatz gelöscht. Gleichermäßen verfuhr man mit Fundorten, an denen das Gelände beispielsweise durch Plantagenbau oder Ackerung und mutmaßliche Drainage eine Beschaffenheit aufwies, die deutlich von derjenigen zum Zeitpunkt des Schneckenfundes abwich. Begonnen wurde die Kartierung in dem der Schweiz eigenen Bezugssystem CH1903/ LV03. Mit dem Bezugsrahmenwechsel hin zu CH1903+/ LV95 wurde dieses, im Kartenviewer

favorisierte System für die weitere Kartierung und die spätere Erhebung von Bodenmerkmalen genutzt. Die Differenzen zwischen dem alten und neuen Bezugsrahmen variieren schweizweit zwischen null (Bern) und rund eineinhalb Metern (Engadin, Genf) (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2006). Aufgrund der Lokalisation unserer auf Zwergschlamm Schnecken untersuchten Regionen im Nordosten der Schweiz ist durch den Systemwechsel mit keiner oder nur einer äußerst minimalen Verzerrung der geographischen Koordinaten von weniger als eineinhalb Metern zu rechnen.

Ebenfalls mit Hilfe des Kartenviewers und der darin enthaltenen Kennzeichnungsfunktion wurden die von R. Baggenstos als habitationseingeeignet identifizierten Felder markiert und geographische Koordinaten je eines Geländepunktes stellvertretend für jeden unterschiedlich gearteten Feldabschnitt nach oben beschriebener Herangehensweise bestimmt.

3.1.3. Datierung der Felduntersuchungen

Während in den Untersuchungen von G. Knubben-Schweizer der jeweilige Tag, an dem ein Ort inspiziert worden war, durch genaue Datumsnennung bekannt war, existierten in der Studie von R. Baggenstos nur Angaben wie Anfang und Ende der einzelnen Monate. Zur Analyse der Bedeutung klimaabhängiger Einflussgrößen waren jedoch gleich große Wetterdatensätze und damit taggenaue Angaben erforderlich. Daher musste für „Anfang des Monats“ der Vierte, für „Ende des Monats“ der 28. eines jeden Monats willkürlich angenommen werden.

3.1.4. Selektion und Bereinigung der Daten

Künstliche Habitate wie Weidebrunnen würden sich mit Hilfe der für die Modelle vorausgewählten klima- und geländeabhängigen Kovariablen nicht erklären und somit nicht vorhersagen lassen. Hierfür wäre analog zu Ansätzen aus Belgien (CHARLIER et al., 2011; CHARLIER et al., 2014b) die Berücksichtigung von Managementfaktoren wie etwa die Art und Anbringung von Viehtränken ((PETZOLD, 1989) zitiert in (SCHWEIZER et al., 2007)) als Kovariablen erforderlich. Da dies nicht als Bestandteil unserer Modelle geplant war, wurden künstliche Habitate aus dem Datensatz ausgeschlossen.

Darüber hinaus beschränkt sich der Datensatz gemäß der einleitend genannten Definitionen von MEHL (1932) vorrangig auf Primärhabitats wie permanente Gräben, Bäche und Hangwasseraustritte. Nur von Primärhabitats ausgehend

können Schnecken der Spezies *Galba truncatula* nahegelegene temporäre Sekundär- und Tertiärhabitats besiedeln. So ist das Auftreten von Zwergschlammschnecken letztlich unweigerlich an das Bestehen von Primärhabitaten gebunden und kann durch ein Modell, das den Primärhabitaten Rechnung trägt, hinreichend beschrieben werden. In einigen Fällen von Gräben und Hangwasseraustritten ist ein periodisches Verhalten und damit der Übergang zu Sekundärhabitaten, in denen das Wasser bei längeren Trockenperioden versiegen kann (MEHL, 1932), nicht mit Sicherheit auszuschließen.

3.2. Potentielle Einflussgrößen (Kovariablen)

Aus der Beschreibung geeigneter Lebensbedingungen für *Galba truncatula* (Kapitel 1.4.2.) und bisherigen Modellierungsversuchen zur Fasciolose weltweit (Kapitel 2.3.) geht hervor, in welchem hohem Maße das Vorkommen der Zwergschlammschnecken von klimatischen Bedingungen und lokalen Gegebenheiten wie der Bodenbeschaffenheit und Topographie abhängen kann. Nachfolgend werden die potenziellen Einflussfaktoren beschrieben, welche auf Basis von Literaturangaben zu früheren Modellansätzen und persönlichen Erfahrungen der Untersucher vorausgehender Studien (SCHWEIZER et al., 2007; BAGGENSTOS et al., 2016) für die Modellierung vorselektiert wurden. Unter diesen Parametern sollten mittels Regressionsanalyse diejenigen als im Modell verbleibende, unabhängige Kovariablen identifiziert werden, deren Ausprägung entscheidenden Einfluss auf das Schneckenvorkommen als abhängige Variable hat.

3.2.1. Gelände- und bodenabhängige Einflussgrößen

Insgesamt wurden Daten zu 24 überwiegend kategorialen Variablen erhoben, welche die Topographie und Bodenbeschaffenheit an den auf Zwergschlammschnecken und Habitats untersuchten Orten beschreiben (Tabelle 12 des Anhangs). Drei von ihnen, der *Niederschlagshaushalt*, die *Klimaeignung* und die *Bewässerungsbedürftigkeit* der Flächen beinhalten in hohem Maße auch klimatische Faktoren und bilden damit die Schnittstelle zu den im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Klimavariablen. Ausgangspunkt für den Datenbezug war auch hier der map.geo.admin.ch Kartenviewer als Geoportal des Bundes. In ihm lassen sich gewünschte Parameter über das Verzeichnis auswählen und alsdann in Form von Layern in die Karte einblenden. Diese Layer beruhen in der Regel auf,

von verschiedenen Bundesämtern zur Verfügung gestellten, digitalisierten Karten unterschiedlichen Maßstabs.

Die verschiedenen Kategorien der einzelnen kategorialen Kovariablen können den entsprechenden Tabellen zu ihren absoluten Häufigkeiten (Tabellen 19 bis 39 des Anhangs) entnommen werden.

3.2.1.1. Schweizer Landeskarten

Die Basiskarten der Grundansicht des Kartenviewers werden von verschiedenen Schweizer Landeskarten gebildet. Durch Hineinzoomen lassen sich sukzessive und automatisch immer größer werdende Kartenmaßstäbe anzeigen. Tabelle 1 vermittelt eine Übersicht der Kartenmaßstäbe für die jeweiligen Zoomstufen einschließlich der ihnen eigenen Lagegenauigkeiten. Anstelle der farbigen Landkarten kann der Anwender problemlos auch deckungsgleiche Luftbilder im Kartenviewer einstellen.

Tabelle 1: Zoomstufen und Maßstäbe verwandter Schweizer Landeskarten

Zoomstufe	Maßstab	ungefähre Lagegenauigkeit (m)
20 km	1:1000000	300
10 km	1:1000000	300
5 km	1:500000	150
2 km	1:200000	60
1000 m	1:100000	30
500 m	1:50000	15
200 m	1:25000	7,5
100 m-10 m = swissTLM-Map	1:5000-1:10000	0,2-3

In manchen Fällen wurden zur ergänzenden Betrachtung zusätzlich Luftbilder von Google Earth herangezogen. Waren Anfang des Jahres 2015 über die Hilfe des Anbieters noch Daten zugänglich, die den Luftbildern eine Genauigkeit von 25 bis 50 cm zuwies, finden sich aktuell (Stand: 16.08.2015) über die FAQs (Frequently Asked Questions) nur Angaben zu in Städten erreichten Detailauflösungen von weniger als einem Meter und Hinweise auf die starke Heterogenität der Ausgangsbilder (GOOGLE INC., 2015). Laut Wikipedia liegt die Basisauflösung von Google Earth-Aufnahmen weltweit bei 15 m, für Europa variieren die Angaben von 15 cm bis zu einem Meter. Ebenso variabel ist das Alter der verwendeten Bilder (WIKIPEDIA - DIE FREIE ENZYKLOPÄDIE,

2015c). Es kann im jeweiligen Luftbild abgelesen werden und durchlief auch für von uns verwendete Aufnahmen einen Zeitraum von mehreren Jahren.

3.2.1.2. Vegetation

Die in einigen Modellen berücksichtigte potenzielle Transpiration (OLLERENSHAW, 1966) oder Evapotranspiration (MALONE et al., 1987; YILMA und MALONE, 1998) hängt unter anderem von Intensität und Artengefüge der Vegetation ab (BROWN, 2000). So liegt nahe, dass Mikroklima und Wasserhaushalt in potenziellen Habitaten durch Art und Ausmaß der Vegetation beeinflusst werden. Mangelndes Algenwachstum aufgrund minderer Sonneneinstrahlung ((PETZOLD, 1989) zitiert in (BAGGENSTOS, 2012)) könnte einerseits ein Grund dafür sein, dass Zwergschlammschnecken selten an Bachläufen in Wäldern (BAGGENSTOS, 2012) vorzufinden sind, da sie sich zum Teil von Algen ernähren (MEHL, 1932). Andererseits dürfte ein mäßiger Bewuchs, beispielsweise in Form einzelner Bäume und Sträucher, Schattenfelder erzeugen, die durch Verringerung des Austrocknungsrisikos einen positiven Beitrag zum Überleben der Schnecken leisten könnten.

Daher wurden zur Erfassung der Vegetation am untersuchten Ort folgendermaßen bezeichnete Kovariablen berücksichtigt: *REN Wald*, *Wald Bild* und *Bäume/Sträucher*.

Das nationale ökologische Netzwerk REN (Réseau Ecologique National) wurde vom Bundesamt für Umwelt in enger Zusammenarbeit mit den kantonalen Fachstellen für Natur- und Landschaftsschutz erarbeitet. Es handelt sich dabei um einen technisch/ wissenschaftlichen Bericht, der die Landschaft der Schweiz aus ökologischer Sicht aufzeigt. Er stellt auf Karten im Maßstab 1 : 25000 (gültiger Maßstabsbereich maximal 1 : 24000) sowohl die Zerschneidung als auch die Vernetzungselemente der Lebensräume dar. Dabei wird nicht nur die aktuelle Situation betrachtet, sondern auch das Potenzial der Landschaft berücksichtigt. So entsteht ein Gesamtbild der fünf großen ökologischen Netzwerke des Landes, ihrer entsprechenden Kern- und Ausbreitungsgebiete sowie ihrer Kontinua und Korridore (Datenstand: 14.02.2011). Zu diesen Netzwerken zählen auch die weiter unten erwähnten, nämlich das *REN Feuchtgebiet*, *REN Trockenstandort* und *REN Fließgewässer/ Seen* (BERTHOUD et al., 2004; BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU), 2015b).

Bei der Erhebung von Daten zum *REN Wald* fiel auf, dass nur ein Bruchteil aller vorkommenden Wälder in dieses Netzwerk aufgenommen worden war. Daher wurde als weitere Kovariable *Wald Bild* eingeführt. Im Luftbild des Kartenviewers erfolgte eine Überprüfung, ob Wälder vorhanden waren und im positiven Fall wurde unterschieden, ob der untersuchte Geländepunkt nur im Umkreis von bis zu 200 Metern um ein Waldstück oder am beziehungsweise im Wald selbst gelegen war.

Einem etwaigen Unterschied im Effekt vollkommener Bewaldung oder einzelner schattenspendender Gewächse sollte die binär beantwortete Kovariable *Bäume/Sträucher* Rechnung zu tragen. Auch sie stützt sich auf Luftbilder oben genannter Quelle.

3.2.1.3. Höhe über N. N.

Da die Temperatur mit der Höhe über N. N. abnimmt (BLÜTHGEN und WEISCHET, 1980), könnte ein Zusammenhang zwischen der Höhenlage und dem Vorkommen von *Galba truncatula* bestehen. Hinzu kommt, dass mit ansteigender Höhe auch Boden und Vegetation karger werden. Eine Reihe von Autoren hat die Höhe über N. N. bereits in ihren Modellen berücksichtigt und zum Teil Grenzen ermittelt, innerhalb derer mit dem Auftreten von Zwergschlammschnecken zu rechnen ist (SCHWEIKLE, 1997; MALONE et al., 1998; YILMA und MALONE, 1998; TUM et al., 2004; DUTRA et al., 2010; MCCANN et al., 2010a). In der Schweiz wird bislang eine kritische Grenze von 2100 m über N. N. für das Vorkommen von *Galba truncatula* angenommen (ECKERT et al., 1975).

Präzise Höhenangaben konnten in unserem Fall durch Rechtsklick in die oben genannten Karten des map.geo.admin.ch Kartenviewers ermittelt werden. Sie beruhen auf dem digitalen Höhenmodell swissALTI^{3D} des Bundesamtes für Landestopographie swisstopo, das zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert wurde. Dieses arbeitet mit einer Maschenweite von zwei Metern. Die Abweichung zur Realität beträgt höchstens einen Meter (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO, 2015a).

3.2.1.4. Hanglagen

Schon MALONE (1992) war sich dessen bewusst, dass frühe, vorrangig klimabasierte Modelle zur Fasciolose, wichtige standortspezifische Eigenheiten außer Acht gelassen hatten und daher für den Einsatz auf Betriebsebene nicht geeignet waren. Zu diesen Eigenheiten zählte er unter anderem das Geländegefälle (MALONE et al., 1992). Dieses fand in weiteren Ansätzen Berücksichtigung (YILMA und MALONE, 1998; TUM et al., 2004; MCCANN et al., 2010a) und wurde auch in unser Modell miteinbezogen, nicht zuletzt deshalb, weil von einer Beeinflussung der Fließrichtung von Wasser und einem Zusammenhang mit Hangwasseraustritten als potenziellen Habitaten auszugehen ist.

Um das Gefälle auszudrücken, eignete sich die Variable *Hanglagen Landwirtschaft*, die zwischen vier verschiedenen Neigungsgraden differenziert. Sie erkennt Hangneigungsflächen von mindestens einem Ar und lässt sich mit einem Maßstab von 1 : 500 als Layer im Kartenviewer, bereitgestellt vom Bundesamt für Landwirtschaft, aufrufen (Datenstand: 31.12.2012). Der Datensatz *Hanglagen Landwirtschaft* ist Teil der Grundlagen zur Berechnung der landwirtschaftlichen Direktzahlungen und dient dazu, erschwerende Produktions- und Lebensbedingungen in der Landwirtschaft zu berücksichtigen. Er wurde gesamtschweizerisch einheitlich berechnet. Die Produktion beruht auf dem Terrainmodell swissALTI^{3D} von swisstopo (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014b).

3.2.1.5. Biotope für *Galba truncatula*

Zum bevorzugten Lebensraum von *Galba truncatula* zählen wie eingangs erwähnt kleine und meist seichte, stehende Gewässer sowie Gräben und Bäche mit geringen Fließgeschwindigkeiten (FRÖMMING, 1956; TORGERSON und CLAXTON, 1999; CHARLIER et al., 2011; DE ROECK et al., 2014; OLSEN et al., 2015). Als mutmaßliche Primärhabitats wurden in unsere Modelle alle mit Hilfe des oben genannten Kartenmaterials erfassbaren *Gewässer im Umkreis von 100 Metern* um den untersuchten Ort, *Riet und Feuchtflächen* sowie *Hangwasseraustrittsstellen* aufgenommen. Letztere werden bei MATT et al. (2007) als potenzielle Habitate genannt. Aufzeichnungen von G. Knubben-Schweizer und R. Baggenstos zu den von ihnen untersuchten Geländepunkten enthielten meist detaillierte Ortsbeschreibungen, aus denen das Vorhandensein von Gewässern, permanenten Feuchtflächen und Hangwasseraustritten

herauszulesen war. Als wesentliche Basis zur Verifizierung der Aufzeichnungen unserer Voruntersucher wurden Daten folgender Gewässernetzkarten genutzt: Gewässernetz Vektor 200 (Stand: 01.01.2015), Vektor 25 (Stand: 1998 bis 2006) und, als Auszug des Vector 25 – Version GW07, das Gewässernetz 1 : 2 Mio. (Stand: 01.01.2007). Das Bundesamt für Landestopographie swisstopo ermöglicht über den Kartenviewer unmittelbare Einsicht in jene hydrographischen Karten, die Teil des Gewässerinformationssystem GEWISS des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) sind. Sie stellen die Lage von Bächen, Flüssen sowie Seen dar und berücksichtigen dabei selbst unterirdische Verläufe (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO, 2014, 2015f; BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU), 2015a). Ihre Maßstäbe und Lagegenauigkeiten können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Maßstäbe und Lagegenauigkeiten der Gewässernetzkarten

Karte	Maßstab	Lagegenauigkeit (m)
Gewässernetz 1 : 2 Mio. (Auszug aus dem Gewässernetz Vektor 25)	1:2 Mio.	3-8
Gewässernetz Vektor 200	1:200000	20-60
Gewässernetz Vektor 25	1:25000	3-8

Um die Eigenschaften der beschriebenen Gewässer besser einschätzen und ihre Lage bestätigen zu können, wurde die Luftbildfunktion des map.geo.admin.ch Kartenviewers und Google Earth zu Hilfe genommen. Daten zu den ökologischen Netzwerken *REN Fließgewässer/ Seen*, *REN Feuchtgebiet* und *REN Trockenstandort* – letzteres als Repräsentant ungeeigneter Lebensräume für den Zwischenwirt – wurden zwar analog zum *REN Wald* erhoben, beinhalteten aber auch in diesen Fällen keine flächendeckende Kennzeichnung sämtlicher Gewässer, Feuchtgebiete und Trockenstandorte, sodass sie vorrangig einer ergänzenden Betrachtung dienen konnten. Eine Klassifikation in *REN Fließgewässer/ Seen* kam nur an dreien aller untersuchten Geländepunkte vor und konnte aus diesem Grund letztlich nicht in die Regressionsanalysen aufgenommen werden.

3.2.1.6. Bodeneigenschaften

Von der Bodenart (MEHL, 1932) bis hin zum pH-Wert des Bodens (SOULSBY, 1982; CHARLIER et al., 2014b) wurde über die Jahre verschiedensten Bodenparametern eine Relevanz für die Existenz von Zwergschlammschnecken beigemessen.

Da es nicht gelang, detaillierte Daten zum Boden-pH in der Schweiz zu beziehen, wurden die Parameter *Lithologie Hauptgruppen* und *Gesteinklassierung* der lithologisch-petrografischen Karte der Schweiz entnommen. Auch diese ließen sich als Layer über den Kartenviewer map.geo.admin.ch abrufen und wurden vom Bundesamt für Landestopographie im Maßstab 1 : 500000 zur Verfügung gestellt (Datenstand: 04.03.2006). Die Auflösung am Boden kann bei abgeleiteten Themenkarten nicht exakt bestimmt werden, da die Lage der geologischen Objekte der Interpretation des kartierenden Geologen unterliegt. Sie weichen zusätzlich durch Gewichtung und Generalisierung vom eigentlichen Ort ab (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO, 2015b, 2015c).

Durch das jeweilige Gestein und seine chemische Zusammensetzung sind Böden sehr unterschiedlich. Auf Granit, Sandstein oder Sanden entstehen Böden, die im Laufe ihrer Entwicklung stark versauern. Auf Kalkstein oder anderen karbonathaltigen Ausgangsgesteinen wie beispielsweise Mergel entstehen basenreichere Böden. Die Bodenentwicklung ist folglich immer zuerst einmal abhängig von der Zusammensetzung der Ausgangsgesteine und ihren Mineralen (EFSUPS, 2007). Von den lithologischen Merkmalen kann somit indirekt auf pH-Eigenschaften des Bodens geschlossen werden. Darüber hinaus könnten allgemeinere Zusammenhänge zwischen Gesteinscharakter und Schneckentauglichkeit der Böden durch die Berücksichtigung im Modell aufgedeckt werden.

In engem Zusammenhang mit der Lithologie verschiedener Böden steht das Grundwasservorkommen. Es wird im Modell von RAPSCH et al. (2008) erwähnt. Ungeklärt ist bislang jedoch, die wahre Bedeutung für das Vorkommen von Zwergschlammschnecken, auch wenn SCHNIEDER (2006) eine bevorzugte Besiedelung von Gelände mit hohem Grundwasserstand beschreibt. Daher wurden für unsere Modelle die Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen als *Grundwasservorkommen 500* einerseits und sie ergänzende Objektinformationen wie Hinweise auf Quelfassungen, Brüche in den Gesteinsschichten,

Flussinfiltrationen und unterschiedliche Grundwasserstockwerke als *Grundwasserzusatz* andererseits erfasst. Zugehörige Daten entstammten der Hydrogeologischen Karte der Schweiz (Datenstand: 03.11.2008). Die Zuständigkeit für diese Karte im Maßstab 1 : 500000 liegt bei den Bundesämtern für Landestopographie swisstopo und Umwelt (BAFU). Durch die Generalisierung ursprünglich im Maßstab 1 : 200000 erhobener Grundwasservorkommen lässt die Karte Ungenauigkeiten im Sinne von Abweichungen um bis zu einen Kilometer zu (persönliche Mitteilung von SINREICH² (2015)).

In eine Vielzahl von Modellansätzen zur Fasciolose flossen Merkmale der Bodenhydrologie und Bodenarten als wesentliche Determinanten mit ein (MALONE et al., 1992; MALONE und ZUKOWSKI, 1992; MALONE et al., 1998; YILMA und MALONE, 1998; KLEIMAN et al., 2007; MCCANN et al., 2010a; CHARLIER et al., 2011; SELEMETAS et al., 2015a).

Informationen zu weiteren Bodenparametern, die für das Schneckenvorkommen von Bedeutung sein dürften, konnten der digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz entnommen werden.

Sie besteht aus 144 verschiedenen Kartierungseinheiten, die sich auf ca. 11000 Polygone verteilen. Erhebungsgrundlage war die Bodeneignungskarte der Schweiz im Maßstab 1 : 200000, basierend auf Grundlagendaten von 1980. Im Jahr 2000 erfolgte eine Überarbeitung der digitalisierten Karte.

Jede Kartierungseinheit ist mit einem Code aus einem Großbuchstaben und einer Zahl versehen. Sie entspricht jeweils einer Kombination aus sechs Bodeneigenschaften: *Gründigkeit*, *Skelettgehalt*, *Wasserspeichervermögen*, *Nährstoffspeichervermögen*, *Wasserdurchlässigkeit* und *Vernässung*.

Die insgesamt 144 Kartierungseinheiten sind in der Karte nach dem Gesichtspunkt der Bodeneignung in 18 unterschiedlich eingefärbten Gruppen zusammengefasst. Für diese Klassierung wurden in erster Linie landwirtschaftliche Kriterien verwendet (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2013) Die Rechte an den in den Jahren 2014 und 2015 bezogenen Geodaten liegen bei den Bundesämtern für Statistik (BFS)

² Sinreich, M. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, persönliche Mitteilung (2015)

GEOSTAT und Landwirtschaft (BLW). Die Daten wurden nach Einblendung parameterspezifischer Layer in den Kartenviewer ausgelesen.

Als Maß der unmittelbaren Bodeneignung diente dabei die *Bodeneignung für Kulturland* (Datenstand 24.10.2008). Im Gegensatz zu den 18 Gruppen, welche die Ausgangskarte vorsieht, umfasst die *Bodeneignung für Kulturland* nur fünf Kategorien (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014a). Sie wurde nach Vorbild des Modells von MCCANN et al. (2010b), welches unter anderem den Einfluss verschiedener Kategorien von Agrarflächen auf die Fascioloseprävalenz testet, in unseren Ansatz aufgenommen.

Die Erläuterungen zu optimalen Lebensbedingungen für *Galba truncatula* (Kapitel 1.4.2.) sowie die Auswahl relevanter Einflussfaktoren in bisherigen Modellen zur Fasciolose (Kapitel 2.3.) verweist auf die zentrale Bedeutung feuchter Klima- und Bodenverhältnisse für Überleben und Reproduktion der Zwergschlammschnecke.

Daher sollten weitere Parameter der Bodeneignungskarte Aufschluss über bodenhydrologische Verhältnisse im untersuchten Gelände geben (Datenstand: 01.06.2012):

Die *Gründigkeit* definiert sich als durchwurzelbare Bodentiefe. Dazugerechnet werden die allgemeine Grob- und Feindurchwurzelung, nicht aber zum Beispiel in Klüfte vordringende Wurzeln (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014g). Neben ihrem Stellenwert für den Wasserhaushalt des Bodens gibt sie, als Maß für die Mächtigkeit des Lockermaterials oberhalb der festen Schichten des Bodens, Auskunft über die Gestaltung der oberen Horizonte. Damit ergänzt sie die Kovariable *Lithologie Hauptgruppe*, die sich auf mehr oder weniger tief gelegene Gesteinsschichten bezieht, in ihrem Informationsgehalt hinsichtlich der Bodenbeschaffenheit.

Der Begriff des *Wasserspeichervermögens* bezieht sich auf das Wasser, das vom Boden durch Tensionskräfte festgehalten wird und durch die Pflanzen leicht aufnehmbar ist (Saugspannung 0,1 bis 1 Atm). Überschlagsmäßig kann pro einem Zentimeter physiologischer *Gründigkeit* mit einem Millimeter leicht verfügbaren Wassers gerechnet werden. Die sogenannte physiologische *Gründigkeit* ergibt sich aus der gesamten durchwurzelbaren Schicht, abzüglich des Bodenskelettes und großer Hohlräume in Sand-Kiesböden. Hinzu kommen Abzüge für kompaktes

Gefüge und sauerstoffarme Horizonte (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014i).

Einen wichtigen Aspekt des Bodenwasserhaushalts stellt die *Wasserdurchlässigkeit* dar. Sie wurde an gesättigten Stechzylinderproben aus dem am schlechtesten durchlässigen Horizont der obersten 50 cm im Labor bestimmt. Aus Beobachtungen im Feld ergaben sich Beziehungen zwischen dem Niederschlag, der Durchlässigkeit und den morphologischen Merkmalen (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014h). Die daraus resultierenden Werte waren ebenfalls über einen entsprechenden Layer der Bodeneignungskarte im Kartenviewer zugänglich.

Als weitere Variable der Bodenhydrologie fand die *Vernässung* Eingang in unsere Modelle. Wenn außer dem Niederschlagswasser noch Fremdwasser in Form von Hang- oder Grundwasser im Boden vorhanden ist, spricht man von Fremdvernässung (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014f).

Nachdem Einzeldatensätze zu im Boden vorkommenden chemischen Elementen, wie sie bei MCCANN et al. (2010b) Beachtung fanden, nicht zur Verfügung standen, wurde auf das *Nährstoffspeichervermögen*, einen weiteren Parameter der Bodeneignungskarte zurückgegriffen. Analog dem *Wasserspeichervermögen* soll das *Nährstoffspeichervermögen* angeben, wie viele Äquivalente an Kationen durch den Boden gespeichert werden. Die gespeicherten Milliäquivalente Kationen wurden auf eine Bodensäule mit einem Quadratcentimeter Grundfläche und eine, der physiologischen *Gründigkeit* entsprechenden, Höhe umgerechnet. Daraus ergaben sich die Milliäquivalente (mval) Kationen pro Quadratcentimeter. (Datenstand: 01.06.2015)(BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014e).

3.2.1.7. Boden- und klimassozierte Eigenschaften

Die folgenden drei Kovariablen, *Bewässerungsbedürftigkeit*, *Klimaeignung* und *Niederschlagshaushalt*, sind methodisch noch den oben genannten zuzurechnen, da die zugehörigen Datensätze in gleicher Weise über Layer im Kartenviewer ermittelt wurden. Inhaltlich stellen sie eine Zusammenschau vegetationsbezogener, landwirtschaftlicher sowie klimatischer Verhältnisse dar und bilden so den Übergang zu den im Folgekapitel beschriebenen Klimavariablen.

Die Angaben des Bundesamtes für Landwirtschaft (Datenstand: 10.11.2009) zur *Bewässerungsbedürftigkeit* des Bodens bestehen in Form eines 500 m x 500 m Rasters, deckten im Layer jedoch nur einen Teil der von uns betrachteten Flächen ab. Die Lückenhaftigkeit des zugehörigen Datensatzes machte einen späteren Ausschluss dieses Parameters bei der Erstellung der Regressionsmodelle erforderlich.

Die Kovariablen *Klimaeignung Übersicht* und *Niederschlagshaushalt* wurden mit einem Datenstand vom 24.10.2008 der Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft entnommen. Auf den vier Blättern der Karte im Maßstab 1 : 200000 ist eine Gesamtbeurteilung der klimatischen Voraussetzungen und Einschränkungen für die Landwirtschaft in 20 Kategorien wiedergegeben. Diese Eignungsklassen stellen die kartierbaren Einheiten der Karte dar und beruhen auf einem Vergleich von Schwellenwerten der Erträge mit meteorologischen Beobachtungen. Die Karte will auf die erheblichen Unterschiede in den Anbaumöglichkeiten der einzelnen Regionen hinweisen. Sie wird vom Bundesamt für Landwirtschaft verwaltet und entstand in einer Zusammenarbeit der Meteorologischen Zentralanstalt und anderen interessierten Kreisen mit dem Geographischen Institut der Universität Bern sowie der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Changins. Erhebungszeitraum für die Grundlagendaten waren die Jahre 1973 bis 1976 (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2014d, 2014c).

Die Variablen *Klimaeignung Übersicht* und *Niederschlagshaushalt* wurden in unseren Modellansatz mitaufgenommen, um der Bedeutung meteorologischer Verhältnisse und einer etwaigen Relevanz der klimaabhängigen Landeignung für das Vorkommen von Zwergschlammschnecken gerecht zu werden.

Abzüglich der Parameter *REN Fließgewässer/ Seen* und *Bewässerungsbedürftigkeit* standen letztlich Daten von 22 boden- und geländeabhängigen Größen für die Regressionsanalyse zur Verfügung (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zur Regressionsanalyse herangezogene boden- und geländeabhängige Kovariablen

Kovariablen	
Bäume	Lithologie Hauptgruppen
Bodeneignung für Kulturland	Nährstoffspeichervermögen
Gesteinklassierung	Niederschlagshaushalt
Gewässer (im Umkreis von 100 m)	REN Feuchtgebiet
Gründigkeit	REN Wald
Grundwasservorkommen 500	REN Trockenstandort
Grundwasser (GW)-Zusatz	Riet/ Feuchtflächen
Hanglagen	Wald Bild
Hangwasseraustritt	Vernässung
Höhe über N. N.	Wasserdurchlässigkeit
Klimaeignung Übersicht	Wasserspeichervermögen

Darunter befinden sich 21 kategoriale Kovariablen, für die Referenzkategorien festgelegt werden mussten (Tabelle 13 des Anhangs). Weist man mit Hilfe der Regressionsanalyse einen negativen oder positiven Einfluss verschiedener Kategorien dieser Variablen nach, gilt dieser stets in Bezug auf die Referenzkategorie. So kann beispielsweise die Kategorie 2 (*grundfeucht*) unserer Kovariable *Vernässung* keinen relevanten, einen positiven oder negativen Einfluss auf das Schneckenvorkommen, im Vergleich zur Referenzkategorie 1 (*keine Vernässung*) aufweisen.

3.2.2. Klimaabhängige Einflussgrößen

Bereits OLLERENSHAW (1959) gründete seine Vorhersagen zur Inzidenz der Fasciolose in Anglesey vorrangig auf meteorologische Faktoren. Ein Großteil der Risikomodelle zur Fasciolose, die sich in den Jahrzehnten danach anschlossen, folgte seinem Vorbild.

3.2.2.1. Temperaturparameter

Um allen Anschauungen zur Temperaturabhängigkeit des Vorkommens von *Galba truncatula* gleichermaßen Rechnung zu tragen, wurden in unseren Modellen minimale, mittlere und maximale Tageswerte sowohl der zwei Meter über dem Boden gemessenen Umgebungstemperatur als auch der fünf Zentimeter über dem Boden beziehungsweise Gras gemessenen Lufttemperatur auf ihren Einfluss hin überprüft. Daten zur in fünf Zentimetern Tiefe bewerteten Bodentemperatur waren unvollständig und mussten daher aus dem Modellansatz

ausgeschlossen werden.

Zur vereinfachten Untersuchung eines möglichen Effektes von Temperaturextrema schienen uns ferner die Parameter *Eistage*, *Frosttage*, *Sommertage* und *Hitzetage* geeignet (Tabelle 4).

3.2.2.2. Niederschlag, Feuchte und Sonneneinstrahlung

Wie die Beschreibung geeigneter Habitate bereits nahelegt, sind Zwergschlammschnecken in hohem Maße an Feuchtigkeit gebunden (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956).

Als Kovariablen des Niederschlages wurden in unserem Fall *tägliche Niederschlagssummen* und die *Anzahl der Tage des Jahres mit einer Niederschlagssumme von mehr als 100 mm* bestimmt.

Daten zur Anzahl der Tage eines jeden Monats mit Schneedecke und zur täglichen Sonnenscheindauer konnten nicht repräsentativ erfasst und in den Modellansatz miteinbezogen werden.

3.2.2.3. Datengranularität und -zeitraum

Für die vorliegende Regressionsanalyse wurden temperatur- und niederschlagsabhängige Parameter, bei denen Extremwerte für das Schneckenvorkommen von Bedeutung sein konnten, in der feinsten standardmäßigen Granularität von einem Tag erfasst. Kovariablen, die bereits eine Verallgemeinerung der Tageswerte beinhalteten, wie *Eis-*, *Frost-*, *Sommer-* und *Hitzetage*, flossen in der feinst möglichen Granularität von einem Monat mit ein (Tabelle 4).

Unter Annahme einer maximalen Lebensdauer der Zwergschlammschnecken von zwei Jahren und einer sieben- bis vierzig-tägigen Entwicklungszeit vom Embryo zur Jungschnecke (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956), wurden Daten zu Einflussfaktoren aus allen drei Jahren vor dem Tag der Feldbegehung in unseren Ansatz integriert. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass ein vollständiger Schneckenzyklus mit allen infrage kommenden Einflussgrößen Berücksichtigung fand.

Um identisch große Datensätze für alle untersuchten Orte unabhängig von Schaltjahren und der unterschiedlichen Länge berücksichtigter Monate zu

gewährleisten, erfolgte eine Rückrechnung vom Datum der Felduntersuchung um jeweils genau 1095, das heißt dreimal 365 Tage. Für alle täglich gemessenen Parameter wie Temperatur- und Niederschlagsgrößen ergaben sich dadurch Datensätze, die 1096 Werte umfassten. Für monatlich bestimmte Kovariablen wie die Summe an *Eis-*, *Frost-*, *Sommer-* oder *Hitzetagen* entstanden kleinere Datensätze von 37 Werten. Die Bestimmung des Datums, bis zu dem zurückgeblickt werden sollte, erfolgte mit Hilfe des *Ewigen Kalenders*, einer Website zur Berechnung von Kalenderdaten (HATZFELD VON, 1997-1998).

3.2.2.4. Datenbezugsquellen

Bezugsquelle für sämtliche Klimadaten war das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Über sein Datenportal IDAweb (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2015) stellt es Lehr- und Forschungseinrichtungen Bodenstationsdaten zur Verfügung (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014b). Diese wurden im Dateiformat CSV (Comma-separated values) als separate Files je Parameter und untersuchtem Ort verarbeitet.

Jeder Messwert ist mit Informationen zur Qualität und zum Bearbeitungszustand (Plausibilitäts- oder Mutationsinformationen) gekennzeichnet. Diese Qualitätsinformationen werden ebenfalls via IDAweb zugänglich gemacht. Doch sind die Bodenmesswerte bereits bei Eingang zu mehr als 95 % einwandfrei. MeteoSchweiz kontrolliert die eingehenden Messwerte und mutiert offensichtlich falsche Werte, wodurch die Korrektheit weiter erhöht wird. Der Bezug der Qualitätsinformationen, welcher die Datenmenge verdreifacht, ist deshalb nur in Ausnahmefällen notwendig (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2009). Im vorliegenden Fall wurde darauf verzichtet. Weitere Informationen dazu finden sich im Anhang, Kapitel 3.

3.2.2.5. Auswahl repräsentativer Wetterstationen

Im IDAweb bereitgestellte Daten gründen sich auf Messungen des SwissMetNet. Das automatische Messnetz von MeteoSchweiz zählt über 130 automatische Messstationen (Stand: 2014). Diese Stationen (Abbildung 3) liefern alle zehn Minuten eine Vielzahl aktueller Daten zu Wetter und Klima in der Schweiz. Die Daten werden automatisch an die zentrale Datenbank der MeteoSchweiz übermittelt, wo sie verschiedene Qualitätskontrollen durchlaufen. Automatische

Niederschlagsstationen ergänzen das Messnetz. An einer Standardstation werden kontinuierlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Sonneneinstrahlung, Niederschlagsmenge, Windrichtung und -geschwindigkeit erfasst. Für jede Station des automatischen Messnetzes von MeteoSchweiz lassen sich Datenblätter mit detaillierten Informationen zum Standort und Messprogramm im PDF-Format abfragen. Über die letzten Jahre hat MeteoSchweiz das Bodenmessnetz modernisiert und erweitert. In der tabellarischen Listung vorhandener Messstationen finden sich derzeit insgesamt 180 einzelne Stationen (Stand: 03.06.2014) (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014c).



Abbildung 3: Messfeld-Station in Aigle mit 10 m hohem Windmasten, einer Messbrücke auf 2 m (Temperatur, Feuchtigkeit und Strahlung) und einem Pluviometer (Niederschlag), 1,5 m über Boden (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014c)

Niederschlag ist eine räumlich sehr variable meteorologische Messgröße und erfordert daher ein besonders dichtes Messnetz. MeteoSchweiz betreibt aus diesem Grund über 70 Stationen (Stand 2014), die den Niederschlag automatisch messen. Weiter verfügt das Bundesamt über ein Netz von Beobachtern, welche die täglichen Niederschläge manuell bestimmen. Dem manuellen

Niederschlagsnetz gehören über 300 Standorte an (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014c). Letztere wurden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Mit Stand vom 03.06.2014 wurden die insgesamt 180 Messstationen unter Angabe ihrer Standorte in Schweizer Landeskoordinaten und ihrer Höhenlage über N. N. in ein CSV-Excel File übertragen. Das Bundesamt für Landestopographie swisstopo stellt in den interaktiven Anwendungen seines Internetauftrittes den Geodienst KML-Generierung zur Verfügung. Er ermöglicht es, eine CSV-Datei mit Schweizer Landeskoordinaten in ein KML File umzuwandeln (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO, 2015d). Keyhole Markup Language (KML) ist eine Auszeichnungssprache (maschinenlesbare Sprache) zur Beschreibung von Geodaten. KML-Dokumente können Geodaten sowohl in Vektor- wie auch in Rasterform beinhalten (WIKIPEDIA - DIE FREIE ENZYKLOPÄDIE, 2015a). Sie sind unter anderem mit Google Earth und Google Maps kompatibel. Durch Öffnen der KML-Datei in Google Earth und Auswahl einer geeigneten Markierung ließen sich die Standorte aller Messstationen im Luftbild von Google Earth anzeigen. Bedingt durch die Ungenauigkeit von Google Earth kann es vorkommen, dass sich eine Station in der Realität bis zu 150 m vom Marker entfernt befindet (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2011).

Mit den Koordinaten der Geländepunkte, die auf Zwergschlammschnecken oder Habitate untersucht worden waren, wurden nach gleicher Vorgehensweise KML-Dateien generiert und in Google Earth geladen. Unter Zuhilfenahme der Messfunktion „Lineal“ des Programmes waren für jeden Punkt der Felduntersuchungen nächstgelegene Wetterstationen herauszufinden. Die Auswahl von Wetterstationen, die für den Datenbezug geeignet schienen, orientierte sich an folgendem Ziel: Die Verfügbarkeit lückenloser Datensätze für jede der gewünschten Einflussgrößen mit der größtmöglichen Repräsentativität für die untersuchten Orte. Um dies zu garantieren, musste mitunter je Ort der Felduntersuchungen auf mehrere verschiedene Messstationen zurückgegriffen werden.

Die Entscheidung, welche Wetterstationen Messwerte mit der bestmöglichen Übertragbarkeit liefern dürften, wurde nach folgenden Gesichtspunkten gefällt: Streng genommen gelten die Aufzeichnungen der Wetterstationen nur für den

Standort der Station. In der Regel ist die Aufstellung der Stationen jedoch so dicht gewählt, dass diese repräsentativ für ihre Umgebung sind. Bei Temperaturen und abgeleiteten Kennzahlen wie *Eis-*, *Frost-*, *Sommer-* und *Hitzetagen* spielt die Höhenlage eine wichtigere Rolle als die Entfernung zum Standort. Hier sollten folglich Stationen in ähnlicher Höhenlage gewählt werden. Bei Niederschlägen, die wie oben erwähnt, räumlich sehr variabel sind, ist den Stationen der Vorzug zu geben, die dem auf Schnecken(habitate) untersuchten Standort nächstgelegenen sind. Bei der *Sonnenscheindauer* wiederum sind beide Faktoren (Höhenlage, Entfernungen zum Standort) als etwa gleichwertig zu erachten ((WITTCHEN et al., 2011); persönliche Mitteilung von BOCK (2015)³).

Zudem fanden Besonderheiten wie milde Seeklimata (zum Beispiel Bodensee, Zürichsee), Muldenlagen mit Kaltluftseen (vergleiche Aadorf), Hügellagen und Alpennähe (persönliche Mitteilung von BADER (2015)⁴) bei der Auswahl repräsentativer Wetterstationen Beachtung.

Tabelle 18 des Anhangs gibt einen Überblick über die verschiedenen Messstationen, deren Daten für die Auswertung verwendet wurden. Sie sind bestimmten IDs (Identifikatoren) zugeordnet, hinter denen sich die untersuchten Standorte verbergen. Ebenfalls lassen sich aus dieser Tabelle die Distanzen und Höhenunterschiede zwischen untersuchtem Ort und zugeordneter Wetterstation herauslesen. Folgende Eckdaten seien genannt: Die maximale Entfernung zwischen einem Bezugspunkt und der ihm zugewiesenen Wetterstation(en) beträgt 31 km, die minimale 0,5 km (beide gerundet auf 0,5). Im Mittel beläuft sich die Distanz damit ungerundet auf 12,3 km. Der Median liegt bei 11,0 km.

Für den maximalen Höhenunterschied zwischen untersuchten Geländepunkten und ausgewählten Wetterstationen ergibt sich ein Wert von 186,3 m. Das Minimum entspricht einer Höhendifferenz von nur 0,7 m. Daraus resultiert letztlich ein mittlerer Höhenunterschied von 75,5 m. Mit 70,0 m weicht der Median geringfügig davon ab.

Bei der Beurteilung dieser Kennzahlen sei in Erinnerung gerufen, dass Maximalwerte nur unter Beachtung oben genannter Prinzipien zugelassen

³ Bock, L. Deutscher Wetterdienst (DWD), München, persönliche Mitteilung (2015)

⁴ Bader, S. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich, Schweiz, persönliche Mitteilung (2015)

wurden. Weiter entfernt gelegene Wetterstationen fanden nur für temperaturabhängige Größen Akzeptanz, deutlich höher oder tiefer als der Bezugspunkt gelegene Stationen für niederschlagsabhängige Parameter. Für untersuchte Flächen mit speziellen Klimaeinflüssen (beispielsweise Seeklima) wurden Wetterstationen aus ähnlich geprägten Klimaregionen priorisiert.

3.2.2.6. Reduktion berücksichtigter Klimavariablen

Tabelle 4 vermittelt eine Übersicht über die meteorologischen Ausgangsvariablen, von denen ein Teil nicht zur Regressionsanalyse herangezogen werden konnte.

Tabelle 4: Bezeichnungen und Granularitäten meteorologischer Ausgangsvariablen, zu denen Daten erhoben wurden

Wetterparameter	Kürzel	Granularität	Anzahl der Werte
Bodentemperatur in 5 cm Tiefe Tagesmittel *	tso005d0	Tag	1096
Lufttemperatur 5 cm über Gras Tagesminimum	tre005dn	Tag	1096
Lufttemperatur 5 cm über Gras Tagesmittel	tre005d0	Tag	1096
Lufttemperatur 5 cm über Gras Tagesmaximum	tre005dx	Tag	1096
Lufttemperatur 2 m über Boden Tagesminimum	tre200dn	Tag	1096
Lufttemperatur 2 m über Boden Tagesmittel	tre200d0	Tag	1096
Lufttemperatur 2 m über Boden Tagesmaximum	tre200dx	Tag	1096
Eistage (Maximum < 0°C)	tnd00xm0	Monat	37
Frosttage (Minimum < 0°C)	tnd00nm0	Monat	37
Sommertage (Maximum ≥ 25°C)	tnd25xm0	Monat	37
Hitzetage (Maximum ≥ 30°C)	tnd30xm0	Monat	37
Sonnenscheindauer Tagessumme in Minuten *	sre000d0	Tag	1096
Tage des Monats mit Schneedecke *	estnd0m0	Monat	37
Niederschlag (Tagessumme 0540 bis 0540 des Folgetages)	rre150d0	Tag	1096
Tage des Jahres mit Niederschlagssumme > 100mm *	rs1000y0	Jahr	4

* Kovariablen, die in der Regressionsanalyse nicht berücksichtigt werden konnten

Temperaturwerte und Tagesniederschläge wurden mit einer Dezimalstelle angegeben, *Eis-*, *Frost-*, *Sommer-* und *Hitzetage* sowie die *Sonnenscheindauer* und *Tage des Monats mit Schneedecke* respektive *Tage des Jahres mit Niederschlagssummen > 100 mm* ohne Nachkommastelle.

Zu den Ausgangsvariablen, die in den Modellen letztlich nicht berücksichtigt werden konnten (Tabelle 4), zählten die *Bodentemperatur in 5 cm Tiefe*, die *Schneedecke* sowie die *Sonnenscheindauer* und *Tage des Jahres mit Niederschlagssummen > 100 mm*.

Als nicht standardmäßig erhobene Klimavariablen wird die *Bodentemperatur* nur an 49 Messstationen in der gesamten Schweiz täglich bestimmt. Daraus ergab sich eine zu geringe Messnetzdicke, um repräsentative Werte für die von uns untersuchten Orte zu erhalten.

Problematisch gestaltete sich ebenso die Suche nach Messstationen, die übertragbare Messwerte für die Anzahl der *Tage des Monats mit Schneedecke* liefern sollten. Die in vertretbarer Entfernung zum jeweiligen Bezugspunkt befindlichen Stationen waren in vielen Fällen einige hundert Meter höher auf Bergen gelegen. Damit konnten sie nicht als aussagekräftige Datenquellen dienen.

Eine Reihe von abgesuchten Geländepunkten befand sich fernab von Wetterstationen, welche die tägliche Sonnenscheindauer in der fraglichen Zeit festhielten. In Ermangelung repräsentativer Stationen musste die Suche nach geeigneten Daten aufgegeben und der Parameter Sonnenscheindauer aus der Auswertung herausgenommen werden.

Tage des Jahres mit Niederschlagssummen > 100 mm traten innerhalb des Gesamtdatensatzes so selten auf, dass ihre statistische Auswertung nicht möglich war.

In Nähe des Bodensees existierten befundete Felder, für die das Messnetz von MeteoSchweiz nur lückenhafte Messreihen liefern konnte. Daher wurden einzelne Messwerte deutscher Stationen herangezogen, die der Deutsche Wetterdienst zur Verfügung stellte.

Untersuchte Flächen, für die keine passenden Wetterstationen auszumachen waren, mussten aus dem endgültigen Datensatz gelöscht werden.

So fehlte es für Felder in Höhen von mehr als 1000 m über N. N. an meteorologischen Daten repräsentativer Stationen. Werte von Messstationen, die auf umliegenden Bergen gelegen sind, konnten nicht übernommen werden, da der Höhenunterschied zum untersuchten Gelände zu hoch war. Gleiches galt für alle übrigen, deutlich tiefer gelegenen Messorte. Dies hatte zur Folge, dass unsere Modellansätze nur Schneckenfunde bis zu einer Höhe von weniger als 1000 m über N. N. miteinrechnen konnten.

3.3. Datenbearbeitung und Konfigurieren weiterer Variablen

Aus den beschriebenen Vorarbeiten resultierten schlussendlich 242 untersuchte Geländepunkte, die durch IDs eindeutig benannt wurden. Sie untergliedern sich in 145 Schneckenfundorte aus den Feldstudien von G. Knubben-Schweizer und 35 Fundorte, die den Untersuchungen von R. Baggenstos im Jahr 2010 entnommen wurden. Die restlichen 62 Orte stellen repräsentative Koordinaten für Flächen dar, die sich in den Feldbegehungen von R. Baggenstos als habitatuntauglich erwiesen hatten. Unter den 145 Fundorten von G. Knubben-Schweizer befinden sich 35 Duplikate, die aus oben genannten Gründen als solche in das Modell mitaufgenommen wurden.

Im nächsten Schritt wurden die IDs mit den ihnen zugeordneten Datensätzen zu gelände-, boden- und klimaabhängigen Kovariablen in R, Version 3.0.1 vom 16.05.2013 (GENTLEMAN und IHAKA, 2013), eingelesen. Bei R handelt es sich um eine Open Source Software, die der statistischen Datenanalyse dient und in unserem Fall das Programm der Wahl für die Regressionsanalyse darstellte.

Im Zuge der sich anschließenden Datenaufbereitung wurden auf Basis erster Eindrücke der Datensatzstrukturen neue klimaabhängige Kovariablen konstruiert. Zur genaueren Analyse des potenziellen Einflusses von *Eis-*, *Frost-*, *Sommer-* und *Hitzetagen* auf das Vorkommen von Zwergschlammschnecken wurde die Anzahl dieser Tage für jedes der drei betrachteten Jahre vor Untersuchung des Geländes zusammengefasst. Das erste Jahr davor umfasst die Monate 26 bis 37, das zweite die Monate 14 bis 25 und das dritte Jahr davor die Monate 2 bis 13. Aus rechnerischen Gründen musste damit der letzte Monat drei Jahre vor der jeweiligen Feldbegehung unberücksichtigt bleiben. Gleiches gilt für sämtliche nachfolgend beschriebene Kovariablen mit der Granularität einzelner Monate.

Als Randbedingungen für Trockenperioden in der Schweiz nennt das Climate Service Center Germany, eine Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und Initiative der Bundesregierung, zehn aufeinanderfolgende Tage mit einer Niederschlagsmenge von $\leq 0,5$ mm pro Tag. In der zitierten Quelle, GYALISTRAS (2000), finden sich Hinweise auf zwei unterschiedliche Definitionen von Trockenperioden. Demnach handle es sich um aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlagssummen von $< 0,5$ mm oder $< 0,1$ mm. Entsprechend dem strengeren der beiden Kriterien wurde für jedes der drei Jahre, die der Felduntersuchung vorausgingen, geprüft, ob beziehungsweise wie oft zehn aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlagssummen von $< 0,1$ mm je Tag vorkamen. Da die verfügbaren Werte zur täglichen Niederschlagssumme nur eine Nachkommastelle besaßen, war die Grenze von $< 0,1$ mm mit einer täglichen Niederschlagssumme von 0 mm gleichzusetzen. Ziel einer Einführung der Kovariable *Trockenperiode* war es, einen potenziellen Effekt von Sommerdürren auf das Schneckenvorkommen nachzuweisen. Daher wurde als weiteres Kriterium für das Vorliegen einer Trockenperiode eine Überschreitung von 15 °C durch das Tagesmittel der Temperatur 5 cm über dem Boden eingeführt. So konnte verhindert werden, dass niederschlagsfreie Wintertage in die Auswertung miteinfließen. Diese umfasste mit den drei vorausgehenden Jahren die Tage 732-1096, 367-731 und 2-366 vor Begehung des jeweiligen Feldes. Der letzte, drei Jahre zurückliegende Tag konnte hier wie bei allen nachfolgenden Kovariablen mit täglich gemessenen Werten aus rechnerischen Gründen keine Beachtung finden.

Bei Sichtung der Niederschlagsdaten ergab sich der subjektive Eindruck einer Gliederung des Datensatzes in Niederschlagssummen von weniger und mehr als 5 mm pro Tag. Aus diesem Grund wurde die *Anzahl der Tage eines jeden Jahres mit Niederschlagssummen von > 5 mm* in das Modell mitaufgenommen, um einen möglichen Unterschied im Effekt auf das Schneckenvorkommen zu untersuchen.

5 cm und 2 m über dem Boden gemessene Temperaturminima, -maxima und -mittel fanden in Form verschiedenster, konstruierter Kovariablen Eingang in das Modell. Jede dieser Variablen wurde für die drei vorhergehenden Jahre getrennt erhoben.

Von der Temperatur 5 cm über dem Boden ließen sich folgende potenzielle Einflussgrößen ableiten: *Maximum der Temperatur 5 cm über Boden < 0 °C*, *Mittel der Temperatur 5 cm über Boden < 0 °C* und *Minimum der Temperatur 5 cm über Boden < 0 °C* als Maß für unterschiedlich kalte Tage sowie *Maximum der Temperatur 5 cm über Boden > 30 °C*, *Mittel der Temperatur 5 cm über Boden > 20 °C* und *Minimum der Temperatur 5 cm über Boden > 15 °C* als Hinweis auf besonders warme Tage.

Unter Verwendung der 2 m über dem Boden gemessenen Temperaturen wurden weitere Kovariablen generiert: *Mittel der Temperatur 2 m über dem Boden < 0 °C* als Anhaltspunkt für sehr kalte Witterungsbedingungen sowie *Maximum der Temperatur 2 m über dem Boden > 30 °C*, *Mittel der Temperatur 2 m über dem Boden > 20 °C* und *Minimum der Temperatur 2 m über dem Boden > 15 °C*, kennzeichnend für heiße Tage.

Die Tabellen 14 bis 17 des Anhangs gewähren einen Überblick über alle konstruierten Klimavariablen und ihren jeweiligen Erhebungszeitraum.

Insgesamt wurden damit $p = 70$ gelände-, boden- und klimaabhängige Kovariablen für $n = 242$ untersuchte Geländepunkte erhoben.

4. Redefinition übergeordneter Kategorien

Einzelne kategoriale Kovariablen jedoch gliederten sich in eine zu große Anzahl möglicher Kategorien mit jeweils nur geringen Häufigkeiten. Aus diesem Grund mussten für manche Variablen unterschiedliche Einzelkategorien unter Berücksichtigung übereinstimmender Merkmale zu neudefinierten, umfangreicheren Kategorien zusammengefasst werden, um eine Aufnahme in den Modellansatz zu ermöglichen. So erfuhr beispielsweise die Kovariable *Grundwasservorkommen* eine Reduktion ihrer ehemals acht Kategorien (*ohne ergiebige Grundwasservorkommen*, *weniger ergiebige*, *ergiebig* und *sehr ergiebige Grundwasservorkommen*, zusätzlich jeweils aufgeschlüsselt nach *Fest- und Lockergesteinen*) auf nur mehr drei Kategorien (*ohne ergiebige*, *weniger ergiebige*, *ergiebig bis sehr ergiebige Grundwasservorkommen*). Ausschlaggebend hierfür war, dass die Unterscheidung der Gesteinsart bereits über eine andere entsprechend lautende Kovariable Berücksichtigung fand und, dass *sehr ergiebige Grundwasservorkommen* zu selten waren, um eine

eigenständige Kategorie bilden zu können.

Die unterschiedenen Kategorien aller zur Modellierung herangezogenen kategorialen Variablen können den Tabellen 19 bis 39 des Anhangs entnommen werden.

5. Logistische Regression (*LASSO*-Verfahren)

Auf Basis dieser Daten wurde dann der Effekt unterschiedlicher potenzieller Einflussgrößen auf das Vorhandensein von Zwergschlammschnecken mittels geeigneter Regressionsmodelle analysiert. Im klassischen Ansatz eines linearen Modelles geht man von einer Normalverteilung der Fehlerterme bzw. der Zielgröße y_i aus. Zielgrößen mit bestimmten anderen Verteilungen als einer Normalverteilung, wie im vorliegenden Fall eines binären Response, lassen sich mit Hilfe *Generalisierter Linearer (Gemischter) Regressionsmodelle* GL(M)Ms modellieren. Die binäre Zielvariable y_i (Schnecken vorhanden: ja/nein) macht eine Anwendung logistischer Regressionsverfahren erforderlich. Ziel binärer (gemischter) Logitmodelle ist es, wie im klassischen Ansatz, die festgelegte Zielgröße y_i in Bezug zu verschiedenen erklärenden Variablen x_{ip} zu setzen, deren jeweiliger Einfluss voneinander abgegrenzt und geschätzt werden soll. y_i stellt also eine binäre Zielgröße mit den Ausprägungen 0 und 1 dar und x_{i1}, \dots, x_{ip} insgesamt p am i -ten Stichprobenelement zusätzlich erfasste Einflussgrößen. $\pi_i = P(y_i = 1)$ bezeichnet dann die Wahrscheinlichkeit eines „Erfolgs“ der Zielvariablen, $1 - \pi_i$ die Gegenwahrscheinlichkeit. Verhältnisse zwischen Wahrscheinlichkeit und Gegenwahrscheinlichkeit werden auch Odds genannt. Der Begriff „Logit“ meint den Logarithmus eines Odds. Dementsprechend modelliert man im logistischen Regressionsmodell den Zusammenhang der Einflussgrößen zum sogenannten Logit L der „Erfolgswahrscheinlichkeit“ wie folgt:

$$L = \ln \frac{\pi_i}{1 - \pi_i} = \beta_0 + x_{i1}\beta_1 + \dots + x_{ip}\beta_p$$

Löst man diese Gleichung äquivalent nach π_i auf, so ergibt sich die logistische Funktion:

$$\pi_i = \frac{e^{\beta_0 + x_{i1}\beta_1 + \dots + x_{ip}\beta_p}}{1 + e^{\beta_0 + x_{i1}\beta_1 + \dots + x_{ip}\beta_p}}$$

Von ihr rührt die Namensgebung des Verfahrens her.

Die empirische Modellanpassung erfolgt in der Regel nach dem Prinzip der Maximum Likelihood. Mittels numerischer Verfahren werden hier Schätzwerte der unbekannt Modellparameter $\widehat{\beta}_0, \widehat{\beta}_1, \dots, \widehat{\beta}_p$ gewonnen ((ALLDINGER, 2005); persönliche Mitteilung von GROLL (2015)⁵).

Der Absolutbetrag jener Regressionskoeffizienten gilt als Maß für den Einfluss der zugehörigen Kovariablen x_{i1}, \dots, x_{ip} im Modell und wird bei Verfahren wie einer Parameterschätzung anhand der Methode der kleinsten Quadrate tendenziell überschätzt. Daher bedarf es eines Regularisierungsverfahrens, welches eine geeignete Schrumpfung respektive Penalisierung aller Regressionskoeffizienten gestattet (CEDERBAUM, 2009). Gemäß der Struktur unseres Datensatzes empfahlen sich Verfahren zur Variablenselektion, die auf dem Prinzip des sogenannten *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO)* (TIBSHIRANI, 1996) beruhen. Einzelne Regressionsparameter können dabei auf Null geschrumpft werden, was zur Elimination der zugehörigen Kovariablen x_{i1}, \dots, x_{ip} aus dem Modell führt. Im Zuge der dadurch erreichten Variablenselektion reduziert sich der Umfang des Modells. Seine Vorhersagegenauigkeit und Interpretierbarkeit nehmen durch die Restriktion auf Kovariablen, welche einen besonders starken Einfluss auf die Zielvariable y_i besitzen, zu (CEDERBAUM, 2009).

Dem hohen Anteil betrachteter kategorialer Variablen wird durch die Anwendung der R-Funktion *grplasso* aus dem gleichnamigen Paket Rechnung getragen. Sie ermöglicht, dass Regressionskoeffizienten, entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den verschiedenen Kategorien einer Kovariablen, gemeinsam in Form von Gruppen bestraft werden, was eine notwendige Grundlage für die korrekte Variablenselektion darstellt ((MEIER et al., 2008); persönliche Mitteilung von GROLL (2015)⁶).

Da für einige der untersuchten Geländepunkte wiederholte Messungen vorliegen, können ferner ortsspezifische, zufällige Effekte in die Schätzung mitaufgenommen werden, um die Korrelation dieser Messungen zu berücksichtigen. Hierzu bedarf es jedoch eines modifizierten vollen

⁵ Groll, A. Mathematisches Institut der Universität München, München, persönliche Mitteilung (2015)

⁶ Groll, A. Mathematisches Institut der Universität München, München, persönliche Mitteilung (2015)

Gradientenverfahrens, wie es im R-Paket *glmLasso* (GROLL und TUTZ, 2014) implementiert ist.

Sowohl im *grplasso* als auch im *glmLasso* muss der optimale Tuning-Parameter λ_{opt} , der die Stärke der Bestrafung aller Regressionskoeffizienten $(\widehat{\beta}_1, \dots, \widehat{\beta}_p)$ und damit die Sparsamkeit des Modells steuert, mit Hilfe einer geeigneten Methode bestimmt werden. Für den *grplasso*-Ansatz fand eine 10-fache Kreuzvalidierung Verwendung, während für die *glmLasso*-Methode das sogenannte *Bayesian Information Criterion* (BIC) (SCHWARZ, 1978) empfohlen wird.

Somit entstanden, auf unterschiedlichen Verfahren basierend, zwei Logit-Modelle, welche das Vorkommen von *Galba truncatula* in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren erklären, ein *grplasso*- und ein *glmLasso*-Modell. In beiden Modellen lässt sich der Zusammenhang aller Einflussgrößen wie folgt ausdrücken:

$$L = \ln \frac{\pi_i}{1 - \pi_i} = \beta_0 + x_{i1}\beta_1 + \dots + x_{ip}\beta_p$$

IV. ERGEBNISSE

1. Absolute Häufigkeit kategorialer Merkmalsausprägungen

In den Tabellen 19 bis 39 des Anhangs findet sich eine Listung aller zur Modellierung herangezogenen kategorialen Variablen. Aus ihnen geht ferner hervor, mit welchen Häufigkeiten die einzelnen Kategorien auftraten, wobei zwischen Geländepunkten mit Schneckenfunden ($y_i = 1$) und Feldern ohne Zwischenwirthabitate ($y_i = 0$) unterschieden wird. Tendenzen hinsichtlich einer potenziellen Einflussnahme verschiedener Variablen auf das Vorkommen von Schnecken lassen sich bereits hier erkennen. In dieser Weise illustriert die Verteilung absoluter Häufigkeiten beider Kategorien der Kovariablen *Gewässer im Umkreis von 100 m* (Tabelle 22 des Anhangs), eine positive Korrelation zwischen dem Vorkommen von Gewässern und dem Auffinden von Zwergschlamm Schnecken an einem Ort. Eine deskriptive Analyse der erhobenen Daten und potenzieller Zusammenhänge war jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit, weshalb auf die absoluten Häufigkeiten kategorialer Merkmalsausprägungen an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

2. Schätzergebnisse beider Regressionsverfahren

Im Folgenden werden nun die Schätzergebnisse für beide Regressionsverfahren, das *grplasso* und das *glmmLasso*, einander gegenübergestellt.

Der optimale Tuningparameter λ_{opt} , welcher einer Regulierung der Modellkomplexität dient, war im Falle des *grplasso*-Modelles auf der Basis einer 10-fachen Kreuzvalidierung und der Devianz ermittelt worden. Die linke Grafik in Abbildung 4 zeigt die Verlaufskurve der Devianz gegen den Tuning-Parameter λ_{opt} . Demgegenüber steht die Ermittlung von λ_{opt} für das *glmmLasso* unter Verwendung des Bayesschen Informationskriteriums (BIC), dessen Verlauf gegen den Tuningparameter in der rechten Grafik von Abbildung 4 dargestellt ist. Der optimale Tuning-Parameter wird in beiden Kurven durch die gestrichelte vertikale Linie markiert. Er minimiert das jeweilige Gütekriterium (Devianz respektive BIC). Während für die *glmmLasso*-Methode (rechts) ein vergleichsweise großer Wert ($\lambda = 6,5$) ausgewählt wurde und somit ein beträchtlicher Teil der Koeffizienten (β_1, \dots, β_p) auf Null gesetzt wird, ergab sich im *grplasso*-Ansatz

(links) ein relativ kleiner Wert ($\lambda \approx 0,2$).

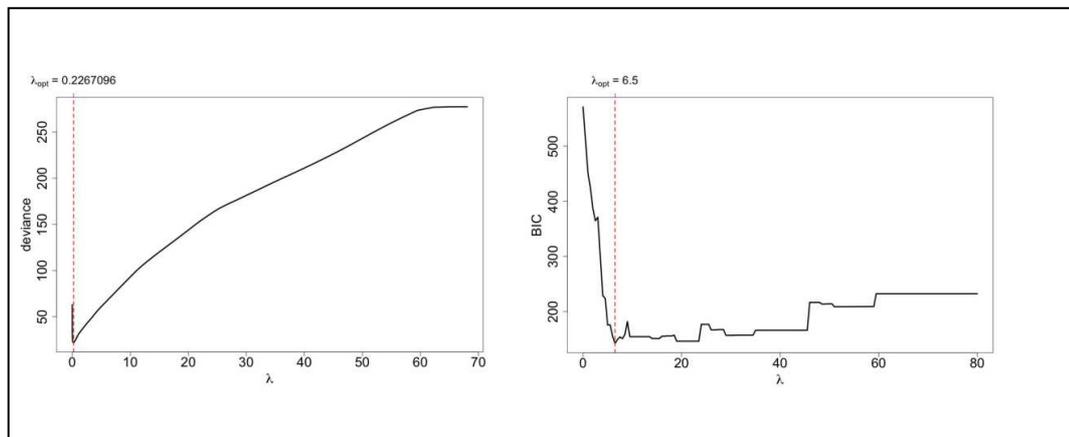


Abbildung 4: Devianzverlauf für das *grplasso* (links) und BIC-Verlauf für das *glmLasso* (rechts) gegen den optimalen Tuningparameter λ_{opt} (gestrichelte vertikale Linie)

Die in Abbildung 5 dargestellten, zugehörigen Koeffizientenpfade zeigen, dass, der jeweiligen Größe des Tuning-Parameters λ entsprechend, für den *grplasso*-Ansatz mit kleinem λ (links) eine größere Anzahl von Kovariablen in das Modell aufgenommen wurde, für das *glmLasso*-Verfahren mit größerem λ (rechts) hingegen eine kleinere Zahl, nämlich 13 Kovariablen.

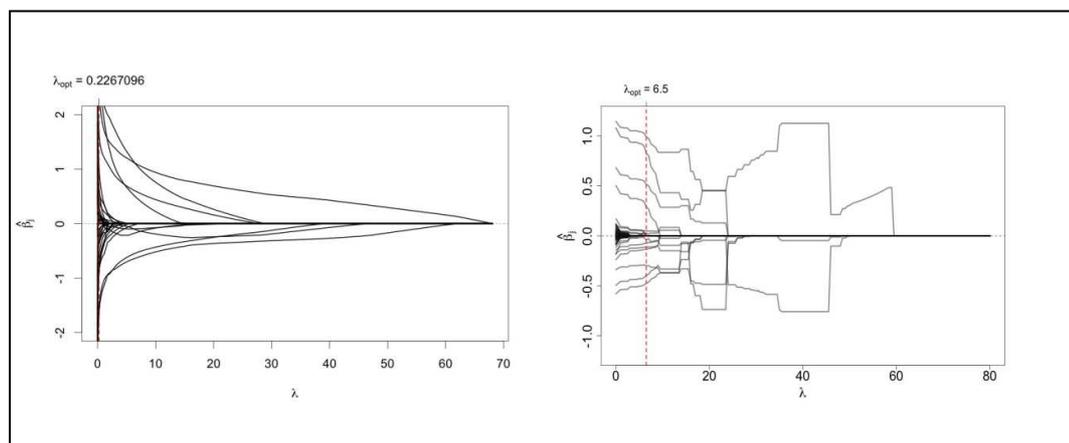


Abbildung 5: Verlauf der Koeffizientenpfade für das *grplasso* (links) und das *glmLasso* (rechts) gegen den optimalen Tuningparameter λ_{opt} (gestrichelte vertikale Linie)

Die zugehörigen Punktschätzer $\widehat{\beta}_0, \widehat{\beta}_1, \dots, \widehat{\beta}_p$ sind vergleichend für beide Regressionsverfahren in Tabelle 40 des Anhangs aufgelistet. Hierbei gilt es zu beachten, dass sich diese Schätzer auf standardisierte Kovariablenausprägungen

beziehen, was eine Grundvoraussetzung für die korrekte Verwendung von *LASSO*-Verfahren darstellt. Ein sich daraus ergebender Vorteil, liegt darin, dass die Absolutbeträge der Schätzer gut interpretiert werden können: Je größer der Absolutbetrag eines Schätzers $|\hat{\beta}|$, umso größer auch der Einfluss der entsprechenden Kovariablen x_{i1}, \dots, x_{ip} auf die Zielvariable y_i (Schnecken vorhanden: ja/nein). Grundsätzlich lassen sich die Schätzer im Logitmodell wie folgt deuten: Ein positiver Regressionskoeffizient bedingt einen positiven Einfluss auf die logarithmierte Chance, denn es gilt:

$$L = \ln \frac{\pi_i}{1 - \pi_i} = \beta_0 + x_{i1}\beta_1 + \dots + x_{ip}\beta_p,$$

Dadurch besteht letztlich auch ein positiver Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit π_i für einen Erfolg (d. h. $y_i = 1$, also Schnecken vorhanden). Umgekehrt bewirkt ein negativer Regressionskoeffizient einen negativen Einfluss auf das Auftreten von Schnecken.

2.1. Referenzkategorien kategorialer Variablen

Welche der Kategorien einer ausgewählten kategorialen Einflussvariable als Referenzkategorie herangezogen wurde, kann aus der Listung aller selektierten Regressionsparameter in Tabelle 40 des Anhangs indirekt ersehen werden. Die jeweilige Referenz wird hier als einzige aller auftretenden Kategorien einer Kovariablen nicht genannt. Der durch die Schätzer zum Ausdruck gebrachte Einfluss eines Regressionsparameters besteht stets in Bezug auf die gewählte Referenzkategorie. Tabelle 5 nennt alle für eines der beiden oder auch beide Modelle selektierten kategorialen Kovariablen mit ihren entsprechenden Bezugskategorien und deren numerischer Bezeichnung.

Tabelle 5: Bezugskategorien kategorialer Kovariablen des *grplasso* und *glmLasso* in alphabetischer Reihenfolge

Kovariable	Referenzkategorie (in Worten)	Referenz numerisch
Bäume	keine Bäume	0
Bodeneignung für Kulturland	sehr gute Produktion (Hangneigung < 25 %)	1
Gewässer (im Umkreis von 100 m)	kein Gewässer	0
Gründigkeit	mittel	3
Grundwasservorkommen 500	ohne ergiebige Vorkommen	1
Hanglagen	Hangneigung < 18 %	1
Hangwasseraustritt	kein Hangwasseraustritt	0
Klimaeignung Übersicht	Dauergrünland	4
Lithologie Hauptgruppen	Tone, Silte, Sande	2
REN Feuchtgebiet	kein Feuchtgebiet	0
REN Wald	Ausbreitungsgebiet Wald	2
Riet/ Feuchtflächen	kein(e) Riet/ Feuchtflächen	0
Wald Bild	kein Wald	4
Wasserdurchlässigkeit	schwach gehemmt	3
Wasserspeichervermögen	gut	5

2.2. Das *grplasso*-Modell

Aufgrund des kleinen optimalen Tuning-Parameters λ_{opt} fanden im *grplasso*-Verfahren zahlreiche, insgesamt 19 aus 70 zur Auswahl stehenden Kovariablen Berücksichtigung. Ihr Einfluss reicht von 0,0759 bis 3,1833 im positiven und von -0,0100 bis -1,6773 im negativen Bereich.

2.2.1. Einflussreichste Kovariablen des *grplasso*-Modells

Tabelle 40 des Anhangs enthält eine vollständige Aufstellung der Kategorien aller 19 Variablen, die im *grplasso*-Modell enthalten sind, geordnet nach der Größe ihrer Schätzer. Jene Schätzer dienen als Maß für den Grad des Einflusses auf das Schneckenvorkommen.

Die zehn einflussreichsten Größen im *grplasso* werden in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Die zehn einflussreichsten Regressionsparameter des *grplasso*-Modells

Regressionsparameter	Schätzer
Riet...Feuchtflächen	3,1833
Hangwasseraustritt	2,8894
Gewässer...100 m	2,5184
Bäume	1,6874
Grundwasser2	1,0572
Temp5min>15-1	-0,8943
Lithologie.Hauptgruppen6	-0,9002
Temp5mean<0-3	-0,9162
Temp5mean<0-2	-1,5847
Hitzetage-1	-1,6773

Die Tabelle zeigt, dass sich, gemäß der Schätzergebnisse für das *grplasso*, insbesondere Hitzetage mit Tagesmaxima von ≥ 30 °C im Jahr vor der Feldbegehung (*Hitzetage-1*) und 5 cm über dem Boden gemessene Tagesdurchschnittstemperaturen von weniger als 0 °C im zweiten und dritten Jahr vor Untersuchung des Geländes (*Temp5mean<0-2* und *Temp5mean<0-3*) bei gehäuftem Auftreten negativ auf das Vorkommen von *Galba truncatula* auswirken.

Als weiterer klimaabhängiger Parameter mit negativem Einfluss erweisen sich, ebenfalls im Jahr vor der Untersuchung, 5 cm über dem Boden gemessene, tägliche Minimaltemperaturen von mehr als 15 °C (*Temp5min>15-1*).

Die Kategorie *Lithologie Hauptgruppen 6* kennzeichnet Flächen, deren Böden von Mergel, Kalken und zum Teil Sandstein geprägt sind. Auch ihr wird ein negativer Effekt auf die Habitattauglichkeit zugeschrieben.

Erhöht wird die Wahrscheinlichkeit für das Vorfinden von Zwergschlamm Schnecken in hohem Maß durch das Auftreten von *Riet*, *Feuchtflächen*, *Hangwasseraustritten* sowie von *Gewässern im Umkreis von 100 m* um den untersuchten Ort. Darüber hinaus vermögen, nach Aussage der Schätzergebnisse, *Bäume/ Sträucher* und weniger ergiebige Grundwasservorkommen (*Grundwasser2*) im Vergleich zu fehlenden ergiebigen Vorkommen geeignete Lebensbedingungen für *Galba truncatula* zu schaffen.

2.2.2. Einflussärmere Kovariablen des *grplasso*-Modells

Als weitere Kovariablen, für die im *grplasso*-Modell positive Effekte auf das Schneckenvorkommen berechnet wurden (Tabelle 7), sind folgende zu nennen: *Wald.Bild3* (Nähe Wald < 200 m) und *Wald.Bild2* (im/ am Wald), die metrische Kovariable *Höhe über N. N.*, die *Lithologie Hauptgruppen 3* (Sandsteine, z. T. Mergel) und 4 (Sande, Kiese, Gerölle) sowie die *Bodeneignung Kulturland 2* (gute Produktion mit Hangneigung < 25 %) und 5 (ungeeignet), die *Klimaeignung 1* (Ackerbau und Spezialkulturen begünstigt) und 3 (Futterbau) und schließlich die *Wasserdurchlässigkeit 2* (gehemmt). Ihre Einflüsse bleiben hinter denen der in Kapitel 2.2.1. beschriebenen Variablen zurück, weisen jedoch Schätzerbeträge von mehr als 0,1 auf und verdienen daher eine genauere Betrachtung. Schätzerbeträge von weniger als 0,1 wurden als zu gering erachtet, um den ihnen zugehörigen Regressionsparametern vertrauenswürdige, gerichtete Einflüsse beimessen zu können. Daher wurden Regressionsparameter mit $|\hat{\beta}| < 0,1$ für beide Modelle nicht in die weiteren Ausführungen miteinbezogen. Sie können Tabelle 40 des Anhangs entnommen werden.

Tabelle 7: Regressionsparameter des *grplasso*-Modells mit schwach positiven Effekten und $\hat{\beta} > 0,1$

Regressionsparameter	Beschreibung	Schätzer
Wald.Bild3	Nähe Wald < 200 m	0,7015
Höhe (m)	metrisch	0,5940
Lithologie.Hauptgruppen3	Sandsteine, z. T. Mergel	0,4395
Wald.Bild2	im/ am Wald	0,3364
Bodeneignung.Kulturland2	gute Produktion mit Hangneigung < 25 %	0,2235
Lithologie.Hauptgruppen4	Sande, Kiese, Gerölle	0,1843
Klimaeignung1	Ackerbau und Spezialkulturen begünstigt	0,1818
Wasserdurchlässigkeit2	gehemmt	0,1795
Bodeneignung.Kulturland5	ungeeignet	0,1542
Klimaeignung3	Futterbau	0,1009

Temperaturextrema im Jahr vor der Felduntersuchung wie *Temp5mean>20-1* (mittlere Tagestemperatur 5 cm über dem Boden > 20 °C) und *Temp5max<0-1* (maximale Tagestemperatur 5 cm über dem Boden < 0 °C) lassen schwach negative Effekte auf die Wahrscheinlichkeit, *Galba truncatula* vorzufinden, erkennen.

Boden- und geländeabhängigen Größen mit schwach negativem Einfluss sind die Kategorien *Lithologie Hauptgruppe 1* (Konglomerate, Brekzien), *Grundwasser 3* (ergiebige bis sehr ergiebige Vorkommen), *Wasserdurchlässigkeit 4* (normale bis übermäßige Durchlässigkeit), *Bodeneignung Kulturland 4* (Ackerbau beeinträchtigt, Hangneigung $\geq 25\%$, max. 35 %) und 3 (mäßige Produktion, Hangneigung $< 25\%$), eine tiefe Gründigkeit (*Gründigkeit 4*) sowie die *Klimaeignung 2* (Futterbau und Ackerbau) zuzuordnen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Regressionsparameter des *grlasso*-Modells mit schwach negativen Effekten und $|\hat{\beta}| > 0,1$

Regressionsparameter	Beschreibung	Schätzer
Klimaeignung2	Futterbau und Ackerbau	-0,1034
Gründigkeit4	tief	-0,1119
Bodeneignung.Kulturland3	mäßige Produktion (Hangneigung $< 25\%$)	-0,1796
Temp5max<0-1	maximale Tagestemperatur 5 cm über dem Boden $< 0\text{ °C}$ im ersten Jahr vor Schneckensuche	-0,2543
Bodeneignung.Kulturland4	Ackerbau beeinträchtigt (Hangneigung $\geq 25\%$, max. 35 %)	-0,3570
Wasserdurchlässigkeit4	normal bis übermäßig	-0,3799
Temp5mean>20-1	mittlere Tagestemperatur 5 cm über dem Boden $> 20\text{ °C}$ im ersten Jahr vor Schneckensuche	-0,4010
Grundwasser3	ergiebige bis sehr ergiebige	-0,6096
Lithologie.Hauptgruppen1	Konglomerate, Brekzien	-0,7878

2.3. Das *glmmLasso*-Modell

Aufgrund des größeren optimalen Tuning-Parameters $\lambda_{opt} = 6,5$ wurden im *glmmLasso* lediglich 13 Kovariablen als relevante Einflussgrößen auf die Wahrscheinlichkeit, an einem Ort Zwergschlammschnecken vorzufinden, ausgewählt. Allerdings ermöglicht es dieser Ansatz, ortsspezifische Effekte zu berücksichtigen. Dadurch, dass sich unter den 242 untersuchten Geländepunkten 35 Orte befinden, die zweimal in deutlichem zeitlichen Abstand voneinander untersucht wurden, können diesen Punkten sogenannte random effects, individualspezifische Effekte mit einem Einfluss auf den Outcome y_i , Schnecken vorzufinden, zugebilligt werden (FAHRMEIR et al., 2007). Mit einer geschätzten Standardabweichung von $\hat{\sigma}_b = 0,6725$ sind die in diesem zweiten Modell miteinbezogenen random effects beachtlich. Sie stehen den 13 selektierten

Kovariablen in ihrer geschätzten Wirkung auf das Schneckenvorkommen nicht nach. Tabelle 9 fasst, analog den Angaben zum *grplasso* in den Tabellen 6 bis 8, die neun der insgesamt 13 im Modell gewählten Prädiktoren, deren Schätzerbetrag $|\hat{\beta}|$ größer als 0,1 ist, zusammen.

Tabelle 9: Einflussreiche Regressionsparameter des *glmmLasso*-Modells mit $|\hat{\beta}| > 0,1$

Regressionsparameter	Schätzer
Gewässer...100 m	0,9888
Hangwasseraustritt	0,8263
Bäume	0,5142
Riet...Feuchtflächen	0,2866
Temp200max>30-1	-0,1142
Gründigkeit4	-0,1332
Temp5mean>20-1	-0,2997
Hitzetage-1	-0.3951
Temp5mean<0-2	-0.4727

Dieses Regressionsverfahren ermittelte das Vorhandensein von *Gewässern* im Umkreis von 100 m um den untersuchten Ort und *Hangwasseraustritten* als Faktoren, die ein Auftreten von *Galba truncatula* begünstigen. Ferner scheinen *Bäume und Sträucher* der Eignung eines Standortes als Zwischenwirthabitat ebenso zuträglich wie *Riete und Feuchtflächen*. Negative Korrelationen ergaben sich hingegen für das Auftreten von Zwergschlammschnecken und die Häufung einer Über- bzw. Unterschreitung von Temperaturextrema in den beiden Jahren vor einer Untersuchung der entsprechenden Geländepunkte. So wirken sich 2 m über dem Boden gemessene Tagesdurchschnittstemperaturen von mehr als 30 °C im Jahr vor der Feldbegehung (*Temp200max>30-1*) ebenso negativ auf die Schnecken aus wie Hitzetage (*Hitzetage-1*) und die Überschreitung von 20 °C durch die mittlere, bodennah gemessene Tagesdurchschnittstemperatur Temp5mean im selben Zeitraum (*Temp5mean>20-1*). Ferner scheint die Zwergschlammschnecke Böden von mittlerer Gründigkeit denen einer tiefen Gründigkeit (*Gründigkeit 4*) vorzuziehen. Den stärksten negativen Effekt auf die Schnecken jedoch üben 5 cm über dem Boden gemessene Tagesdurchschnittstemperaturen von weniger als 0 °C im zweiten Jahr vor der Schneckensuche aus (*Temp5mean<0-2*).

2.4. Gemeinsamkeiten beider Modelle

Vergleicht man die zwei Modelle miteinander (Tabelle 10), fällt auf, dass acht Kovariablen von beiden Verfahren ausgewählt wurden. Hierzu zählen *Riete und Feuchtflächen*, *Hangwasseraustritte*, *Gewässer im Umkreis von 100 m* und *Bäume/ Sträucher* am untersuchten Ort als positive Prädiktoren für das Vorkommen von Zwergschlammschnecken. Als ausgewählte Größen mit negativem Einfluss auf das Auftreten der Schnecken sind 5 cm über dem Boden gemessene Tagesdurchschnittstemperaturen von mehr als 20 °C im Jahr vor der Begehung von Feldern (*Temp5mean>20-1*) und von weniger als 0 °C im zweiten Jahr davor (*Temp5mean<0-2*) beiden Modellen gemeinsam. Darüber hinaus erkennt jedes der Modelle einen beachtlichen negativen Effekt von Hitzetagen auf das Schneckenvorkommen im darauffolgenden Jahr (*Hitzetage-1*). Diese implizieren ein Maximum der 2 m über dem Boden gemessenen Tagestemperatur von ≥ 30 °C, wodurch der im *glmLasso-Modell* durch die Kovariable *Temp200max>30-1* (Maximum der 2 m über dem Boden gemessenen Tagestemperatur > 30 °C) benannte Temperaturbereich bereits abgedeckt ist. Man kann folglich von einer Übereinstimmung der beiden Modelle in acht respektive neun Kovariablen sprechen.

Tabelle 10: In beiden Modellen ausgewählte Regressionsparameter, geordnet nach der Größe aller *grplasso*-Schätzer

Regressionsparameter	grplasso	glmLasso
Riet...Feuchtflächen	3,1833	0,2866
Hangwasseraustritt	2,8894	0,8263
Gewässer...100 m	2,5184	0,9888
Bäume	1,6874	0,5142
Gründigkeit4	-0,1119	-0,1332
Temp5mean>20-1	-0,4010	-0,2997
Temp5mean<0-2	-1,5847	-0,4727
Hitzetage-1*	-1,6773	-0,3951
Temp200max>30-1*		-0,1142

* kennzeichnet die Überschneidung der Parameter *Hitzetage-1* und *Temp200max>30-1*

V. DISKUSSION

1. Datenerhebung zum Vorkommen von *Galba truncatula*

Ausgangspunkt für die Generierung des Datensatzes, der anschließend einer Regressionsanalyse unterzogen wurde, waren in früheren Studien erhobene Daten zum Vorkommen von *Galba truncatula*. Während die Auswahl der von R. Baggenstos 2010 untersuchten Felder nach dem Zufallsprinzip vorgenommen wurde (BAGGENSTOS et al., 2016), verfolgten SCHWEIZER et al. (2007) Befunde von Schlachttieren, deren Lebern verworfen worden waren, und von infizierten Tieren aus dem Patientengut des Departements für Nutztiere der Vetsuisse-Fakultät Zürich, zurück. Auf den Herkunftsbetrieben betroffener Tiere wurden insbesondere Mähwiesen und Weideland begutachtet. Damit dürften die letztgenannten Nutzungsflächen in unserer Analyse überrepräsentativ vertreten sein. Dicht bebaute Flächen von Ortschaften waren in beiden Studien von den Untersuchungen ausgeschlossen worden. Allgemein werden unsere Modelle für Gelände mit einer Oberflächenbeschaffenheit, die durch keinen der ausgewerteten Orte repräsentiert wurde, keine Vorhersagen hinsichtlich des Schneckenvorkommens treffen können und sind diesbezüglich in ihrer Aussagekraft beschränkt.

Von uns verwendete Daten zu Geländepunkten ohne Schneckenvorkommen konnten sich ausschließlich auf die 2010 von R. Baggenstos erhobenen Befunde stützen. Ein gewisses Bias entsteht hier durch die Annahme des Outcomes $y = 0$ (keine Schnecken) für Orte, die nach Erfahrung des Untersuchers als Zwischenwirthabitate ungeeignet waren, aber nicht dreißigminütig auf Zwergschlammschnecken untersucht wurden. Indirekt wurden unserer Regressionsanalyse durch die Beurteilung der Feldeignung bereits Parameter, die das Schneckenvorkommen erfahrungsgemäß positiv oder negativ beeinflussen, vorweggenommen. Jedoch stützte sich die Entscheidung des Untersuchers auf makroskopisch wahrnehmbare Eigenschaften des Geländes, während unsere Modelle messbare Größen beinhalten, deren Werte der Person zum Zeitpunkt der Entscheidung nicht bekannt waren. Dadurch ist die Beeinflussung des Ergebnisses unserer Regressionsanalysen durch die oben genannte Annahme als gering zu erachten.

Falsch negative Suchergebnisse können auf dieser Grundlage überwiegend ausgeschlossen werden. Ausgehend von einer rein äußeren, nicht-apparativen Beurteilung eines Feldes lässt sich seine Eignung als Zwischenwirthabitat durch den erfahrenen Untersucher wie im Fall der zugrundegelegten Studien zuverlässig bestimmen. Hierfür sprechen, neben Publikationen, welche die Identifizierung potenzieller Habitate anhand von Indikatorpflanzen (RONDELAUD et al., 2011) oder Luftbildern (DE ROECK et al., 2014) beschreiben, langjährige Erfahrungen von G. Knubben-Schweizer (persönliche Mitteilung von KNUBBEN-SCHWEIZER (2015)⁷). Während die Eignung eines Feldes als Habitat für *Galba truncatula* noch keine Aussagen über das tatsächliche Vorkommen von Schnecken zulässt, kann für Felder, die sich durch eindeutig schneckenwidrige Bedingungen auszeichnen, davon ausgegangen werden, dass keine Schnecken auftreten.

Vor diesem Hintergrund lässt sich die Frage nach dem Auftreten von Schnecken mit den uns zur Verfügung stehenden Daten für jeden der im Modellansatz berücksichtigten Geländepunkte hinreichend beantworten. Der Nachteil unserer Vorgehensweise besteht darin, dass wir zugunsten der Zuverlässigkeit unserer Aussagen auf Orte verzichten mussten, die potenzielle Habitate beherbergten und dennoch negativ auf *Galba truncatula* untersucht worden waren. Hier war es nicht möglich, sicher zu unterscheiden, wann die Abwesenheit von Schnecken durch klimatische Einflüsse wie ungünstige Temperaturverläufe oder andere zeitlich veränderliche Faktoren bedingt war oder aber Schnecken übersehen worden waren. So muss davon ausgegangen werden, dass wir der Bedeutung ebensolcher Einflussfaktoren in unserer Regressionsanalyse unter Umständen nicht in vollem Maße Rechnung tragen konnten.

⁷ Knubben-Schweizer, G. Ludwig-Maximilians-Universität München, Klinik für Wiederkäuer mit Ambulanz und Bestandsbetreuung, Oberschleißheim, persönliche Mitteilung (2015)

2. Weiterverarbeitung und Selektion der Daten

Ein weiterer Umstand, der eine Unterschätzung des Einflusses klimaabhängiger Faktoren bedingen könnte, ist die weitgehende Eliminierung von Sekundär- und Tertiärhabitaten aus unserem Datensatz. Diese temporären Habitate können nur von Primärhabitaten ausgehend durch Schnecken besiedelt werden. Somit vermag ein vereinfachtes Modell, welches vorrangig Primärhabitatsbeziehungen miteinbezieht, das Auftreten von *Galba truncatula* hinreichend zu beschreiben. Doch wird dadurch temperatur- und niederschlagsbedingten Gegebenheiten, die vor allem für die Entstehung oder Aufrechterhaltung temporärer Habitate wesentlich sind, eine geringere Bedeutung beigemessen als bei Berücksichtigung dieser vorübergehenden Lebensräume. Denn während Sekundärhabitatsbeziehungen im Zuge von Trockenperioden austrocknen und Tertiärhabitatsbeziehungen oftmals erst durch starke Niederschläge und Überschwemmungen entstehen können, ermöglichen Primärhabitatsbeziehungen ein Überleben der Schnecken häufig auch bei ungünstigen Bedingungen wie Hitze oder Frost (MEHL, 1932). Trotz der weitgehenden Beschränkung auf Primärhabitatsbeziehungen lassen beide unserer Modelle einen starken Einfluss temperaturabhängiger Kovariablen erkennen, sodass allenfalls Niederschlagsparameter durch die Art unseres Vorgehens unterbewertet worden sein könnten. Dabei gilt es zu beachten, dass selbst bei den von uns berücksichtigten Primärhabitatsbeziehungen die Größe der dort vorkommenden Schneckenpopulation durch Niederschlagsvariablen beeinflusst werden dürfte und damit letztlich auch die Wahrscheinlichkeit eines Schneckenfundes.

Ferner wurden keine künstlichen Habitate wie etwa nicht natürliche Weidebrunnen in unseren Regressionsansatz miteinbezogen. Ihre Analyse hätte nach Vorbild von CHARLIER et al. (2011) einer Erfassung von Managementfaktoren bedurft, welche nicht nur die Schneckenpopulation selbst, sondern insbesondere auch die Viehhaltung betreffen. Die Bedeutung dieser Maßnahmen ist unbestritten. Da sie jedoch, neben der Schneckenpopulation, in großem Umfang andere Stadien des Leberregulzyklus und insbesondere den Endwirt beeinflussen, erscheint ihre Berücksichtigung erst im Zuge einer Modellierung der gesamten Transmission sinnvoll.

3. Genauigkeit der Daten zu Ziel- und Kovariablen

Die korrekte Lage nachträglich kartierter Geländepunkte aus den Feldstudien von Schweizer et al. (2007) wurde unter Hinzuziehen der Untersucherin selbst mehrfach kontrolliert. Durch die Kombination von Aufzeichnungen, Parzellenplänen, Fotos und Landkarten konnte so eine große Lagegenauigkeit erzielt werden. Nicht exakt lokalisierbare Geländepunkte wurden aus dem Datensatz entfernt.

Eine Unwägbarkeit ergab sich aus der Tatsache, dass, verschiedenen Detailkarten entnommene Daten zu gelände- und bodenabhängigen Kovariablen zum Teil aus anderen Zeiträumen als denen der Felduntersuchungen stammten. Schlechtestenfalls mussten so Schneckenfunde oder habitatureeignete Flächen mit Daten zu Gelände- und Bodenvariablen korreliert werden, die man bis zu zwölf Jahre vor oder 16 Jahre nach der Schneckensuche erhoben hatte. Im Schnitt jedoch variierte der zeitliche Abstand zwischen der Erhebung von Daten zum Schneckenvorkommen und zu Geländeeigenschaften um ein bis zehn Jahre. Durch eine eingehende Betrachtung der Geländepunkte im aktuellen Luftbild und Abgleich ihrer Eigenschaften mit den in Aufzeichnungen und älteren Karten beschriebenen, war sichergestellt, dass zwischenzeitliche Änderungen wie eine Umwandlung oder Drainierung von Nutzungsflächen nicht übersehen wurden. Geländepunkte, die den Anschein einer relevanten Veränderung erweckten, gingen nicht in die Regressionsanalyse ein.

Die Genauigkeit unserer Daten zu den einzelnen boden- und geländeabhängigen Variablen hängt von Lagegenauigkeit, Auflösung und Maßstab zugrundeliegender Karten ab. Diese waren nicht in allen Fällen eruierbar. Für Parameter der Bodeneignungskarte und andere abgeleitete Karten fehlten teilweise vollständige Angaben. Ausgehend von den uns bekannten Karteneigenschaften beträgt die größte anzunehmende Ungenauigkeit bis zu einem Kilometer und betrifft die Angaben zum Grundwasservorkommen. In anderen Studien gewählte Raster für Bodeneigenschaften und Vegetationsindices liegen bei einem bis vier Quadratkilometern ((DUCHEYNE et al., 2015), Europa, Raster für Bodeneigenschaften: 1 km; (DURR et al., 2005), Australien, Raster für Vegetationsindex: 1 bis 4 km). Mit Hinblick auf die Genauigkeit der Bodeneignungskarte besteht eine gewisse Unsicherheit. Da im zugrunde gelegten Maßstab 1 : 200000 Geländeteile von 4 km² auf 1 cm² der Karte reduziert

werden, ist es verständlich, dass die 144 Kartierungseinheiten nicht alle Einzelheiten aufdecken können. Bodenunterschiede mussten generalisiert werden. Ausführungen zur Karte selbst räumen ein, dass deren bodenkundliche Aussagen durch die Notwendigkeit einer Generalisierung mitunter zu pauschal und zu wenig differenzierend seien. Für spezifische Fragestellungen eigneten sich demnach detailliertere Bodeneignungskarten oder bestenfalls Bodenkarten, die uns jedoch nicht zur Verfügung standen, besser (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2013).

Da für die von R. Baggenstos zu Beginn oder am Ende verschiedener Monate durchgeführten Felduntersuchungen keine taggenauen Datumsangaben existierten, wie sie die statistischen Analysen erforderten, waren zur Datierung jeweils der 4. respektive 28. eines jeden Monats willkürlich herangezogen worden. Deshalb ist nicht auszuschließen, dass die Schneckensuche tatsächlich wenige Tage früher oder später stattgefunden hatte. Auf diese Weise könnten beispielsweise einzelne zu viele oder zu wenige feuchte Tage Eingang in den Modellansatz gefunden haben. Vor dem Hintergrund mutmaßlicher kumulativer Effekte von Witterungsverhältnissen auf das Fasciolosevorkommen (MCCANN et al., 2010a), einer Entwicklungsdauer der Schnecken von 7 bis 40 Tagen (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956) und der Widerstandsfähigkeit von *Galba truncatula* gegenüber ungünstigen Bedingungen, sollte der etwaige Effekt einer hieraus resultierenden Ungenauigkeit kaum von Relevanz sein, kann aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Zu bedenken gilt es auch, dass derart feinen Unterschieden einzelner Tage bei einer Verwendung von Monatswerten wie beispielsweise bei MALONE und GOMMES (1998) sowie KUERPICK (2013) von vornherein kaum Beachtung geschenkt werden kann.

Allerdings bringt diese Verfahrensweise eine Häufung gleicher Untersuchungstage für die von R. Baggenstos erhobenen Daten mit sich, nämlich für den 4. und 28. der Monate Juli bis Oktober. In Bezug auf den Gesamtdatensatz, der eine große Vielfalt von Schneckenfundorten aus den Jahren 1999, 2000, 2004 und 2010 aufweist, dürfte diese Häufung keine größere Rolle spielen, möglicherweise jedoch für die habitat- bzw. schneckenuntauglichen Felder. Sie wurden allesamt der Studie von BAGGENSTOS (2016) und damit dem Jahr 2010 entnommen. Zudem beinhalten sie einzelne benachbarte Felder, für die, trotz unterschiedlicher Oberflächengestaltung, in Abhängigkeit vom

Auflösungsvermögen verwendeter Karten, eventuell ähnliche lithologische oder andere bodenassoziierte Eigenschaften vermutet werden könnten. Zusammen mit der Generalisierung der Datumsangaben auf den 4. und 28. der verschiedenen Monate, könnte sich daraus eine übermäßig stark ausgeprägte Ähnlichkeit der Orte mit dem Outcome $y = 0$ (keine Schnecken) hinsichtlich boden- und geländeabhängiger Variablen wie auch klimabezogener Einflussparameter ergeben. Witterungsabhängige Konstellationen, wie sie im Jahr 2010 vorkamen, und individuell feldspezifische Eigenheiten der 62, teils benachbarten Orte ohne Zwischenwirthabitat, könnten so in ihrer Bedeutung für ein negatives Suchergebnis überschätzt werden.

Mit im Wesentlichen vier klimatisch unterschiedlichen Regionen, dem Tessin, den Alpen, dem Mittelland und dem Jura (WIKIPEDIA - DIE FREIE ENZYKLOPÄDIE, 2015b), weist die Schweiz ein heterogenes Klima auf. Da sich unsere Regressionsansätze ausschließlich auf Standorte im Nordosten der Schweiz stützen, können sie zu klimatisch verschiedenen Gebieten, zumindest hinsichtlich des Einflusses von Klimavariablen, keine zuverlässigen Aussagen treffen. Denkbar wäre, dass auf der Basis von Daten aus südlichen Regionen wie dem Tessin mit seinem nahezu mediterranen Klima, eine andere Gewichtung von Niederschlags- und Temperaturvariablen erfolgen würde als in unseren Modellen.

Die Bodenmesswerte von MeteoSchweiz gelten bereits bei Dateneingang zu mindestens 95 % als fehlerfrei und werden zudem auf ihre Plausibilität geprüft. Falsche Werte werden so erkannt und rechtzeitig eliminiert (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2009).

Eine mittlere Distanz von gut 12 km zwischen untersuchtem Geländepunkt und ihm zugewiesener Wetterstation und eine maximale Entfernung von 31 km hebt sich weitgehend positiv von in der Literatur beschriebenen Distanzen ab. So beträgt die Entfernung zur Wetterstation in den Untersuchungen von CHARLIER et al. (2014) 18 km, bei KLEIMANN et al. (2007) gar 50 km, wobei Niederschläge in der letztgenannten Studie vor Ort gemessen wurden.

Zur Beurteilung des maximalen und mittleren Höhenunterschieds zwischen untersuchten Geländepunkten und ausgewählten Wetterstationen, der in unserem Datensatz bei 186,3 m respektive 75,5 m lag, gibt es keine Angaben in anderen Modellansätzen. Die Größe der vertikalen Temperaturabnahme unterliegt

Schwankungen und kann als Charakteristikum einzelner Klimatypen herangezogen werden. Pro 100 Höhenmetern ist eine Temperaturabnahme von bis zu 1 °C möglich. Die am häufigsten auftretenden Werte liegen zwischen 0,5 und 0,8 °C Temperaturabnahme je 100 Höhenmeter (BLÜTHGEN und WEISCHET, 1980). Unter Annahme einer maximalen Reduktion um 1 °C pro hundert Höhenmetern (BLÜTHGEN und WEISCHET, 1980) entspräche dies einer fehlerhaften Temperaturabweichung herangezogener Daten von der Realität um höchstens 1,9 °C bzw. 0,8 °C bei einem Höhenunterschied von 186,3 m respektive 75,5 m zwischen untersuchtem Ort und gewählter Wetterstation.

Darüber hinaus fanden bei der Auswahl geeigneter Wetterstationen lokale Klimateigenheiten wie Seeklima oder Alpennähe Berücksichtigung.

Insgesamt wurden für stärker höhenabhängige Klimavariablen wie Temperaturen nach Möglichkeit Stationen vergleichbarer Höhenlage gewählt, für räumlich variable Einflussgrößen wie Niederschlagswerte hingegen möglichst nah gelegene Messorte bevorzugt. In den Versuchen von WITTCHEN et al. (2011) hatten sich selbst 40 km vom Versuchsfeld entfernt, auf ähnlicher Höhenlage erhobene Temperaturwerte als repräsentativ erwiesen.

Letztlich ist davon auszugehen, dass die von uns verwendeten Daten die Realität hinreichend beschreiben. Unter Umständen könnte die Genauigkeit durch das Extrapolieren verfügbarer Werte und die Verwendung von Rastern, wie sie der Deutsche Wetterdienst anbietet, gesteigert werden.

Ein Problem, das sich aus den streng gewählten Kriterien für die Selektion geeigneter Wetterstationen ergab, war die mangelnde Verfügbarkeit repräsentativer Stationen für untersuchte Felder in Höhen von mehr als 1000 m. Dies hatte zur Folge, dass ebendiese Felder nicht in die Analysen miteinbezogen werden und unsere Modellansätze nur Schneckenfunde bis zu einer Höhe von weniger als 1000 m über N. N. miteinrechnen konnten. Dadurch bestanden Einschränkungen hinsichtlich der Überprüfung eines etwaig negativen Einflusses größerer Höhenlagen auf das Vorkommen von Zwergschlammschnecken.

Hinsichtlich des Zeitraumes, über den potenzielle Einflüsse veränderlicher Variablen zurückverfolgt wurden, gilt es verschiedene Aspekte zu beachten:

Schon FRÖMMING (1956) definierte Leberegeljahre als nasse Jahre, die einem nassen folgen. Indem RAPSCH et al. (2008) für die Beurteilung eines monatsabhängigen Fascioloserisikos nur klimatische Bedingungen des aktuellen Monats, nicht aber die der Vormonate heranzogen, gelang es ihnen nicht, ebensolche kumulativen Effekte mitzuberechnen.

Ferner waren es in der Mehrheit beschriebener Modelle, so auch bei KUEPICK et al. (2013), die Ergebnisse serologischer Untersuchungen auf Fasciolose, welche mit potenziellen Einflussfaktoren korreliert wurden. KUEPICK et al. (2013) schenken bei ihrer Herangehensweise dennoch ausschließlich Klimadaten aus dem Jahr der Beprobung Beachtung und gruppieren diese in Dreimonatsperioden. Dadurch vernachlässigten sie, dass, insbesondere bei serologischer Testung, die tatsächliche Infektion sechs bis neun, in Einzelfällen gar 18 Monate zurückliegen kann ((HUTCHINSON und MACARTHUR, 2003) zitiert in (KNUBBEN-SCHWEIZER et al., 2011)) und, dass der mutmaßlich witterungsabhängige Ablauf des Entwicklungszyklus von *Fasciola hepatica* und *Galba truncatula* einer Infektion erst noch vorausgehen muss. Beispielhaft hierfür erwiesen sich bei MCCANN et al. (2010b) die Niederschlagsmengen aus fünf Jahren vor der serologischen Beprobung als bessere Prädiktoren für das Fascioloserisiko als der Niederschlag im Jahr der Beprobung selbst.

Nachdem MCCANN et al. (2010b) serologische Ergebnisse mit Klimadaten korrelierten, während unser Augenmerk ausschließlich auf der Population der Zwergschlamm Schnecken lag, schien es zu weit gegriffen, Daten aus fünf Jahren vor der Untersuchung von Feldern auf Schnecken zu analysieren.

Eine Erfassung von Daten zu Einflussfaktoren aus allen drei Jahren vor dem Tag der Feldbegehung jedoch sollte sicherstellen, dass ein vollständiger Schneckenzyklus mit allen infrage kommenden Einflussgrößen Berücksichtigung fand. Entsprechend den Ausführungen von MEHL (1932) wurde für die Schnecken eine maximale Lebenserwartung von 24 Monaten angenommen. Im *grplasso*-Modell erwies sich eine häufige Unterschreitung von 0 °C durch die mittlere Temperatur 5 cm über dem Boden im dritten Jahr vor der Suche als negative Einflussgröße auf das Schnecken vorkommen. Dies legt nahe, dass die

Zwergschlammschnecke unter Umständen ein Alter von zwei Jahren überschreiten kann oder Effekte aus der Elterngeneration (P) auf die Entwicklung der Populationen von Töchtern (F1) und Enkeln (F2) fortwirken. Es rechtfertigt die Entscheidung, Daten aus einem Erhebungszeitraum von drei Jahren vor einer Untersuchung der Felder auf *Galba truncatula* in die Regressionsanalysen miteinfließen zu lassen.

Durch die retrospektive Analyse bereits erhobener Daten war es nicht möglich, einen potenziellen Einfluss von Fressfeinden oder konkurrierenden Amphibien auf die Schneckenpopulation zu schätzen.

Neben der Bestimmung eines geeigneten Erhebungszeitraumes für Daten zu Klimavariablen hatte die Entscheidung über die erwünschte Granularität der gewählten Daten eine weitere Herausforderung dargestellt. Schon 1987 bezieht MALONE minimale und maximale Tagestemperaturen in seinen Vorhersageansatz mit ein. Als er zusammen mit GOMMES ein Modell für Ostafrika entwickelt, besteht letztlich Einigkeit darüber, dass genauere Daten anstelle der verwendeten Monatsdurchschnitte erforderlich gewesen wären, um standortspezifische Vorhersagen treffen zu können (MALONE et al., 1998). MCCANN et al. (2010b) bündelten maximale, mittlere und minimale Tagestemperaturen sowie Niederschlagsmengen aus fünf Jahren in unterschiedlich stark granulierten Datensätzen, die gegeneinander getestet wurden. KUEPICK et al. wiederum beschränkten sich 2013 auf Monatsdurchschnitte von Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit, die sie zu vierteljährlichen Perioden zusammenfassten. Unser Ansatz, Daten zu temperatur- und niederschlagsabhängigen Parametern in der feinstmöglichen standardmäßigen Granularität zu erfassen, war durch die Annahme motiviert, dass vorrangig Extremwerte für das Schneckenvorkommen von Bedeutung sein dürften. Diese Annahme wurde durch das Ergebnis unserer Regressionsanalysen bestätigt: Alle in den Modellen ausgewählten Klimavariablen mit nennenswerten Einflüssen auf das Vorkommen von *Galba truncatula* beinhalteten Extremwerte der oberen und unteren Temperaturskala.

Abschließend sei noch näher erörtert, wie bei der Ermittlung der Kovariablen *Gewässer im Umkreis von 100 m* und der Kategorie *Nähe Wald*, d. h. Wald im Umkreis von 200 m, der Kovariablen *Wald Bild* vorgegangen wurde. Allgemein wird in der Literatur von einem geringen Aktionsradius der Zwergschlamm Schnecken ausgegangen (MEHL, 1932; PATZNER und SCHREILECHNER, 1998), wofür auch eine populationsgenetische Studie aus dem Jahr 2005 spricht. Sie weist eine Untergliederung der Schneckenpopulationen in zahlreiche Substrukturierungseinheiten mit geringem Genfluss nach. Die Autoren ziehen daraus den Schluss, dass die Schnecken oftmals nicht in der Lage seien, die Distanz zu geeigneten Paarungspartnern zu überwinden und so die Arterhaltung durch Selbstbefruchtung sichern (TROUVE et al., 2005). Entsprechend den nicht veröffentlichten Beobachtungen von KNUBBEN-SCHWEIZER (persönliche Mitteilung von KNUBBEN-SCHWEIZER⁸, publiziert von BAGGENSTOS (2012)), wonach aktive Wanderungen der Schnecken über Distanzen von mehr als einem Meter jedoch wahrscheinlich sind, wurde angenommen, dass die Existenz von Gewässern im Umkreis von 100 m um einen untersuchten Ort, ebenso wie von Waldbestand in bis zu 200 m Entfernung einen Einfluss auf das Schnecken vorkommen haben könnte. Die Bedeutung dieser potenziellen Einflussgrößen wurde vorrangig in der Bereitstellung geeigneter Primärhabitats (MEHL, 1932; SCHWEIZER et al., 2007; CHARLIER et al., 2011; CRUZ-MENDOZA et al., 2011; DE ROECK et al., 2014), schattenspendender Bäume des Waldrandes oder einer Beeinflussung bestimmter Eigenschaften walddnaher Böden vermutet. Befanden sich bewachsene Pfade oder Feldwege zwischen dem untersuchten Geländepunkt und einem innerhalb des festgelegten Radius gelegenen Gewässer oder Wald, gingen wir von einer theoretischen Überwindbarkeit dieses Hindernisses durch wanderaktive oder passiv abgeschwemmte Schnecken aus. Gesteuerte und befahrene Straßen galten als hemmende Barriere. Bäume des Waldrandes, deren Schatten auch jenseits einer Straße gelegene Felder erreichten, bedingten eine positive Beantwortung der Kategorie *Nähe Wald*.

⁸ Knubben-Schweizer, G. Ludwig-Maximilians-Universität München, Klinik für Wiederkäuer mit Ambulanz und Bestandsbetreuung, Oberschleißheim, persönliche Mitteilung (2012)

4. Vor- und Nachteile der gewählten Regressionsverfahren

Der binäre Response der von uns betrachteten Zielvariable y_i (Schnecken vorhanden: ja/nein) verlangte die Anwendung binärer logistischer Regressionsverfahren. Darüber hinaus wurden in Hinblick auf die, in Relation zum Stichprobenumfang vergleichsweise große Anzahl von Kovariablen, Modelle mit günstigen Eigenschaften bezüglich Modellkomplexität und statistischer Inferenz benötigt. Sie mussten auf Grund der vorhandenen Korrelationsstruktur in den Kovariablen auch mit einem gewissen Maß an Multikollinearität umgehen können. Alle der genannten Kriterien werden durch die von uns herangezogenen Verfahren zur Variablenselektion, die auf dem Prinzip des sogenannten *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO)* (TIBSHIRANI, 1996) beruhen, erfüllt.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Modellwahl berücksichtigt werden musste, war die Vielzahl kategorialer Variablen unter den von uns betrachteten Kovariablen. Sie werden üblicherweise mit einem entsprechenden Kodierungsverfahren, wie beispielsweise der Dummy- oder Effektkodierung modelliert. Dabei ergeben sich bei einer kategorialen Variablen mit k Kategorien insgesamt $k - 1$ Spalten in der Designmatrix, die inhaltlich zusammen gehören. Diesem Umstand wurde bei der Variablenselektion Rechnung getragen, indem entsprechende Koeffizienten durch die Anwendung der R-Funktion *grplasso* gemeinsam in Form von Gruppen bestraft wurden ((MEIER et al., 2008); persönliche Mitteilung von GROLL (2015)⁹).

Daneben ermöglichte die Auswahl des *glmmLasso*-Ansatzes als weiteres Regressionsverfahren eine Einbeziehung ortsspezifischer, zufälliger Effekte in die Schätzungen (GROLL und TUTZ, 2014). Jenen random effects wird von Autoren wie KUERPICK et al. (2013) eine nicht zu unterschätzende Bedeutung in der Risikoanalyse von *Fasciola*-Infektionen beigemessen.

Damit eignen sich die in unserem Fall gewählten Modellierungsverfahren sehr gut, um den statistischen Anforderungen der Fragestellung und der Struktur des zugrundegelegten Datensatzes gerecht zu werden.

⁹ Groll, A. Mathematisches Institut der Universität München, München, persönliche Mitteilung (2015)

Inhaltlich liegen die Vorteile unserer Regressionsansätze im Vergleich mit anderen Modellen eindeutig in einer detaillierten Betrachtung der Zusammenhänge zwischen potenziellen Einflussfaktoren und dem Auftreten des Zwischenwirtes *Galba truncatula*. Mit dem Ziel, weitere Transmissionsschritte im Zyklus des Großen Leberegels auf ähnliche Weise zu modellieren, kann damit von einer größeren Unmittelbarkeit ausgegangen werden als in Modellen, die serologische Testergebnisse des Endwirtes teils ausschließlich mit grob granulierten Klimaeigenschaften korrelieren oder gar konstante klimatische Verhältnisse annehmen wie etwa OLLERENSHAW (1959). Darüber hinaus zeichnen sich unsere Modelle dadurch aus, dass der Einfluss bestimmter Variablen anhand realer Daten zum Schneckenvorkommen getestet wurde, ohne dass eine vorherige subjektive Wichtung der potenziellen Prädiktoren anhand von Literaturangaben oder persönlichen Vorstellungen wie bei TUM et al. (2004) und RAPSCH et al. (2008) erfolgte. Die einzige untersucherabhängige Selektion erfolgte durch die unerlässliche Vorauswahl von insgesamt 70 Kovariablen, die auf ihren Einfluss hin überprüft werden sollten, und die Festlegung von Testgrenzen für temperatur- und niederschlagsabhängige Variablen im Anschluss an das Literaturstudium und eine erste Sichtung der Datenstruktur.

Ein Nachteil der gewählten Verfahren besteht im Unvermögen der entsprechenden R packages, mit fehlenden Werten in Datensätzen umzugehen. Dies hatte zur Folge, dass Kovariablen, zu denen keine lückenlosen Datensätze für jeden der untersuchten Orte vorhanden waren, von vornherein aus der Analyse ausgeschlossen werden mussten.

5. Nicht auswertbare Kovariablen

Zu den nicht auswertbaren Kovariablen zählten die *Bodentemperatur in 5 cm Tiefe*, *Tage des Monats mit Schneedecke*, die *Sonnenscheindauer* und *Bewässerungsbedürftigkeit* des Bodens sowie *REN Fließgewässer/ Seen und Tage des Jahres mit Niederschlagssummen > 100 mm*.

Im Fall der erstgenannten meteorologischen Variablen führte die mangelnde Verfügbarkeit von Daten repräsentativer Wetterstationen für einen Teil der untersuchten Orte und das Unvermögen der Regressionsverfahren, mit Datenlücken umzugehen, zum notwendigen Verzicht auf eine Berücksichtigung der Kovariablen selbst:

Die in 5 cm Tiefe gemessene Bodentemperatur sollte eine Berücksichtigung des Mikroklimas auf Schneckenhöhe, wie sie von SMITH (1980) gefordert wurde, ermöglichen. Der notwendige Verzicht auf diesen potenziellen Einflussfaktor kann vor dem Hintergrund toleriert werden, dass Daten zu 5 cm über dem Boden gemessenen Temperaturen vollständig Eingang in unsere Datenanalyse finden konnten und in der Lage zu sein scheinen, die mikroklimatischen Verhältnisse für die Schneckenpopulation hinreichend zu beschreiben.

Aufgrund der isolierenden Eigenschaften der Schneedecke (SEDLACEK, 2010) wäre ein positive Auswirkung des Niederschlags in Form von Schnee auf die Überlebensfähigkeit von *Galba truncatula* in kalten Monaten denkbar. Diese These ließ sich jedoch wegen des vorzeitigen Ausschlusses zugehöriger Daten aus den Modellansätzen nicht prüfen.

Ebenso scheiterte das Bestreben, eine etwaige Relevanz der Sonneneinstrahlung für das Auftreten von Zwergschlammschnecken zu erforschen, daran, dass es stellenweise an repräsentativen Wetterstationen für die *Sonnenscheindauer in Minuten pro Tag* fehlte. Nächstgelegene Stationen mit verfügbaren Daten hätten sich oftmals in nicht tolerabler Entfernung zu den untersuchten Orten oder im Teilschatten umgebender Berge befunden, sodass ihre Messwerte nicht als repräsentativ angenommen werden konnten. Ein positiver Effekt auf das Algenwachstum und damit die Nahrungssituation der Zwischenwirte wäre hier ebenso vorstellbar gewesen wie ein negativer Effekt besonders lang anhaltender Sonneneinstrahlung durch eine Erhöhung des Austrocknungsrisikos.

Im Fall der *Bewässerungsbedürftigkeit* des Bodens wies der zugehörige Layer im Kartenviewer zu große Lücken auf, als dass eine flächendeckende Datenerhebung und die Einbeziehung der Kovariablen in unsere Regressionsanalysen möglich gewesen wäre. Zur Bestimmung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen der Schweiz erfolgte eine Berechnung der relativen Evapotranspiration als Quotient von aktueller und potenzieller Evapotranspiration für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 bis 2006. Über das langjährige 33 % Quantil wurde die Häufigkeit einer Unterschreitung des kritischen Schwellenwertes von 0,8 erfasst und die jeweilige Fläche als nicht oder schon bewässerungsbedürftig eingestuft (FUHRER und JASPER, 2009; BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2015).

Als indirektes Maß der Evapotranspiration, die unter anderem im Modell von YILMA und MALONE (1998) bestimmt worden war, und wichtiger Anhaltspunkt für Vegetation und Wasserhaushalt des Bodens, hätte die Kovariable *Bewässerungsbedürftigkeit* möglicherweise eine sinnvolle Ergänzung bei der Modellerstellung bieten können.

Unter allen untersuchten Standorten konnten nur drei der Kategorie *REN Fließgewässer/ Seen* zugeordnet werden, sodass diese Variable aus statistischen Gründen vorzeitig aus der Regressionsanalyse herausgenommen werden musste.

Tage des Jahres mit Niederschlagssummen > 100 mm erwiesen sich aus statistischer und meteorologischer Sicht ungeeignet, um als Indikator für besonders nasse Tage zu dienen (Kapitel 6.6).

6. Nicht-selektierte Kovariablen beider Regressionsmodelle

6.1. Variablen des ökologischen Netzwerkes REN

Zu den Kovariablen, denen von keinem der beiden Modelle besondere Bedeutung beigemessen wurde, zählten die in der Analyse verbliebenen des ökologischen Netzwerkes *REN* (*REN Trockenstandort*, *REN Feuchtgebiet*, *REN Wald*). Nachdem dieses Netzwerk nur bestimmte Wälder, Seen, Trockenstandorte und Feuchtgebiete erfasst, erreicht es vermutlich keine ausreichende Flächendeckung, um die Frage nach dem Vorhandensein dieser speziellen Standorte, einschließlich solcher ohne anerkannte ökologische Bedeutung, zu beantworten. Eine sinnvolle Interpretation der Kovariable *REN Trockenstandort*, die eine negative Assoziation zwischen Schneckenfunden und Trockenstandorten aufdecken sollte, scheiterte schon allein daran, dass innerhalb des Datensatzes nur fünf Treffer für diese Variable auftraten. Sie bezogen sich zudem allein auf Schneckenfundorte, darunter zwei Duplikate. Hierin besteht, entgegen des ersten Eindrucks, kein Paradoxon, da die Treffer ausschließlich Randbereiche der Kontinua von Trockenstandorten und keine Kerngebiete beinhalteten. Jene Ausbreitungs- und Randgebiete inkludieren nur ähnliche Lebensraumtypen wie das Kerngebiet (Trockenstandort) oder als Randgebiete oft sogar andere Lebensraumtypen, die von bestimmten Tierarten des Kerngebietes höchstens teilweise oder vorübergehend genutzt werden (BERTHOUD et al., 2004). Alle so bezeichneten Flächen wiesen zudem Gewässer in ihrer unmittelbaren Nähe auf und verfügten

zum Teil über als trocken, zum Teil als feucht einzustufende Niederschlagshaushalte. Abgesehen von der, für unsere Zwecke offensichtlich schlechten Aussagekraft der Variable *REN Trockenstandort*, scheinen auch *REN Feuchtgebiete* und *REN Wald* an sich nur bedingt geeignet, um die untersuchten Standorte und ihre Habitattauglichkeit für *Galba truncatula* zu beurteilen. Dabei dürfte auch die Vorgabe eine Rolle spielen, dass sich Kernzonen per definitionem nicht überlappen dürfen, was die Zuordnung zu einem von mehreren nebeneinander vorkommenden Lebensräumen bedingen kann. Diese erfolgt entsprechend der Gewichtung Fließgewässer/ Seen > Wald > Trockengebiet > Feuchtgebiet ((BERTHOUD et al., 2004); persönliche Mitteilung von SCHENKER (2015)¹⁰). Hinzu kommt die Beschränkung des Netzwerkes auf bestimmte ausgewählte Wälder und Feuchtgebiete.

6.2. Vernässung

Es mag zunächst befremdlich wirken, dass für keines der beiden Modelle die Kovariable *Vernässung* als relevante Einflussgröße selektiert wurde. Die absoluten Häufigkeiten (Tabelle 36 des Anhangs) zeigen: Knapp 62 % aller Schneckenfundorte sind schwach grundnass oder grundnass und gut 85 % aller Orte ohne Schneckenvorkommen weisen keine Vernässung auf oder verfügen über nur grundfeuchte Böden. Jedoch gilt es, die Kollinearitäten zwischen der Variable *Vernässung* und anderen Einflussfaktoren wie der *Wasserdurchlässigkeit* und *Bodeneignung*, die als relevant erkannt wurden, zu berücksichtigen. *LASSO*-Verfahren beziehen Kollinearitäten bei der Variablenselektion mit ein. Es kommt zu einer Bevorzugung der, Berechnungen des Verfahrens zufolge, jeweils aussagekräftigsten Kovariablen gegenüber den mit ihr korrelierten Variablen. So dürfte die Beurteilung der Variablen *Wasserdurchlässigkeit* und *Bodeneignung* als einflussreiche Größen zum Ausschluss der korrelierten Kovariable *Vernässung* aus den Modellen geführt haben.

¹⁰ Schenker, J. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, persönliche Mitteilung (2015)

6.3. Gesteinklassierung

Die Legende der Kovariable *Gesteinklassierung* ist im Hinblick auf die technische Nutzung des Untergrundes konzipiert (Gewinnung von mineralischen Rohstoffen, Bauvorhaben). In einer groben Klassierung können prinzipiell drei Gesteinstypen voneinander unterschieden werden: Lockergesteine, Sedimentgesteine und kristalline Gesteine (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO, 2015c).

Ein relevanter Einfluss auf das Vorkommen von *Galba truncatula* scheint laut unseren Modellen nicht zu bestehen. Anhand der absoluten Häufigkeiten lässt sich eine völlig gleichmäßige Verteilung von Fundorten und Feldern ohne Schneckenhabitate auf die vorkommenden Kategorien Locker- und Sedimentgesteine entsprechend ihrer Anteile an der Gesamtzahl untersuchter Orte erkennen. Möglicherweise beinhaltet die gewählte Kovariable eine zu grobe Klassierung. Zudem bezieht sie sich primär auf den C-Horizont des Bodens und damit das Ausgangsgestein (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2015c), nicht aber die daraus entstehende darüberliegende Schicht, die landläufig als Boden wahrgenommen wird (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2015b). Deren Bedeutung für das Schneckenvorkommen ist nach Maßgabe im Modell enthaltener Variablen der Bodeneignung, die sich primär auf die oberen 50 cm des Bodens beziehen, als wesentlich größer einzuschätzen.

6.4. Grundwasserzusatz

Die Problematik der Kovariable *Grundwasserzusatz* bestand darin, dass sie unterschiedlichste Zusatzinformationen zu Grundwasservorkommen in der Schweiz innerhalb einer nicht zu großen Anzahl geeigneter Kategorien zusammenfassen sollte (Tabelle 25 des Anhangs). Beide Modelle können mit einer Aufspaltung in zahlreiche Einzelkategorien, die jeweils mit nur sehr geringen Häufigkeiten auftreten, schlecht umgehen. Deshalb mussten selten auftretende, teilweise sich kaum überschneidende Merkmale wie umfangreiche Grundwasserfassungen, Flussinfiltrationen ins Grundwasser und tiefere Grundwasserstockwerke zu übergeordneten Kategorien zusammengefasst werden. Dies resultierte in einer übermäßigen Repräsentanz der Kategorien, die zahlreiche, unterschiedliche Einzelmerkmale beinhalteten, im Vergleich zu enger definierten Kategorien. Die absoluten Häufigkeiten spiegeln diesen Effekt wider und können aus diesem Grund nicht zu einer verlässlichen Beurteilung der Situation

herangezogen werden. Keines der beiden Modelle berücksichtigte letztlich die Kovariable *Grundwasserzusatz* als relevante Größe, sodass sie ohne störenden Effekt im Ansatz verbleiben konnte. Während die Bedeutung von *Grundwasservorkommen* selbst anhand des hohen Schätzerbetrages für das *Grundwasservorkommen 2* (weniger ergiebige Vorkommen) deutlich wird, empfiehlt es sich, bei zukünftigen Studien auf zusätzliche, breit gefächerte Angaben zu den Vorkommen in Form eines Grundwasserzusatzes der beschriebenen Art und Weise zu verzichten.

6.5. Nährstoffspeichervermögen

Aus der Gruppe zahlreicher chemischer Elemente wie Aluminium, Cobalt, Kupfer, Eisen, Magnesium, Mangan, Phosphor, Blei und Zink trat in den Auswertungen von MCCANN et al. (2010b) Eisen als schwach negativer und Phosphor als sehr schwach positiver Prädiktor in Hinblick auf die Biologie der Schnecken und den Leberegelzyklus hervor. Über die Kovariable *Nährstoffspeichervermögen* konnten wir die Verfügbarkeit von Kationen im Boden in unseren Regressionsansatz einfließen lassen. Beide Modelle identifizierten das *Nährstoffspeichervermögen* als Bodeneigenschaft ohne relevanten Einfluss auf das Schneckenvorkommen. Insgesamt sind potenzielle Zusammenhänge zwischen chemischen Elementen des Bodens einerseits und verschiedenen Stadien des Leberegelzyklus sowie den Zwergschlammschnecken andererseits bislang nicht hinreichend geklärt.

6.6. Niederschlagshaushalt und niederschlagsabhängige Klimavariablen

Die Beschreibung geeigneter Zwischenwirthabitate legt nahe, dass Zwergschlammschnecken in hohem Maße an Feuchtigkeit gebunden sind (FRÖMMING, 1956). Risikomodelle zur Fasciolose beinhalten zum überwiegenden Anteil niederschlagsabhängige Kovariablen (OLLERENSHAW und ROWLANDS, 1959; SCHWEIKLE, 1997; YILMA und MALONE, 1998; DURR et al., 2005; RAPSCH et al., 2008; MCCANN et al., 2010a; CHARLIER et al., 2014b; SELEMETAS et al., 2015b) und sehen einen positiven Zusammenhang zwischen Niederschlägen und der Fascioloseprävalenz. Gegenteilige Aussagen finden sich in zwei belgischen Veröffentlichungen. BOSSAERT et al. gelangen 1999 zu der Erkenntnis, Niederschlagsverhältnisse würden innerhalb Belgiens keinen limitierenden Faktor für das Auftreten der

Fasciolose darstellen. Im Modell von BENNEMA et al. (2011) tritt der jährliche Niederschlag als einzig signifikante Klimavariablen auf. Ihren allerdings negativen Einfluss erklärte man sich damit, dass die vorherrschenden Bedingungen auch in niederschlagsärmeren Gegenden Belgiens ausreichend feucht wären, um einen vollständigen Ablauf des *Fasciola*-Zyklus zu gewährleisten und, dass sich die starken Niederschläge im untersuchten Gebiet Flandern durch die Abschwemmung freilebender Leberegelstadien und Zwergschlammschnecken in erster Linie negativ auswirkten. 2013 weisen KUERPICK et al. keine relevanten Einflüsse niederschlagsassoziierter Variablen auf die serologische Fascioloseprävalenz in Deutschland nach.

In keinem unserer beiden Regressionsmodelle wurde eine der Niederschlagsvariablen, *Niederschlagshaushalt*, *Niederschlag \geq 5-1*, *Niederschlag \geq 5-2* oder *Niederschlag \geq 5-3* als wichtige Einflussgröße auf das Vorkommen von *Galba truncatula* ausgewählt. Ähnlich den Klimaverhältnissen Belgiens, wo es im langjährigen Durchschnitt jeden zweiten Tag regnet (METEOGROUP, 2015), kann auch im von uns betrachteten Nordosten der Schweiz im Regelfall von ganzjährig ausreichend starken Niederschlägen (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014a) und entsprechend feuchten Bedingungen für das Überleben der Zwergschlammschnecken ausgegangen werden. Hierfür spricht, dass die Kovariable *Trockenperiode* ebenfalls nicht selektiert wurde, obwohl sich gleichzeitig hohe Temperaturen alleine als negative Prädiktoren für das Vorfinden von Schnecken erwiesen hatten. Nicht zu vernachlässigen ist die relative Widerstandsfähigkeit von *Galba truncatula* gegenüber Austrocknung über 1,5 bis 4,5 Monate, je nach Luftwärme, relativer Luftfeuchtigkeit, Bodenart, (schattenspendendem) Pflanzenbestand, Verteilung der Niederschläge, Luftbewegung, Schutz der Schalenmündung vor Luftwechsel und Alter der Schnecken (MEHL, 1932). Kürzere niederschlagsarme oder -freie Phasen müssen sich folglich nicht notgedrungen negativ auf die Population der Zwergschlammschnecken auswirken. Hinzu kommt, dass in den von uns vorrangig berücksichtigten Primärhabitaten in der Regel nicht mit einem Versiegen der Feuchtigkeitsquellen und einem dadurch bedingten Absterben der Schnecken infolge mangelnden Niederschlags zu rechnen ist. Über eine größere Bedeutung niederschlagsabhängiger Variablen für das Schnecken-vorkommen in

Sekundär- und Tertiärhabitaten kann an dieser Stelle nur gemutmaßt werden. Letztlich entscheidet jedoch die Existenz besiedelter Primärhabitats, von denen ausgehend temporäre Habitats aufgesucht werden können, darüber, ob *Galba truncatula* in einem Gebiet vorkommen kann oder nicht.

Gemäß der von uns gewählten Niederschlagsvariablen mit einem Cut-Off von 5 mm pro Tag (für niederschlagsreiche Tage) respektive 0 mm Niederschlag pro Tag (für Trockenperioden) kann keine Aussage über den Einfluss von täglichen Niederschlagsmengen zwischen 0 und 5 mm gemacht werden.

Als weitere Kovariable des Niederschlages war im Zuge der Datenerhebung die *Anzahl der Tage des Jahres mit einer Niederschlagssumme von mehr als 100 mm* bestimmt worden. Sie sollte als Indikator für extrem nasse Tage sowie als potenzieller Schwellenwert für den von RAPSCH et al. (2008) und BENNEMA et al. (2011) erwähnten negativen Abschwemmungseffekt hoher Niederschlagsmengen dienen. Bei der Erhebung des Parameters zeigte sich jedoch bald, wie selten Tage diesen Charakteristikums in der Schweiz auftraten. Somit ungeeignet für eine statistische Analyse, konnte diese Kovariable im weiteren Verlauf nicht mehr berücksichtigt werden. Nach Abschluss der Modellierung ergab sich aus persönlicher Kommunikation mit der Abteilung Klima des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, dass lokale Überschwemmungen, beispielsweise im Zuge schwerer Gewitterschauer, bereits bei deutlich geringeren Niederschlagssummen als den von uns zugrunde gelegten 100 mm pro Tag auftreten könnten (persönliche Mitteilung von BADER (2015)¹¹). BENNEMA et al. (2011) führten den von ihnen beobachteten negativen Zusammenhang zwischen Niederschlägen und dem Auftreten von *Galba truncatula* auf monatliche Niederschlagssummen von durchschnittlich 61,1 mm zurück. Dadurch dass sich einzelne starke Schauer, die zur Abschwemmung führen könnten, jedoch nicht notwendigerweise stets in Form erhöhter Tages- oder Monatsniederschläge manifestieren müssen, wird eine automatisierte Erfassung dieses potenziellen Einflussfaktors zusätzlich erschwert.

¹¹ Bader, S. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich, Schweiz, persönliche Mitteilung (2015)

7. Von beiden Modellen ausgewählte Kovariablen

7.1. Selektierte boden- und geländeabhängige Einflussfaktoren

7.1.1. Die Bedeutung von Riet, Feuchtflächen, Hangwasseraustritten und Gewässern

In beiden Modellen wurden die Kovariablen *Riet...Feuchtflächen*, *Hangwasseraustritt* und *Gewässer im Umkreis von 100 m* als wichtige Einflussgrößen auf das Vorkommen von *Galba truncatula* ausgewählt.

Tertiärhabitats, die durch vorübergehende Versumpfung meist gewässernaher Wiesenflächen entstehen (MEHL, 1932), Moore und Sümpfe (KLEIMAN et al., 2007; SCHWEIZER et al., 2007), Feuchtflächen (CHARLIER et al., 2011; DE ROECK et al., 2014) und Marschland (ZUKOWSKI et al., 1993) gelten in verschiedensten Veröffentlichungen zur Fasciolose als bedeutende Aufenthaltsorte für den Zwischenwirt. MEHL (1932) unterscheidet in seinen Ausführungen zudem zwischen selten besiedelten sauren Moorböden und anmoorigen, nicht stärker sauren Stellen mit Wasserwechseln, an denen Zwergschlammschnecken häufiger vorkämen. Hierbei legt er seine umstrittene Auffassung zugrunde, *Galba truncatula* bevorzuge ein alkalisches Milieu.

Hangwasseraustritte wurden in bisherigen Arbeiten zur Fasciolose stark vernachlässigt, wobei eingeräumt werden muss, dass ihre Bedeutung vermutlich auf Länder beschränkt bleibt, in denen stark hängiges Gelände vorkommt und als Weideland genutzt wird. Erstmals nennen MATT et al. (2007) Hangwasseraustrittstellen als potenzielle Zwischenwirthabitats in Österreich. Bei der Validierung einer interaktiven Karte zum Fascioloserisiko in der Schweiz (RAPSCH et al., 2008) vermutet BAGGENSTOS (2012) einen Grund für die unzureichende Sensitivität und Spezifität der Karte in der Missachtung von Hangwasseraustritten als Schneckenhabitats. In jedem unserer Modelle stellte sich die entsprechende Kovariable *Hangwasseraustritt* als diejenige mit dem zweitstärksten Einfluss auf das Vorkommen von *Galba truncatula* heraus. Dies unterstreicht ihre Bedeutung in der von Bergen und Erhebungen geprägten Topographie der Schweiz. Ferner findet sich hierin ein möglicher Erklärungsansatz für den insgesamt nur minimalen Einfluss der Hanglage (Tabelle 40 des Anhangs) auf die Eignung eines Geländes als Habitat im

grplasso-Modell: Negative Effekte durch eine mit dem Gefälle zunehmende Drainage (TUM et al., 2004; MCCANN et al., 2010a; BENNEMA et al., 2011) und positive Einflüsse der mit ansteigendem Gefälle häufiger auftretenden Hangwasseraustritte könnten sich annähernd nivellieren. Dafür spricht auch, dass sich drei Viertel aller untersuchten Orte mit einem Gefälle der höchsten Kategorie 3 (Hangneigung $> 35\%$) durch Hangwasseraustritte auszeichneten. Wie sich die Einflussgröße Gefälle auf das Vorhandensein von Zwergschlammschnecken auswirkt, hängt also letztlich davon ab, ob es zum Austritt von Hangwasser kommt oder der Drainageeffekt überwiegt.

Gewässer wie Bäche (MEHL, 1932) und (Drainage-)Gräben, Tümpel und Teiche (MEHL, 1932; SCHWEIZER et al., 2007; CHARLIER et al., 2011; CRUZ-MENDOZA et al., 2011; DE ROECK et al., 2014) stellen die häufigst genannten Primärhabitats in den bisherigen Studien zu Fasciolose dar. CHARLIER et al. (2011) lokalisierten potenzielle Habitats in einer Distanz zu Wasserläufen von bis zu 900 m. 34 % der Habitats waren weniger als 50 m vom Gewässer entfernt gelegen, 64 % in einem Umkreis von weniger als 200 m (CHARLIER et al., 2011). *Gewässer im Umkreis von 100 m* um einen Geländepunkt erwiesen sich im *grplasso*- wie auch im *glmLasso*-Modell als einer der stärksten positiven Prädiktoren für das Auffinden von *Galba truncatula*.

Auch wenn viele Autoren die Bedeutung von Gewässern und Feuchtflächen als Habitats anerkennen: In die wenigsten Modelle finden potenzielle Habitats explizit als Kovariable Eingang. Vielmehr wird der Versuch einer Modellierung des Fascioloserisikos ausschließlich auf der Basis von Klimabedingungen und Bodeneigenheiten unternommen. Entsprechend der Biologie des Zwischenwirtes jedoch liegt nahe, dass schneckentaugliche Klima- und Bodenbedingungen nicht ausreichen, um ein Auftreten von *Galba truncatula* und damit die Aufrechterhaltung des Leberegelzyklus vorherzusagen. Selbst die besten Niederschlagsverhältnisse und dem Schneckendasein zuträglichen Böden schaffen per se noch keine Primärhabitats wie Gewässer oder Hangwasseraustritte. Daher empfiehlt es sich aus unserer Sicht, die oben genannten Kovariablen auch in zukünftige Transmissionsmodelle unbedingt miteinzubeziehen. Der daraus entstehende Arbeitsaufwand könnte durch die satellitengestützte Kartierung solcher Habitats nach Vorbild von DE ROECK et al. (2014) minimiert werden. Eine Beurteilung der Fließgeschwindigkeit von

Bachabschnitten, hinsichtlich derer MEHL Werte von weniger als 40 cm/ s als Besiedlungskriterium für Zwergschlammschnecken erachtet (MEHL, 1932), kann auf diese Weise jedoch nicht erfolgen.

7.1.2. Der Einfluss der Vegetation

An der Selektion der Kovariablen *Wald Bild* und *Bäume/ Sträucher* lässt sich die Bedeutung der Vegetation für das Vorkommen von *Galba truncatula* festmachen. Im Vergleich zur Referenzkategorie *kein Wald*, ließen die Kategorien *Nähe Wald* (im Umkreis von < 200 m) und *im/ am Wald* einen deutlich respektive mäßig stark positiven Einfluss im *grplasso*-Modell erkennen. Bei gleichzeitiger Beachtung der stark positiven Einwirkung von Bäumen in beiden Modellen ist daraus abzuleiten, dass einzelner Baumbestand den Lebensbedingungen für Zwergschlammschnecken in hohem Maße zuträglich ist, der förderliche Effekt aber mit dem Übergang zu dichtem Waldbewuchs abnimmt. Dies kann folgendermaßen interpretiert werden: Kleine, isoliert vorkommende oder waldrandständige Baum- und Buschgruppen dürften den Schnecken einen effektiven Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung und Austrocknung bieten. Für *Lymnaea elodes* ist bereits bekannt, dass die Tiere bei Übersommerung Bäume aufsuchen, vermutlich um der direkten Sonneneinstrahlung und damit verbundenen sehr hohen Temperaturen am Boden zu entgehen (JOKINEN, 1978). Dichter Waldbestand hingegen könnte sich durch zu starke Hemmung des Sonnenlichts negativ auf das Algenwachstum und damit die Nahrungsgrundlage der Tiere auswirken ((PETZOLD, 1989) zitiert in (BAGGENSTOS, 2012)). Die Kategorie *im/ am Wald* enthält überwiegend am Waldrand und damit im günstigen Halbschatten gelegene Orte, deren positive Eigenschaften durch vollständig im Wald lokalisierte Flächen derselben Kategorie geschmälert werden. Das erklärt den schwächer positiven Effekt dieser Kategorie im Vergleich zur Kategorie *Nähe Wald*. Letztere beinhaltet untersuchte Orte, die sich vorrangig deutlich näher als 200 m vom Wald entfernt befinden.

Nicht auszuschließen ist, dass die Bedeutung von Bewaldung für *Galba truncatula* zusätzlich auf einer Assoziation des Bewuchses mit bestimmten Bodeneigenschaften wie dem Boden-pH und -gefüge beruht. Mitteleuropäische Waldböden verfügen gewöhnlich über einen pH-Wert zwischen 5 und 6,5. Die Basenversorgung des Bodens ist dabei ein wichtiger Parameter für die Verfügbarkeit von Nährstoffen. Mit steigender Acidität geht ein zunehmender

Nährstoffmangel einher. Wenn auch Uneinigkeit zwischen den Autoren hinsichtlich der pH-Präferenzen von *Galba truncatula* besteht (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SOULSBY, 1982; CHARLIER et al., 2014b): Gemein scheint ihren Aussagen eine Meidung stark saurer pH-Werte durch die Zwischenwirte. Bestimmend für die Fähigkeit von Waldböden, mineralische Nährstoffe für die Pflanzen bereitzuhalten, ist ferner das Bodengefüge. Sandige Böden können Nährstoffe wesentlich schlechter binden als tonige Böden. Außerdem ist das Wasserhaltevermögen in tonigen Mineralböden besser (HOFMEISTER, 1990; OTTO, 1994; SANDER, 2003). Verschiedene Autoren bestätigen die Bevorzugung von Ton- und Lehmböden durch die Zwergschlammschnecken (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SCHWEIZER et al., 2007). Hier wird deutlich, dass Zwergschlammschnecken und Waldbewuchs sich teilweise überschneidende Präferenzen an die Bodenbeschaffenheit haben können – ein weiterer Erklärungsansatz für ihr bevorzugtes Nebeneinander im untersuchten Gelände.

Darüber hinaus unterstützt die Gegenwart von Pflanzenreichtum beziehungsweise Bäumen die Produktion von Biomasse und dadurch verrotteten Pflanzenbestandteilen als Nahrung für die Schnecke (MEHL, 1932).

Die Bedeutung von Bäumen und Wald für das Auftreten von *Galba truncatula* lässt damit vielschichtige Erklärungen zu.

7.1.3. Grundwasservorkommen und ihre Bedeutung

Das Grundwasservorkommen im Boden fand bereits bei der Erstellung einer interaktiven Karte zum Fascioloserisiko in der Schweiz (RAPSCH et al., 2008) Berücksichtigung. Dabei wird nicht näher erläutert, welchen Grundwasservorkommen ein positiver Effekt auf *Fasciola hepatica* und die Zwergschlammschnecke zuzuschreiben ist. Laut SCHNIEDER (2006) besteht eine Präferenz der Zwergschlammschnecke für Gelände mit hohem Grundwasserstand.

Wie weiter oben erwähnt gelten Böden mit geringer Wasserdurchlässigkeit (Ton, Lehm, feine Sande) als begünstigende Faktoren für Zwischenwirthabitate (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SCHWEIZER et al., 2007; MCCANN et al., 2010a). In den Hohlräumen des über undurchlässigen Schichten gelegenen Bodens sammelt sich Sickerwasser an und bildet ein Grundwasserstockwerk (LASSERT,

1999; DEMUTH, 2005). Die Ergiebigkeit dieses Grundwasservorkommens an einem Ort dürfte von verschiedenen Faktoren wie den anfallenden Mengen an Sickerwasser, dem Fassungsvermögen des über dem Grundwasserstauenden Gestein befindlichen Horizonts (Grundwasserleiter) und dem Gefälle abhängen. Letzteres führt zum Abfließen des Grundwassers in Gefällerrichtung (DEMUTH, 2005).

Je nach Gefälle und Lage der von *Galba truncatula* bevorzugten, wasserstauenden Schichten – oberflächlich oder in der Tiefe – ist eine positive Assoziation ihres Vorkommens sowohl mit schwächeren als auch ergiebigeren Grundwasservorkommen vorstellbar. Von den Schnecken favorisierte Tonböden (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SCHWEIZER et al., 2007) weisen im Vergleich verschiedener Bodenarten zwar die höchste Wasserspeicherfähigkeit auf, garantieren jedoch nur eine geringe Wassernachlieferung über den Grundwasserleiter (ENZYKLOPÄDIE, 2015) und bergen als geringdurchlässige Deckschichten den Nachteil einer minderen Grundwasserneubildungsrate. Dagegen wird die Grundwasserneubildungsrate durch eine Grundwasserüberdeckung aus gut durchlässigem Kies gesteigert, da der Abflussanteil der Niederschläge ausschließlich dem Grundwasser zugute kommt (WASSERWIRTSCHAFTSAMT MÜNCHEN, 2015).

Zu vermuten wäre ein negativer Zusammenhang zwischen dem Fehlen jeglicher Grundwasservorkommen – als Indikator für geringen Niederschlag, Wasserableitung über ein Gefälle oder geringe Wasserspeicherung im Boden – und dem Auftreten von Zwergschlammschnecken. Tonreiche Böden können entsprechend ihrer beschriebenen Eigenschaften ergiebige Grundwasservorkommen einerseits fördern, andererseits eine geringere Wassernachlieferung und verminderte Grundwasserneubildung bedingen. Eine einfache Korrelation zwischen wasserundurchlässigen Böden und der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen ist folglich nicht möglich. Sieht man die Bedeutung von Tonböden für *Galba truncatula* vornehmlich in ihrer Eigenschaft, die Bildung wasserführender Primärhabitats zu fördern (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956), muss man von tonhaltigen Deckschichten ausgehen. Sie führen jedoch zu einer Hemmung der Grundwasserneubildung und dürften mit geringeren Grundwasservorkommen assoziiert sein.

Damit steht im Zweifel, ob sehr ergiebige Grundwasservorkommen mit hohen Grundwasserständen (SCHNIEDER, 2006) und günstigen Umweltverhältnissen für *Galba truncatula* positiv assoziiert sind.

Unser *grplasso*-Modell bewertet den Einfluss *weniger ergiebiger Grundwasservorkommen* auf die Zwergschlammschnecken als deutlich positiv im Vergleich zur Referenzkategorie *ohne ergiebige Grundwasservorkommen*. Dies steht im Einklang mit unserer oben geäußerten Vermutung, sehr spärliche Grundwasservorkommen könnten sich durch mangelnde Bereitstellung von Wasserreserven negativ auswirken. Ferner betrachtet das Modell *ergiebige bis sehr ergiebige Grundwasservorkommen* als negative Prädiktoren. Hierbei könnte es sich um einen Nebeneffekt der Bindung von *Galba truncatula* an wasserundurchlässige Bodenarten in oberflächlichen Deckschichten mit der Folge einer reduzierten Grundwasserneubildung und Wassernachlieferung handeln.

7.1.4. Zusammenhänge zwischen der *Höhe über N. N.* und dem Schneckenvorkommen

Eine Reihe von Autoren hat die *Höhe über N. N.* als Einflussgröße in ihren Modellen berücksichtigt und zum Teil Grenzen ermittelt, innerhalb derer mit dem Auftreten von Zwergschlammschnecken zu rechnen ist (SCHWEIKLE, 1997; MALONE et al., 1998; YILMA und MALONE, 1998; TUM et al., 2004; DUTRA et al., 2010; MCCANN et al., 2010a).

Vor dem Hintergrund einer vertikalen Temperaturabnahme um bis zu 1 °C pro 100 Höhenmetern (BLÜTHGEN und WEISCHET, 1980), könnte ein negativer Zusammenhang zwischen der Höhenlage und dem Vorkommen von *Galba truncatula* bestehen. Hinzu kommt, dass mit ansteigender Höhe auch Boden und Vegetation karger werden.

Im Widerspruch dazu steht die Charakterisierung der *Höhe über N. N.* als positiver Prädiktor für das Vorkommen von Zwergschlammschnecken im *grplasso*-Modell. Sie ist mit Sicherheit datenstrukturbedingt. Eine genauere Betrachtung des Datensatzes offenbart, folgende Verhältnisse: Sowohl der mit 385,5 m über N. N. tiefstgelegene als auch der höchstgelegene (962,3 m über N. N.) aller Geländepunkte stellte einen Schneckenfundort dar. Der Mittelwert der Höhen aller Fundorte beträgt 590,8 m über N. N., für habitattungeeignete Felder liegt er bei 515,1 m über N. N. und damit merklich tiefer. Diese Verteilung mag

unter anderem damit zusammenhängen, dass schneckenbegünstigende Hangwasseraustritte vermehrt in steiler geneigtem Gelände größerer Höhen vorkommen. Zudem erreichten die von R. Baggenstos befundeten, zufällig ausgewählten Flächen, unter denen sich alle habitattungseigneten Felder befanden, Höhen von maximal 715,1 m und waren damit insgesamt deutlich tiefer gelegen als die Datenpunkte von G. Knubben-Schweizer, denen das Gros der Fundorte entstammte. Für das Auftreten von *Galba truncatula* kritische Höhenlagen der Schweiz, die in der Literatur bis dato mit 2100 Höhenmetern benannt sind (ECKERT et al., 1975), wurden in unserem Datensatz nicht tangiert, auch nicht unter Berücksichtigung der Koordinaten, die in Ermangelung repräsentativer Wetterstationen nicht in den Modellansatz eingehen konnten. Die im Schnitt geringere Höhenlage von untersuchten Orten ohne Schnecken im Vergleich zu Fundorten führt also zu einer datenstrukturbedingt positiven Bewertung des Einflusses jener Kovariable auf das Vorfinden von Schnecken. Dabei konnten kritische Höhen und damit verbundene etwaig negative Einflüsse wie Temperaturabnahme, kargere Böden und Vegetation nicht miteinbezogen werden. An dieser Kovariable lässt sich somit nur die Verteilung der untersuchten Orte entsprechend ihrer Höhenlage ablesen, nicht aber der erwartete negative Einfluss, der insbesondere durch die vertikale Temperaturabnahme ab größeren Höhen zu vermuten wäre. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die mit der Höhe über N. N. zunehmende Häufigkeit von Hangwasseraustritten den Effekt der Datenstruktur auf die positive Wichtung der Kovariable zudem verstärkt.

Ab welchen Höhen über N. N. ein potenziell negativer Effekt der vertikalen Temperaturabnahme auf das Vorkommen der Zwergschlammschnecken greifen könnte, bleibt indessen ungeklärt. Südamerikanische Regionen in Höhenlagen von über 4000 m weisen die höchsten bekannten Prävalenzen humaner Fasciolose auf. Freilebende Leberegelstadien und Zwergschlammschnecken scheinen hier eine enorme Toleranz gegenüber Extrembedingungen entwickelt zu haben (MASCOMA et al., 2001). Dem CSCF (Centre Suisse de Cartographie de la Faune) wurden in den Jahren 1990 bis 2011 Schneckenfunde aus verschiedenen Kantonen der Schweiz gemeldet, die plausible Fundorte in Höhenlagen von bis zu 2300 m und mehr beinhalteten (persönliche Mitteilung von CAPT (2012)¹²) und damit auf

¹² Capt, S. Centre Suisse de Cartographie de la Faune (CSCF), Neuchâtel, Schweiz, persönliche Mitteilung (2012)

eine Überschreitung der von ECKERT et al. (1975) publizierten kritischen Höhenlagen hinweisen.

7.1.5. Lithologische Hauptgruppen als selektierte Einflussgrößen

Ein Vorzug der vom *grplasso*-Modell selektierten Kovariable *Lithologie* gegenüber der *Gesteinklassierung* ist eine umfassendere Beschreibung der Bodenbeschaffenheit. Die zugrundegelegte lithologisch-petrografische Karte der Schweiz unterscheidet bei der Charakterisierung verschiedener Flächen jedoch Kategorien, die prinzipiell nicht miteinander vergleichbar sind. Jede Fläche wird hier einer Kategorie zugeordnet, die entweder die Entstehung des Bodens oder aber die mineralische Zusammensetzung oder Bodenart (Korngrößenzusammensetzung) beschreibt. Für keine der Flächen und damit für keinen der von uns untersuchten Geländepunkte steht die Summe verschiedener Kategorien als Gesamtheit wichtiger Bodenmerkmale zur Verfügung, sondern jeweils nur eine Kategorie. Dies führt dazu, dass in der Karte und nachfolgend im Modell beispielsweise *Mergel*, welcher sich durch einen hohen Kalkgehalt auszeichnet, als Merkmal eines untersuchten Ortes und eine Kategorie wie *Sande*, *Kiese*, *Gerölle*, die durch bestimmte Korngrößen charakterisiert ist, als Merkmal eines anderen Ortes, in ihren Einflüssen auf das Schneckenvorkommen verglichen werden müssen.

Konglomerate und Brekzien bezeichnen Flussgeröll, welches durch Zementierung runder respektiver eckiger Gesteinstrümmer mit feinkörniger Matrix entstanden ist. Die Begrifflichkeiten beziehen sich trotz der groben Beschaffenheit aber nicht auf die Korngrößenzusammensetzung des Bodens, sondern vielmehr seine Entstehung. Deshalb können sie mit den Kategorien *Sande*, *Kiese*, *Gerölle* und *Tone*, *Silte*, *Sande* (als Kategorien der Korngröße) nicht verglichen werden, sondern entbehren einer geeigneten Vergleichskategorie innerhalb der zur Verfügung stehenden. In weiteren Kategorien vorkommende Bezeichnungen wie Sandsteine, Mergel(schiefer) und Kalkphyllite definieren die Zusammensetzung des Gesteins, nicht aber die Körnung (persönliche Mitteilung von DÜHNFORTH (2015)¹³).

¹³ Dühnforth, M. Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Geowissenschaften, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie, München, persönliche Mitteilung (2015)

Unser *grplasso*-Modell spricht den Kategorien *Sandsteine*, z.T. *Mergel* und *Sande*, *Kiese*, *Gerölle* gegenüber der Referenzkategorie *Tone*, *Silte*, *Sande* einen leicht positiven Effekt auf die Wahrscheinlichkeit, *Galba truncatula* vorzufinden, zu. Ein negativer Effekt ergibt sich für Kategorie 6, die hauptsächlich Mergel und Kalkstein enthält. Inhaltlich vergleichen lassen sich hier ausschließlich *Sande*, *Kiese* und *Gerölle*, die eine zunehmende Korngröße aufweisen, einerseits und die Referenzkategorie *Tone*, *Silte*, *Sande* aus feinkörnigen Bodenarten andererseits. Der leicht positive Einfluss grobkörnigen Bodens gegenüber der feinkörnigen Referenzkategorie widerspricht bisherigen Einschätzungen der Literatur und unseren übrigen Befunden zu schneckenbegünstigenden Bodeneigenschaften. So wäre zu erwarten gewesen, dass ton- bzw. lehmhaltige Böden (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SCHWEIZER et al., 2007) beziehungsweise Böden mit sehr feinem Sand (MCCANN et al., 2010a) das Vorkommen von *Galba truncatula* förderten. Dies stünde in Einklang mit unseren Ergebnissen hinsichtlich der Kovariablen *Wasserdurchlässigkeit*, *Gründigkeit* und *Grundwasservorkommen*.

Der von uns berechnete schwach positive Einfluss grobkörnigen Bodens gegenüber feinkörnigem resultiert aus einer Ungleichverteilung jeweils nur der Hälfte aller Fundorte respektive Orte ohne Schneckenhabitate auf die beiden Kategorien, welche die Korngröße bestimmen. Die andere Hälfte der untersuchten Orte ist auf der Karte in Kategorien eingeteilt, die sich auf andere Bodeneigenschaften wie etwa die mineralische Zusammensetzung beziehen, sodass über ihre Körnung keine Aussage getroffen werden kann. Der errechnete Einfluss der Korngröße stützt sich folglich nur auf die Hälfte der ausgewerteten Datenpunkte und darf daher nicht als repräsentativ angenommen werden.

Insgesamt kann die Aussage unseres Modelles hinsichtlich des Einflusses lithologischer Eigenschaften in Ermangelung der Vergleichbarkeit einzelner Kategorien nicht als zuverlässig erachtet und interpretiert werden.

Dennoch empfiehlt es sich aufgrund bisheriger Erkenntnisse zur Bedeutung der Bodenbeschaffenheit für das Vorkommen von *Galba truncatula* (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SCHWEIZER et al., 2007; MCCANN et al., 2010a), Eigenschaften der Korngröße auch in zukünftige Modelle miteinfließen zu lassen. Ferner könnte die Gesteinszusammensetzung, wie sie in der Kategorie *Mergel* oder *Sandstein* aufgegriffen wird, einen Einfluss auf die Schnecken haben. Gesteinsart und -genese bestimmen den Mineralbestand von Böden. Durch

tiefwurzelnde Vegetation und Bodentiere werden verwitterbare Mineralien aus Gesteinsschichten an die Oberfläche transportiert (SCHWEIKLE, 1997) und beeinflussen so auch den pH der oberen Horizonte. Sie dienen dort unter anderem der Pufferung von Säuren. Die Verfrachtung von Böden betrifft nur die oberste Auflage und gilt mit Dimensionen von Millimetern pro Jahr in den betrachteten Regionen als unwesentlich. Daher kann von den lithologischen Merkmalen tieferer Schichten indirekt auf pH-Eigenschaften der darüber gelegenen Bodenhorizonte geschlossen werden (persönliche Mitteilung von DÜHNFORTH¹⁴ (2015)). Nicht berücksichtigt werden auf diese Weise pH-relevante Einflüsse weiterer Faktoren wie Vegetation, Niederschlag oder landwirtschaftlicher Maßnahmen. Durch Düngung mit Kalk oder Mergel beispielsweise wird einer Versauerung des Bodens vorgebeugt (MEHL, 1932; KÖLLE, 2010). MEHL (1932) sieht in der Alkalisierung von Böden eine positive Beeinflussung der Habitateignung. Den Angaben anderer Autoren zu pH-Präferenzen der Schnecken zufolge, wären auch gegensätzliche Zusammenhänge vorstellbar. Dementsprechend sollten neue Modelle zur Fasciolose Angaben zur Gesteinszusammensetzung enthalten. Insbesondere in Fällen, in denen keine Daten zum Boden-pH selbst erhältlich sind, können so indirekte Hinweise auf den pH-Wert gewonnen werden. Jedoch sollte – wegen der Gegenüberstellung nicht vergleichbarer Kategorien – zur Erhebung dieser Einflussgrößen nicht auf den Layer der lithologisch-petrografischen Karte der Schweiz zurückgegriffen werden.

7.1.6. Bodeneignung für Kulturland und Zwergschlammschnecken

Die Kovariable *Bodeneignung für Kulturland* umfasst verschiedene Bodeneigenschaften und bewertet diese in Hinblick auf die land- und forstwirtschaftliche Eignung des Geländes. Sie gilt im *grplasso*-Modell als Variable mit relevantem Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, *Galba truncatula* an einem Ort vorzufinden. Gegenüber der Referenzkategorie 1, *sehr gute Produktion mit einer Hangneigung < 25 %*, besitzt die Kategorie 2, *gute Produktion bei gleicher Hangneigung*, einen leicht positiven Einfluss. Er lässt sich damit erklären, dass Flächen dieser Kategorie entsprechend den Übersichtstabellen zur

¹⁴ Dühnforth, M. Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Geowissenschaften, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie, München, persönliche Mitteilung (2016)

Bodeneignungskarte (BUNDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT (BLW), 2013) neben der Nutzung für Acker-/ Getreidebau, die in Kategorie 1 überwiegt, auch für die Weidenutzung empfohlen werden. Eine Bevorzugung von Weide gegenüber Ackerflächen durch die Zwergschlammschnecken lässt sich leicht nachvollziehen. Von Zwergschlammschnecken bevorzugter Tonboden (MEHL, 1932; FRÖMMING, 1956; SCHWEIZER et al., 2007) beispielsweise eignet sich trotz seiner guten Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität am besten zur Nutzung als Wiese (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2015a). Letztlich muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass die Bodeneignung bestimmter Flächen noch nichts über ihre tatsächliche Nutzung aussagt. So sollte von einer positiven Assoziation zwischen der Kategorie 2, der Nutzung als Weideland und dem Vorkommen von *Galba truncatula*, vorrangig bei tatsächlicher Nutzung des Geländes gemäß der Bodeneignung ausgegangen werden.

Die Kategorie 5, *ungeeignet* für landwirtschaftliche Bewirtschaftung, weist einen noch geringeren, jedoch ebenfalls positiven Einfluss auf das Schneckenvorkommen auf. Insgesamt wirken sich Kombinationen aus Eigenschaften wie sehr flacher Gründigkeit, sehr oder gar extrem geringem Nährstoff- und Wasserspeichervermögen, stark gehemmter Wasserdurchlässigkeit, ausgeprägter Vernässung und großen Hangneigungen negativ auf die Bodeneignung aus. Ab Hangneigungen von 25 bis 35 % nimmt die Eignung ebenfalls ab. Stark vernässte Böden oder extrem steile Flächen mit Hangneigungen von mehr als 50 % beispielsweise führen zur Eingruppierung in die Kategorie 5. Die Kategorien *sehr flache Gründigkeit*, *extrem geringes Nährstoff- und Wasserspeichervermögen* und *stark gehemmte Wasserdurchlässigkeit* waren in unseren Erhebungen nicht vertreten. Es traten jedoch Schneckenfundorte mit *starker Vernässung*, *Hangneigungen von über 35 bis 50 %* und *gehemmter Wasserdurchlässigkeit* auf, die durchschnittlich auch eine geringere Gründigkeit als Orte ohne Schnecken besaßen. Dies würde die Zuordnung jener Fundorte zur Bodeneignung der Kategorie 5 und damit den positiven Einfluss dieser Kategorie auf das Vorhandensein von Schnecken erklären. Unter die so kategorisierten Flächen fallen vermutlich oftmals wenig bewirtschaftete, feuchte Extensivflächen und Weideflächen für Jungvieh.

Schwach negative Einflüsse, gemessen an der Referenzkategorie 1, ergaben sich für die Kategorien 4 und 3, das heißt beeinträchtigten Ackerbau (Hangneigung $\geq 25\%$, max. 35%) und mäßige Produktion (Hangneigung $< 25\%$).

Kategorie 4 enthält, so vermitteln es Übersichtstabellen in den Ausführungen zur Bodeneignungskarte, vor allem steiler geneigte Flächen, Gebirgskämme und Schuttkegel, die für die Weidung von Kleinvieh taugen. In Sachen Hangneigung ließ sich eine Bindung von *Galba truncatula* an Hangwasseraustritte und die sehr schwach positive Korrelation mit *Hanglagen von > 35% nachweisen. Mit diesem Befund stimmt der positive Einfluss von Gelände der Bodeneignungskategorie 5 (Hangneigungen von > 35 bis 50%) überein. Für Kategorie 4, die geringere, aber immer noch steile Hangneigungen aufzuweisen scheint, wäre prinzipiell mit ähnlich positiven Korrelationen zu rechnen. Doch verfügt sie als Kategorie, in die insbesondere Schuttkegel eingestuft werden, über einen grobkörnigen Charakter und damit, gemessen an den Einflüssen feinkörniger, dichter Böden, über negative Effekte auf das Vorkommen von *Galba truncatula* – ein Umstand, der das schwach negative Schätzergebnis jener Kategorie 4 für die Beeinflussung der Habitateignung rechtfertigen kann.*

Kategorie 3 schließlich umfasst weniger weidegeeignete Flächen als die sich positiv auswirkende Kategorie 2, insbesondere Plateaus/ harten Kalk, Tafeljura und Schotter. Eine schlechte Eignung solchen Geländes für das Auftreten von *Galba truncatula* mutet plausibel an.

In den *Fasciola*-Regressionsmodellen von MCCANN et al. (2010b) kristallisierte sich *improved grassland* als positiver Prädiktor heraus. Dieses kommt auf fruchtbaren Böden vor und wird gerne als Weideland oder zum Silieren genutzt. MCCANN et al. (2010b) sehen hierin einen Widerspruch zu anderen Ergebnissen ihrer Modelle, wonach Land von schlechter Qualität das Fascioloserisiko fördere. Vergleichbare Befunde ergeben sich bei der Betrachtung oben genannter Ergebnisse unserer Regressionsanalyse für *Galba truncatula*: Flächen guter Bodeneignung der Kategorie 2 und für die landwirtschaftliche Nutzung ungeeignete Flächen der Kategorie 5 zeichnen sich beide durch einen positiven Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, Zwergschlamm Schnecken vorzufinden, aus.

7.1.7. Die Kovariable *Klimaeignung Übersicht*

Das *grplasso*-Modell weist geringe Einflüsse der Kovariable *Klimaeignung Übersicht* auf das Vorkommen von *Galba truncatula* nach. Im Vergleich zur Referenzkategorie *Dauergrünland*, die unter Schneckenfundorten am stärksten vertreten ist, wird der *Klimaeignung für Ackerbau und Spezialkulturen* sowie der *Eignung für Futterbau* ein positiver Effekt beigemessen, während die *Klimaeignung für Futter- und Ackerbau* mit negativem Einfluss belegt wird. Der bestehende Widerspruch lässt sich auf Basis der absoluten Häufigkeiten einzelner Kategorien der Kovariable (Tabelle 28 des Anhangs) erklären. Mit insgesamt nur 4 aus 242 untersuchten Orten ist die Kategorie *Ackerbau und Spezialkulturen begünstigt* insgesamt sehr schwach besetzt und zudem unter Schneckenfundorten um nur 0,06 % stärker vertreten als unter Orten ohne Schneckenfund. Diese minimalen Häufigkeitsunterschiede führen aufgrund der schwachen Besetzung der Kategorie zu einer Überschätzung ihres positiven Einflusses auf das Schneckenvorkommen durch das *grplasso*, weshalb der Effekt der gesamten Kovariable *Klimaeignung Übersicht* nur eingeschränkt gedeutet werden kann. Zusätzlich wird die Interpretation der Ergebnisse durch das hohe Maß an Kollinearität zwischen den verschiedenen Kategorien der Kovariable erschwert: Die Überschneidung der Merkmale Futter- und Ackerbau lässt unsere Schätzungen hinsichtlich der Kovariable *Klimaeignung Übersicht* ungenau und instabil werden, sodass die Verteilung der absoluten Häufigkeiten im Modell inkorrekt wiedergegeben wird. Diese nämlich verdeutlichen, dass unter von Schnecken besiedelten Flächen solche vorherrschen, denen eine *Klimaeignung für Dauergrünland* (> 40 %) oder *Futter- und Ackerbau* (knapp 40 %) eigen ist. Orte ohne Schneckenfunde hingegen erwiesen sich vorrangig als Repräsentanten der Kategorien *Klimaeignung für Futterbau* (> 40 %) oder *Futter- und Ackerbau* (35 %). Die Dominanz der *Klimaeignung für Dauergrünland* als unterscheidendes Kriterium zwischen Fundorten und schneckenlosen Flächen ist offenkundig.

Man darf vermuten, dass die Kategorie *Dauergrünland* unter anderem stärkere Niederschläge toleriert als die Kategorie *Ackerbau und Spezialkulturen begünstigt*. Weitere Interpretationen sollen auf Grund der Instabilität der Schätzung an dieser Stelle nicht versucht werden. Fraglich bleibt, ob die Verwendung der Kovariable *Klimaeignung*, selbst bei ausreichender Besetzung aller Kategorien und Umstrukturierung unter Vermeidung sich überschneidender

Kategorien, einen Mehrgewinn an Information bringen kann, insbesondere wenn direkte Klimavariablen wie Temperatur- und Niederschlagswerte zur Verfügung stehen. Mangelnde Kenntnis der genauen Klimabedingungen, auf denen die Definitionen der verschiedenen Klimaeignungskategorien basieren, erschweren zudem eine anschließende Interpretation auch bei korrekter Schätzung der Einflüsse durch das Modell.

7.1.8. Die *Wasserdurchlässigkeit* des Bodens

Die Ergebnisse unserer Regressionsanalyse stimmen mit der Annahme, wasserundurchlässige Bodenarten hätten einen günstigen Effekt auf das Vorkommen der Zwergschlamm Schnecke, überein. Bezogen auf die Referenzkategorie *schwach gehemmte Wasserdurchlässigkeit* erkannte das *grplasso*-Modell einen geringen positiven Einfluss *gehemmter Durchlässigkeit* (Kategorie 2) sowie einen deutlich negativen Effekt von *normaler bis übermäßiger Wasserdurchlässigkeit* (Kategorie 4). Dies stärkt die Überlegung, dass mit zunehmender Undurchlässigkeit des Bodens für Wasser die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten geeigneter Zwischenwirthabitate steigt. Betrachtet man den Layer *Wasserdurchlässigkeit* der digitalen Bodeneignungskarte, fällt die geringe Häufigkeit von Böden mit *stark gehemmter Wasserdurchlässigkeit* in der Schweiz auf. Innerhalb unseres Datensatzes befand sich kein Ort, der Boden *stark gehemmter Durchlässigkeit* aufgewiesen hätte. Böden der Kategorie 2 (*gehemmte Wasserdurchlässigkeit*) stellen damit in unseren Untersuchungen die am wenigsten durchlässigen Böden mit einem nachweislich positiven Einfluss auf das Schnecken vorkommen dar. Die gemessene Wasserdurchlässigkeit bezieht sich im Fall unserer Daten auf Eigenschaften der oberen 50 cm des Bodens. Daher ist anzunehmen, dass die Vorzüge einer gehemmten Durchlässigkeit auf dichten Deckschichten beruhen und folglich mit einer geringeren Grundwasserneubildung einhergehen, was mit obigen Ausführungen zur Kovariablen *Grundwasservorkommen* harmoniert.

7.1.9. Die *Gründigkeit* des Bodens

Die *Gründigkeit* des Bodens wurde in beiden Modellen als Kovariable ausgewählt. Unter den untersuchten Orten traten ausschließlich solche mit *mittlerer* und *tiefer Gründigkeit* auf. Gemessen an der Referenzkategorie *mittlere Gründigkeit* zeichnet sich *tiefe Gründigkeit* durch einen schwach negativen

Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, Zwergschlammschnecken anzutreffen, aus. Dieser Befund lässt sich mit den Ergebnissen für die Kovariablen *Wasserdurchlässigkeit* und *Grundwasservorkommen* gut vereinbaren. Mit der Dichte oberer Horizonte sinkt die durchwurzelbare Bodentiefe und damit die Gründigkeit als ihr Maß (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2015a). Die von *Galba truncatula* offensichtlich favorisierten Bedingungen hinsichtlich Bodenart und Wasserdurchlässigkeit implizieren automatisch das Vorliegen einer geringen Gründigkeit.

7.2. Selektierte Klimavariablen

Eine Vielzahl temperaturabhängiger Kovariablen wurde in beiden Modellen ausgewählt und mit relevanten Einflüssen auf das Vorkommen von Zwergschlammschnecken belegt. Ihre Effekte wähen dabei vom dritten Jahr vor der Schneckensuche bis zum Zeitpunkt der Felduntersuchung fort. Dies bestätigt die Sinnhaftigkeit des Vorgehens von MCCANN et al. (2010b), die Ergebnisse serologischer Untersuchungen auf Fasciolose mit bis zu fünf Jahren zurückliegenden Klimadaten korrelierten und in diesen wichtige Prädiktoren für das Auftreten der Fasciolose erkannten. Gleichzeitig stellt es die Vollständigkeit der Betrachtungsweise von Modellen, die ausschließlich Daten aus dem Jahr der serologischen Testung verwenden (SCHWEIKLE, 1997), infrage.

Wie bereits diskutiert, befand keines unserer beiden Modelle niederschlagsabhängige Variablen als relevante Einflussgrößen. Alle durch die Analysen ausgewählten temperaturabhängigen Kovariablen mit Schätzern $|\beta| \geq 0,1$ (Tabelle 11) bezeichnen negative Prädiktoren und damit Faktoren, die das Vorkommen von *Galba truncatula* limitieren. Sie stehen für die Überschreitung von Extremwerten der oberen und unteren Temperaturskala.

Tabelle 11: In beiden Regressionsansätzen ausgewählte Klimavariablen mit $|\beta| \geq 0,1$

Kovariable	grplasso	glmmLasso
Temp200max>30-1	-	-0,1142
Temp5max<0-1	-0,2543	-
Temp5mean>20-1	-0,4010	-0,2997
Temp5min>15-1	-0,8943	-
Temp5mean<0-3	-0,9162	-
Temp5mean<0-2	-1,5847	-0,4727
Hitzetage-1	-1,6773	-0,3951

Die Definition von Hitzetagen (Tage mit einem Temperaturmaximum ≥ 30 °C) stützt sich auf Temperaturmessungen die 2 m über dem Boden durchgeführt werden, ebenso die Kovariable *Temp200max>30-1*, welche ebenfalls eine Überschreitung von 30 °C durch das Maximum der 2 m über dem Boden gemessenen Lufttemperatur anzeigt. Beide Einflussgrößen, *Hitzetage-1* und *Temp200max>30-1*, beziehen sich auf das Jahr vor der Schneckensuche. Auch die Variablen *Temp5mean>20-1* und *Temp5min>15-1* beschreiben besonders warme Tage im vorausgegangen Jahr. Bei einer mittleren Temperatur von mehr als 20 °C und einer Minimaltemperatur von über 15 °C im Laufe eines Tages (einschließlich der Nachtstunden), kann tagsüber mit dem Erreichen hoher Temperaturen von über 25 °C und deren schädlicher Wirkung auf *Galba truncatula* (KENDALL, 1953), gerechnet werden. Im Gegensatz zu den Einflussgrößen *Hitzetage-1* und *Temp200max>30-1* basieren die übrigen ausgewählten Prädiktoren ausnahmslos auf einer Temperatur, die per definitionem 5 cm über dem Boden erhoben wird. Die gleichzeitige Auswahl von Kovariablen, die heiße Tage auf Grundlage der Temperaturen sowohl 5 cm als auch 2 m über dem Boden identifizieren, verweist auf eine Korrelation zwischen dem Makroklima und mikroklimatischen Verhältnissen auf Höhe der Zwergschlammschnecken. Dennoch kann der Anschauung von CHARLIER et al. (2014a), die Lufttemperatur 2 m über dem Boden sei aussagekräftig genug, um einen möglichen Zusammenhang zur Schneckenhäufigkeit zu erklären und Temperaturen hätten in gemäßigten Klimazonen ab einer Überschreitung von 10 °C ohnehin keinen Einfluss auf *Galba truncatula*, angesichts unserer Ergebnisse nicht zugestimmt werden. Vielmehr erkannten beide unserer Modelle verschiedene temperaturabhängige Variablen als einflussreich, in der Mehrheit dabei solche, die auf 5 cm über dem Boden gemessenen Temperaturen beruhen. Dies legt nahe, dass entsprechend den Ergebnissen von SMITH et al. (1980) makroklimatische Parameter die klimatischen Bedingungen in den Zwischenwirthabitaten nur unzureichend widerspiegeln. Insbesondere wenn es um kalte, schneckenwidrige Verhältnisse geht, setzten sich bodennah gemessene Temperaturen als aussagekräftigste Prädiktoren durch.

Ferner fällt auf, dass eine Häufung von heißen Tagen nur auf das Schneckenvorkommen im darauffolgenden Jahr einen stark negativen, von beiden Modellen berücksichtigten Einfluss zu haben scheint. Die in Anlehnung an Literaturangaben (KENDALL, 1953; ARMOUR, 1975) entwickelten Cut-Off-Werte waren geeignet, diesen Effekt nachzuweisen.

Extrem kalte Bedingungen hingegen wirken sich gemäß unseren Ergebnissen selbst dann auf die Wahrscheinlichkeit, Schnecken vorzufinden aus, wenn sie im dritten Jahr vor der Schneckensuche vorherrschen. Der stärkste negative Einfluss besteht für eine größere Summe von Tagen, an denen die bodennah gemessenen Temperaturen im Mittel weniger als 0 °C betragen und zwar im zweiten Jahr vor der Schneckensuche ($Temp5mean < 0-2$). Dieser Einfluss gilt in beiden Modellen als bedeutend. Der zweitstärkste Effekt wird im *grplasso* für ebensolche Bedingungen im dritten Jahr vor der Feldbegehung ($Temp5mean < 0-3$) demonstriert. Der drittstärkste Effekt erst ist einer häufigen Unterschreitung von 0 °C durch das Maximum der Tagestemperaturen im Jahr vor der Suche ($Temp5max < 0-1$) eigen. Insgesamt erwies sich der zugrundegelegte Cut-Off-Wert von 0 °C auch hier als hilfreich, um schneckenschädigende Effekte niedriger Temperaturen aufzudecken.

Die hohe Widerstandsfähigkeit von Zwergschlammschnecken gegenüber Austrocknung und ihre Fähigkeit zur Übersommerung werden von verschiedenen Autoren beschrieben (MEHL, 1932; JOKINEN, 1978; GOUMGHAR et al., 2001). Hinzu kommt, dass die Schweiz, wie weiter oben diskutiert, in der Regel ganzjährig über ausreichend starke Niederschläge verfügt (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014a). Dennoch zeichnet sich in beiden Modellen ein stark negativer Effekt hoher Temperaturen ab, der sich auf das Ergebnis der Schneckensuche im darauffolgenden Jahr beschränkt. Heiße Temperaturen könnten einerseits zum Absterben von Schnecken führen, wobei die Widerstandsfähigkeit von Jungschnecken größer als die vorjähriger Schnecken zu sein scheint (MEHL, 1932; GOUMGHAR et al., 2001). Andererseits ist vor dem Hintergrund ausreichender Niederschläge und der Betrachtung von (weitgehend witterungsunabhängigen) Primärhabitaten davon auszugehen, dass die primäre Schadwirkung durch die Austrocknung des deutlich anfälligeren Laiches (MEHL, 1932) und eine Hemmung der Fortpflanzung beziehungsweise Bildung weiterer

Jungtierfolgen (F2 und mehr) besteht. Dezimierte Schneckenzahlen sind die Folge, sodass die im darauffolgenden Frühjahr reproduktionsfähige Elterngeneration weniger Individuen umfasst und sich, selbst bei günstigen Fortpflanzungsbedingungen, Verluste aus dem Vorjahr noch bemerkbar machen dürften. Sie sollten jedoch spätestens in der nächsten Saison ausgeglichen sein, zumal Altschnecken der Generation, aus der die Mehrheit etwaig abgestorbener Tiere gestammt haben dürfte, spätestens zu diesem Zeitpunkt ohnehin altersbedingt aus dem Zyklus ausgeschieden wäre. Dies würde erklären, warum keines der beiden Modelle relevante negative Einflüsse heißer Tage auf das Auftreten von Schnecken im zweiten oder dritten Jahr nach der Hitze fand.

Davon abweichende Zusammenhänge wurden bereits für kalte Temperaturen dargelegt. Sie scheinen über einen nachhaltigeren Effekt auf das Schneckenvorkommen zu verfügen, der sich über einen Zeitraum von bis zu drei Jahren erstreckt. Die Kälteempfindlichkeit der Zwergschlammschnecken hängt in hohem Maße von ihrem Aufenthaltsort ab. Während ungeschützt oder in flachem Wasser liegende Schnecken von Frost stark gefährdet sind, tolerieren windgeschützt zwischen Erdkrümeln verkrochene Exemplare mehrmonatige Kälteperioden mit Spitzen von -8 °C (MEHL, 1932). Im Fall der ausgewählten Kovariablen muss davon ausgegangen werden, dass Tagesdurchschnitts- und Maximaltemperaturen von weniger als 0 °C auch deutlich niedrigere Temperaturen als die genannten -8 °C implizieren können, weshalb schwerwiegendere Auswirkungen auf die Schneckenpopulation zu erwarten sind. HODASIs (1976) Befunden zufolge führen anhaltende Temperaturen von 5 °C zur Inaktivität der Tiere und Hemmung der Reproduktion, nicht aber zum Absterben der Schnecken. Vielmehr würden Jungschnecken von derartigen Kälteperioden profitieren, indem sie im Anschluss daran bei Wiedererlangung günstiger Umgebungstemperaturen mit verstärktem Größenwachstum und effizienterer Fortpflanzung reagierten (HODASI, 1976). Für die von uns berücksichtigten Extremtemperaturen, die 5 °C deutlich unterschreiten, ist ein vergleichbarer Effekt nicht zu erwarten. Als wahrscheinlicher kann eine letale Wirkung derart niedriger Temperaturen, nicht nur auf die Generation von Altschnecken, sondern auch auf die der Jungschnecken, die im Allgemeinen höhere Widerstandsfähigkeiten aufzuweisen scheinen, angenommen werden. Darin ist wohl einer der Gründe für den langanhaltenden Einfluss einer Häufung

besonders kalter Tage zu suchen. Im Gegensatz zu heißen Temperaturen muss hier nicht vorrangig mit einer negativen Beeinflussung der Reproduktion, sondern mit dem Absterben von Altschnecken und jüngeren Individuen gerechnet werden. Wenn die kalten Temperaturen bis ins Frühjahr andauern, ist zudem von einer Verzögerung der Fortpflanzung überlebender Tiere auszugehen. Dieser kleine Pool verbliebener Individuen bleibt zusätzlich der Gefahr ausgesetzt, als Zwischenwirt für verschiedene Parasiten aus der Gattung der *Digenea* zu dienen, wodurch die Schnecken eine weitere Schädigung erfahren können. Mit dem Schrumpfen der Population beginnt die Selbstbefruchtung als Fortpflanzungsvariante noch mehr an Bedeutung zu gewinnen. Sie kann jedoch mit den Nachteilen einer Inzuchtdepression einhergehen und den Pool der Schnecken weiter schwächen. Eine Inzuchtdepression vermag letztlich aber durch die fortschreitend starke Dezimierung einer Population und die Selektion auf Fitness reduziert oder eliminiert werden. Man spricht vom sogenannten Purgung (CRNOKRAK und BARRETT, 2002; TROUVE et al., 2005). An diesen Ausführungen wird deutlich, welche populationsgenetischen Prozesse in schwach besiedelten Habitaten von *Galba truncatula* ohne Kontakt zu Individuen anderer Habitate per se auftreten und durch ein plötzliches Absterben zahlreicher Individuen, beispielsweise auf Grund meteorologischer Einflüsse, gefördert werden können. Hierin mag ebenfalls eine Ursache für den fortwährenden Effekt kalter Extremtemperaturen liegen. Im ersten Jahr nach ihrem Auftreten kann ihr negativer Einfluss klar einer unter Umständen sehr starken Dezimierung der Individuenzahl mit nachfolgend absolut geringerer Nachkommenschaft zugeschrieben werden. Der im zweiten Jahr danach am massivsten ausgeprägte negative Effekt könnte aus der Kombination noch nicht kompensierter Verluste und negativer Folgen zunehmender Inzucht resultieren. Im dritten Jahr kann von einer allmählichen Überwindung der Problematik ausgegangen werden, eine Kompensation wird jedoch noch nicht erzielt. Es besteht ein deutlich negativer Effekt fort.

8. Vergleich der beiden Regressionsmodelle

8.1. Gemeinsamkeiten der Modelle

Alle im *glmmLasso* enthaltenen Regressionsparameter mit einem Einfluss von $|\beta| > 0,1$ (Tabelle 9) sind auch Bestandteil des *grlasso*-Modells. Die einzige Ausnahme bildet die Kovariable *Temp200max>30-1*. Sie wurde nur vom *glmmLasso*-Modell ausgewählt und bezeichnet Tage mit einer Überschreitung der Temperaturgrenze 30 °C durch das 2 m über dem Boden gemessene Tagesmaximum im Jahr vor der Schneckensuche. Dadurch ist sie nahezu deckungsgleich mit dem Prädiktor *Hitzetage-1*, sprich Tagen im vorausgegangen Jahr, deren Maximaltemperatur gleich 30 °C oder höher war. Dieser tritt wiederum in beiden Modellen als wichtige Einflussgröße auf.

Insgesamt sind dem *grlasso*- und dem *glmmLasso*-Modell damit acht Kovariablen gemeinsam. Unter Berücksichtigung der annähernden Deckungsgleichheit der Größen *Hitzetage-1* und *Temp200max>30-1* wächst ihre Zahl auf Neun an. Die Auswahl jener Kovariablen durch beide Modelle spricht für ihren erheblichen Einfluss auf das Vorkommen von Zwergschlammschnecken an einem Ort. Es handelt sich hierbei in erster Linie um Einflussgrößen, welche geeignete Habitate wie Riet, Feuchtflächen, Gewässer und Hangwasseraustritte definieren, solche, die das Auftreten von Bäumen und die Gründigkeit am untersuchten Ort beschreiben sowie um temperaturabhängige Kovariablen. Die erstgenannten Wasserquellen üben dabei die stärksten Effekte aus.

Diesen acht respektive neun Einflussgrößen sollte bei der Erstellung künftiger Transmissionsmodelle zur Fasciolose besondere Beachtung geschenkt werden.

8.2. Vor- und Nachteile des jeweiligen Modells

Die Übereinstimmung der beiden Modelle in einer Vielzahl wesentlicher Kovariablen und ihre weitgehend mit Literaturangaben zu vereinbarenden, für Folgemodelle relevanten Ergebnisse, sprechen für eine Eignung beider Modelle, wenn es darum geht, das Vorkommen von *Galba truncatula* an einem Standort vorherzusagen.

Für einen solchen Standort müssen bei Verwendung des *grlasso*-Modells Daten zu 19 Kovariablen erhoben werden. Mit 13 Kovariablen ist das *glmmLasso*-Modell sparsamer. Zugunsten standortspezifischer Effekte, die als sogenannte

random effects nur über ein *glmmLasso* berücksichtigt werden können, verzichtet es auf weitere potenziell erklärende Kovariablen, deren Bedeutung es geringer einschätzt als die der random effects. Mit einer Standardabweichung von $\widehat{\sigma}_b = 0,6725$ sind diese feldspezifischen Effekte in unserem *glmmLasso*-Modell beträchtlich. Sie beinhalten eine unbeobachtbare Heterogenität, spezielle Eigenheiten der jeweiligen Orte, die allerdings nicht unmittelbar messbar sind und damit häufig unbeachtet bleiben. Ungeachtet des Vorteils, dass diesen Effekten über das *glmmLasso*-Modell die nötige Aufmerksamkeit geschenkt wird, stellt die Anwendung des Modells auf neue Daten den Untersucher vor das Problem, dass die random effects für alle nun betrachteten Standorte noch nicht bekannt sind. Man müsste von einem Durchschnittsfeld mit dem Erwartungswert Null für random effects ausgehen, obwohl klar ist, dass diese tatsächlich einen erheblichen Anteil am linearen Prädiktor η_i haben und somit auch einen großen Erklärungswert bezüglich der Zielvariablen y (Schnecken ja/ nein) besitzen.

Die Stärke des *glmmLasso*-Modelles liegt ganz klar in der Restriktion auf weniger Kovariablen, weshalb weniger Daten erhoben werden müssen, um eine Vorhersage treffen zu können, und ein zusätzlicher Schutz vor Overfitting besteht. Beim Overfitting versucht das Modell die Vorhersagegenauigkeit zu optimieren, indem es immer mehr erklärende Kovariablen miteinbezieht, hinter denen sich mitunter zufällige Zusammenhänge ohne tatsächlich relevanten Einfluss verbergen. Auf diese Weise vermag es, die Daten der zugrundegelegten Stichprobe perfekt vorherzusagen. Seine Übertragbarkeit auf neue, unbekannte Daten verschlechtert sich damit jedoch. Das *grplasso*-Modell ist, da es den Outcome (Schnecken ja/ nein) nur über die zur Verfügung stehenden Daten zu Kovariablen erklären und keine random effects miteinbeziehen kann, wesentlich anfälliger für ein Overfitting.

Ein optimales Modell enthielte nach Ansicht der Verfasser die acht respektive neun, beiden Modellen gemeinsamen Kovariablen. Darüber hinaus sollte es in der Lage sein, standortspezifische Effekte, sogenannte random effects, zu berücksichtigen. Demnach müsste der Ansatz eines *glmmLasso*-Modells Verwendung finden. Die Berücksichtigung weiterer Kovariablen wie der *Wasserdurchlässigkeit*, des *Grundwasservorkommens* und der *Bodeneignung* wäre unter Umständen als sinnvoll zu erachten. Die Analyse eines potenziellen Einflusses von lithologischen Eigenschaften und der Höhenlage müsste bei

Verfügbarkeit geeigneter Datenquellen wiederholt werden, um etwaige Effekte besser abschätzen zu können.

9. Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Bedeutung potenzieller Einflussgrößen auf das Vorkommen der Zwergschlammschnecke, *Galba truncatula*, zu analysieren. Nach Erhebung von Daten zu insgesamt 70 Kovariablen wurden Regressionsanalysen nach zwei verschiedenen Methoden anhand von 242 in den Jahren 1999-2000, 2004 und 2010 untersuchten Feldkoordinaten durchgeführt.

Hieraus ergaben sich zwei Modelle, ein *grplasso*- sowie ein *glmmLasso*-Modell, die in neun von 19 respektive 13 Kovariablen deckungsgleich waren. Hinsichtlich des Auftretens von Zwergschlammschnecken schätzten sie Variablen wie das Vorhandensein von Riet, Feuchtflächen, Gewässern und Hangwasseraustritten als besonders einflussreich ein. Als weitere Größe von Bedeutung erwies sich die Anwesenheit von Bäumen, ebenso die Gründigkeit des Bodens. Besonders starke Effekte auf die Schneckenpopulation wurden ferner der Häufigkeit, mit der Über- und Unterschreitungen von Extremtemperaturen auftraten, zugesprochen. Niederschlagsabhängige Größen schienen innerhalb des untersuchten Gebietes im Nordosten der Schweiz keinen relevanten Effekt hinsichtlich des Vorkommens von *Galba truncatula* zu besitzen.

Probleme in der Modellierung können sich ergeben, wenn einzelne Kategorien kategorialer Variablen unzureichend besetzt sind oder Überschneidungen zwischen den Merkmalen verschiedener Kategorien auftreten.

Beide Modelle erkannten Zusammenhänge, die mit Ergebnissen der einschlägigen Literatur übereinstimmten. Diskrepanzen ergaben sich in der Regel als Folge der Datenstruktur und daraus resultierenden Schwierigkeiten im Modellfitting.

Neue Erkenntnisse entstanden insbesondere aus der Bewertung von Baum- bzw. Waldbestand und Grundwasservorkommen, der Wasserdurchlässigkeit von Böden, der Bodeneignung für Kulturland und der Überprüfung des Einflusses von Klimavariablen.

Ferner konnte die Bedeutung mikroklimatischer Verhältnisse für das Vorkommen der Zwergschlammschnecke bestätigt werden.

Hieraus ergeben sich wertvolle Empfehlungen für die Methodik zukünftiger Transmissionsmodelle zur Fasciolose.

Um datenstrukturbedingte Schwierigkeiten in der Regressionsanalyse zu vermeiden sei für zukünftige Analysen ferner folgendes Vorgehen angeraten: Zufällig ausgewählte, ein- und dieselben Feldkoordinaten sollten standardisiert in aufeinanderfolgenden Jahren, möglichst innerhalb desselben Monats auf *Galba truncatula* untersucht werden. Dabei empfiehlt es sich, auch bislang nicht betrachtete Gebiete der Schweiz miteinzubeziehen, um den potenziellen Einfluss dort vorherrschender Klimaverhältnisse und größerer Höhenlagen einschätzen zu können. Eine Evaluierung der Suchmethode im Vorversuch ermöglicht die Einschätzung ihrer inter und intra observer reliability. Durch eine Ausdehnung der Untersuchungen auf Sekundär- und Tertiärhabitats könnten zusätzliche interessante Erkenntnisse hinsichtlich der Bedeutung klimaassoziierter Variablen entstehen.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Grundlage für eine Beurteilung des Transmissionsrisikos von *Fasciola hepatica*: Logistische Regressionsmodelle zur Vorhersage des Auftretens von *Galba truncatula* in der Schweiz

Die Fasciolose, ausgelöst durch eine Infestation mit dem Großen Leberegel, *Fasciola hepatica*, gilt weltweit als Ursache erheblicher wirtschaftlicher Verluste durch die meist chronisch verlaufende Erkrankung bei Rindern. Um Regionen, in denen ein erhöhtes Risiko für die Übertragung von *Fasciola hepatica* besteht, frühzeitig erkennen zu können, bedarf es eines geeigneten räumlichen Modelles, welches alle Schritte der Transmission berücksichtigt.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war es, ein geeignetes Regressionsmodell zu entwickeln, das zur Vorhersage des Vorkommens von *Galba truncatula*, der Zwergschlamm Schnecke, befähigen sollte. Diese ist in vielen Ländern, so auch in der Schweiz, Zwischenwirt für den Großen Leberegel.

Insgesamt wurde der potenzielle Einfluss von 70 Kovariablen auf die Wahrscheinlichkeit π_i , *Galba truncatula* an einem Ort vorzufinden, untersucht. Als Datenbasis dienten dabei $n = 242$ Geländepunkte, die in den Jahren 1999-2000, 2004 und 2010 von G. Knubben-Schweizer sowie R. Baggenstos auf das Vorhandensein von Zwergschlamm Schnecken überprüft worden waren.

Der binäre Response (Schnecken ja/ nein) erforderte die Verwendung Generalisierter Linearer (Gemischter) Regressionsmodelle (GL(M)Ms). Im Speziellen kamen zwei Regressionsverfahren in Form binärer Logitmodelle zur Anwendung: Das *grplasso*-Verfahren und ein *glmmLasso*-Modell, die beide als gleichnamige Pakete im Statistikprogramm R implementiert sind. Das Ausmaß der Penalisierung¹⁵ einzelner Koeffizienten und die Sparsamkeit der Modelle wurde durch 10-fache Kreuzvalidierung beziehungsweise das sogenannte Bayessche Informationskriterium gesteuert.

Es ergaben sich zwei Modelle, die eine Vorhersage des Auftretens von *Galba truncatula* ermöglichen sollten.

¹⁵ Penalisierung meint die „Schrumpfung“ der Absolutbeträge von Schätzparametern mit dem Ziel der Modellregularisierung und Variablenselektion

Im *grplasso-Modell* wurden 19 Kovariablen mit unterschiedlich starken Einflüssen auf das Schneckenvorkommen ausgewählt, während via *glmmLasso-Modell* nur 13 Kovariablen als relevant erkannt wurden, seine Verwendung im Gegenzug aber die Berücksichtigung standortspezifischer Effekte, sogenannter random effects, erlaubte. Beide Modelle stimmten in neun Kovariablen überein, denen damit die ausgeprägtesten Effekte auf die Schneckenpopulation beigemessen werden müssen. Riete beziehungsweise Feuchtflächen, Hangwasseraustritte, Gewässer im Umkreis von 100 Metern und Baumbestand stellten ebenso positive Prädiktoren dar wie eine mittlere im Vergleich zu tiefer Gründigkeit des Bodens. Negative Prädiktoren waren insbesondere gehäufte Überschreitungen hoher Temperaturen von 30 °C und Unterschreitungen von 0 °C. Bodennah gemessene Temperaturen wurden bevorzugt selektiert und schienen die entscheidenden Temperaturverhältnisse besser widerzuspiegeln als makroklimatische Parameter. Niederschlagsabhängigen Kovariablen wurden weder im *grplasso-* noch im *glmmLasso-Modell* relevante Einflüsse zugebilligt. Sie dürften auf Grund ausreichend starker Niederschläge in den betrachteten Klimaregionen der nordöstlichen Schweiz keinen limitierenden Faktor für das Auftreten von *Galba truncatula* darstellen.

Jedes der beiden Regressionsverfahren kann als geeignete Methode zur Vorhersage des Vorkommens von *Galba truncatula* dienen, wobei die Schätzungen des *glmmLasso-Modelles* stabiler gegenüber datenstrukturbedingten Einflüssen zu sein scheinen.

Eine Validierung der Schätzgenauigkeit beider Modelle anhand neuer, unbekannter Stichproben steht aus. Doch lassen sich aus der vorliegenden Arbeit Empfehlungen für die Methodik zukünftiger Transmissionsmodelle zur Fasciolose in der Schweiz ableiten.

VII. SUMMARY

Towards assessing site-specific risk of Fasciolosis transmission: Logistic regression models predicting the distribution of *Galba truncatula* in Switzerland

Fasciolosis caused by *Fasciola hepatica*, the Common Liver Fluke, is a major cause for great economic losses due to chronic infestation of cattle all over the world. Spatial transmission models are required to ensure an early recognition of endemic areas where transmission of *Fasciola hepatica* is likely to occur.

The objective of our research was to develop a regression model, which should be able to predict the distribution of *Galba truncatula*, the most important intermediate host of *Fasciola hepatica*, in Switzerland.

70 variables were analysed to investigate their potential influence on the likelihood π_i of finding *Galba truncatula* in a place. Data used for the analysis were taken from earlier studies (SCHWEIZER et al., 2007; BAGGENSTOS et al., 2016) performed during the summer seasons of the years 1999, 2000, 2004 and 2010. Within those studies $n = 242$ geographic coordinates had been searched for *Galba truncatula*.

For modeling our binary response (snails yes/ no) the application of Generalized Linear Mixed Models (GLMMs), in particular binary logit models, proved to be necessary.

Regression analysis was performed using two different approaches: the *grplasso* and the *glmmLasso* method, which are both implemented in R packages. The selection of penalty¹⁶ parameters was based on 10-fold cross-validation and Bayesian information Criterion, respectively.

Both resulting models should be able to predict snail occurrence.

The *grplasso* model considers 19 variables as potential predictors whereas the *glmmLasso* model is limited to 13 variables, including random effects instead.

¹⁶ *penalization* implies the shrinkage of regression coefficients aiming at model regularization and variable selection

The two models have even nine variables in common, which are therefore considered to be the most potential predictors for snail occurrence. Swamps, slope water emerging at the ground surface, water streams and stagnant waters within a radius of 100 metres turned out to be powerful positive predictors as well as trees next to the examined site. Furthermore, positive effects are attributed to medium root penetration depth compared to a deep one.

In both models, frequent temperatures exceeding 30 °C and temperatures below 0 °C exert a negative impact. Temperatures near ground-level, measured at 5 cm above the grass, were preferentially selected by regression analysis giving us the impression of being more representative than macroclimatic parameters.

Aside from that, our analysis revealed that precipitation values and dry periods are obviously no factors affecting the distribution of *Galba truncatula* in the northeast of Switzerland which may be due to sufficient precipitation all over the year.

Both models may perform well in predicting the distribution of *Galba truncatula*. However, the *glmLasso* model appears to be more stable against critical influences which could derive from data structure. Validation of the models has not been conducted so far.

All in all, our investigations supply useful methods for the development of future spatial transmission models, mapping the risk of Fasciolosis in Switzerland.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

Aitken MM, Jones PW, Hall GA, Hughes DL, Collis KA. Effects of experimental *Salmonella dublin* infection in cattle given *Fasciola hepatica* thirteen weeks previously. *Journal of Comparative Pathology* 1978; 88: 75-84.

Alldinger I. Statistische Analysen. In: Chirurgische Forschung. Krukemeyer MG, Spiegel H-U, eds. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG 2005: 517-8.

Anderson RM, May RM (1991) *Infectious diseases of humans: dynamics and control*, London. 757

Antao T, Hastings IM. ogaraK: a population genetics simulator for malaria. *Bioinformatics* 2011; 27: 1335-6.

Aranda DF, Trejos DY, Valverde JC, Villanueva RJ. A mathematical model for Babesiosis disease in bovine and tick populations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 2012; 35: 249-56.

Armour J. The epidemiology and control of bovine fascioliasis. *The Veterinary record* 1975; 96: 198-201.

Baggenstos R. Eine interaktive Karte zur Ermittlung der potentiellen Verbreitung von *Galba truncatula* und der freilebenden Larvenstadien von *Fasciola hepatica* in der Schweiz: Validierung im Feld. Diss. med. vet. 2012. Universität Zürich.

Baggenstos R, Dahinden T, Torgerson PR, Bär H, Rapsch C, Knubben-Schweizer G. Validation of an interactive map assessing the potential spread of *Galba truncatula* as intermediate host of *Fasciola hepatica* in Switzerland. *Geospat Health*, in press 2016;

Barro AS, Oyana TJ. Predictive and epidemiologic modeling of the spatial risk of human onchocerciasis using biophysical factors: A case study of Ghana and Burundi. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology* 2012; 3: 273-85.

Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bodenbestandteile. Boden. Augsburg, Hof:
Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015a; 2015:
<http://www.lfu.bayern.de/boden/erdausstellung/bodenbestandteile/index.htm>.
13.09.2015.

Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bodenentstehung. Boden. Augsburg, Hof:
Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015b; 2015:
<http://www.lfu.bayern.de/boden/erdausstellung/bodenentstehung/index.htm>.
13.09.2015.

Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bodenaufbau. Boden. Augsburg, Hof:
Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015c; 2015:
<http://www.lfu.bayern.de/boden/erdausstellung/bodenaufbau/index.htm>.
13.09.2015.

Bennema SC, Ducheyne E, Vercruyse J, Claerebout E, Hendrickx G, Charlier J.
Relative importance of management, meteorological and environmental factors in
the spatial distribution of *Fasciola hepatica* in dairy cattle in a temperate climate
zone. *Int J Parasitol* 2011; 41: 225-33.

Berg CO. Sciomyzid larvae (Diptera) that feed on snails. *The Journal of
parasitology* 1953: 630-6.

Berthoud G, R.P. L, Righetti A (2004) Nationales ökologisches Netzwerk REN.
Schlussbericht Eds Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 131

Black NM, Froyd G. The possible influence of liver fluke infestation on milk
quality. *The Veterinary record* 1972; 90: 71-2.

Blüthgen J, Weischet W. Die vertikale Temperaturverteilung. In: Allgemeine
Klimageographie, 3 edn. Blüthgen J, ed. New York, Berlin: de Gruyter 1980: 161-
2.

Boray JC. Fortschritte in der Bekämpfung der Fasciolose. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 1971; 113: 361-86.

Boray JC. Bekämpfung der Fasciolose und der Dicrocoeliose des Rindes. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 1972; 114: 639-51.

Bossaert K, Lonneux JF, Godeau JM, Peeters J, Losson B. Serological and biochemical follow-up in cattle naturally infected with *Fasciola hepatica*, and comparison with a climate model for predicting risks of fasciolosis. Vet Res 1999; 30: 615-28.

Brown P (2000) Basics of Evaporation and Evapotranspiration. Eds College of Agriculture and Life Sciences, The University of Arizona, Tucson, Arizona. 4

Bundesamt für Landestopografie (2006) Neue Koordinaten für die Schweiz. Der Bezugsrahmen LV95, 1 edn. Ed Bundesamt für Landestopografie Wabern. Bundesamt für Landestopografie, Eidgenössische Vermessungsdirektion Geodäsie, Wabern. 11

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2014) VECTOR25 Gewässernetz. In: geocat.ch - geographic catalogue, Wabern, Schweiz

Bundesamt für Landestopografie swisstopo. swissALTI3D. Wabern, Schweiz: 2015a; 2015:
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html>. 18.09.2015.

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2015b) Lithologisch-petrografische Karte der Schweiz – Lithologie-Hauptgruppen 1:500'000. In: geocat.ch - geographic catalogue, Wabern, Schweiz

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2015c) Lithologisch-petrografische Karte der Schweiz – Gesteinklassierung 1:500'000. In: geocat.ch - geographic catalogue, Wabern, Schweiz

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2015d) KML-Generierung. In: Interaktive Anwendungen: Rechendienste, Wabern, Bern

Bundesamt für Landestopografie swisstopo. geo.admin.ch: Das Geoportal des Bundes. Wabern, Schweiz: 2015e; 2015: 10.08.2015.

Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2015) map.geo.admin.ch. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern, Schweiz

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2015f) VECTOR200 Hydrography In: geocat.ch - geographic catalogue, Wabern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2013) Bodeneignungskarte für die Landwirtschaft. Eds Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Landwirtschaft, Bundesamt für Forstwesen, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014a) Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Kulturland. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014b) Hanglagen. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014c) Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft - Niederschläge. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014d) Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft - Übersicht. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014e) Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Nährstoffspeichervermögen. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014f) Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Vernässung In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014g) Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Gründigkeit. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014h) Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Wasserdurchlässigkeit. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2014i) Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Wasserspeichervermögen. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2015) Bewässerungsbedürftigkeit. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2009) Datenqualitätsinformation: Plausibilitäts- oder Mutationsinformationen. In: IDAweb - Hilfeindex, Zürich, Schweiz

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2011) Merkblatt: Google-Earth Dateien der MeteoSchweiz, Wabern, Schweiz. 1

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Klima der Schweiz. Zürich: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz 2014a; 01.12.2014:

<http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klima-der-schweiz.html>. 11.09.2015.

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Datenportal für Lehre und Forschung. Zürich, Schweiz: 2014b; 01.12.2014: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/service-und-publikationen/beratung-und-service/datenportal-fuer-lehre-und-forschung.html>. 19.09.2015.

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Automatisches Messnetz. Zürich, Schweiz: 2014c; 01.12.2014: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html>. 19.09.2015.

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2015) IDAweb 1.1.23, Zürich, Schweiz

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2015a) Gewässer der Übersichtskarte 1:2 Mio. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2015b) Nationales ökologisches Netzwerk REN, Lebensraum Wald. In: geocat.ch - geographic catalogue, Bern, Schweiz

Cederbaum J (2009) Der LASSO-Schätzer – Modellregularisierung und Selektion durch Verwendung des „Least absolute shrinkage and selection operators“ (LASSO). In: Modellwahl und Modelldiagnostik. Ed Institut für Statistik der Ludwig-Maximilians-Universität München, München

Charlier J, Duchateau L, Claerebout E, Williams D, Vercruyse J. Associations between anti-Fasciola hepatica antibody levels in bulk-tank milk samples and production parameters in dairy herds. *Prev Vet Med* 2007; 78: 57-66.

Charlier J, De Cat A, Forbes A, Vercruyse J. Measurement of antibodies to gastrointestinal nematodes and liver fluke in meat juice of beef cattle and associations with carcass parameters. *Vet Parasitol* 2009; 166: 235-40.

Charlier J, Bennema SC, Caron Y, Counotte M, Ducheyne E, Hendrickx G, Vercruysse J. Towards assessing fine-scale indicators for the spatial transmission risk of *Fasciola hepatica* in cattle. *Geospat Health* 2011; 5: 239-45.

Charlier J, Vercruysse J, Morgan E, van Dijk J, Williams DJ. Recent advances in the diagnosis, impact on production and prediction of *Fasciola hepatica* in cattle. *Parasitology* 2014a; 141: 326-35.

Charlier J, Soenen K, De Roeck E, Hantson W, Ducheyne E, Van Coillie F, De Wulf R, Hendrickx G, Vercruysse J. Longitudinal study on the temporal and micro-spatial distribution of *Galba truncatula* in four farms in Belgium as a base for small-scale risk mapping of *Fasciola hepatica*. *Parasites & Vectors* 2014b; 7: 528.

Christensen NØ, Nansen P, Frandsen F. The influence of some physico-chemical factors on the host-finding capacity of *Fasciola hepatica* miracidia. *J Helminthol* 1978; 52: 61-7.

Clements A, Pfeiffer D. Emerging viral zoonoses: frameworks for spatial and spatiotemporal risk assessment and resource planning. *The Veterinary Journal* 2009; 182: 21-30.

Cringoli G, Rinaldi L, Veneziano V, Capelli G, Malone JB. A cross-sectional coprological survey of liver flukes in cattle and sheep from an area of the southern Italian Apennines. *Vet Parasitol* 2002; 108: 137-43.

Crnokrak P, Barrett SC. Perspective: purging the genetic load: a review of the experimental evidence. *Evolution* 2002; 56: 2347-58.

Cruz-Mendoza I, Quiroz-Romero H, Correa D, Gomez-Espinoza G. Transmission dynamics of *Fasciola hepatica* in the Plateau Region of Mexico. Effect of weather and treatment of mammals under current farm management. *Vet Parasitol* 2011; 175: 73-9.

Cruz-Reyes A, Malek EA. Suitability of six lymnaeid snails for infection with *Fasciola hepatica*. *Vet Parasitol* 1987; 24: 203-10.

De Roeck E, Van Coillie F, De Wulf R, Soenen K, Charlier J, Vercruyse J, Hantson W, Ducheyne E, Hendrickx G. Fine-scale mapping of vector habitats using very high resolution satellite imagery: a liver fluke case-study. *Geospat Health* 2014; 8: S671-83.

Demuth C (2005) Wie entsteht Grundwasser? In: *Unterrichtsentwurf für die erste Lehrprobe zur zweiten Staatsprüfung im Unterrichtsfach Sachunterricht*

Dias AS, Araujo JV, Braga FR, Araujo JM, Puppim AC, Fernandes FM, Ramos RF, Bertenceli RM, da Silva RG, Perboni WR. Biological control of *Fasciola hepatica* eggs with the *Pochonia chlamydosporia* fungus after passing through the cattle gastrointestinal tract. *Parasitol Res* 2012; 110: 663-7.

Dias AS, Araujo JV, Braga FR, Puppim AC, Perboni WR. *Pochonia chlamydosporia* in the biological control of *Fasciola hepatica* in cattle in Southeastern Brazil. *Parasitol Res* 2013; 112: 2131-6.

Ducheyne E, Charlier J, Vercruyse J, Rinaldi L, Biggeri A, Demeler J, Brandt C, De Waal T, Selemetas N, Høglund J, Kaba J, Kowalczyk SJ, Hendrickx G. Modelling the spatial distribution of *Fasciola hepatica* in dairy cattle in Europe. *Geospat Health* 2015; 9: 261-70.

Ducommun D, Pfister K. Prevalence and distribution of *Dicrocoelium dendriticum* and *Fasciola hepatica* infections in cattle in Switzerland. *Parasitol Res* 1991; 77: 364-6.

Durr PA, Tait N, Lawson AB. Bayesian hierarchical modelling to enhance the epidemiological value of abattoir surveys for bovine fasciolosis. *Prev Vet Med* 2005; 71: 157-72.

Dutra LH, Molento MB, Naumann CRC, Biondo AW, Fortes FS, Savio D, Malone JB. Mapping risk of bovine fasciolosis in the south of Brazil using Geographic Information Systems. *Vet Parasitol* 2010; 169: 76-81.

Earn DD. A Light Introduction to Modelling Recurrent Epidemics. In: *Mathematical Epidemiology*. Brauer F, van den Driessche P, Wu J, eds.: Springer Berlin Heidelberg 2008: 3-17.

Eckert J, Sauerländer R, Wolff K. Häufigkeit und geographische Verbreitung von *Fasciola hepatica* in der Schweiz. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 1975; 117: 173-84.

Eckert J, Friedhoff KT, Zahner H, Deplazes P. *Fasciola hepatica* (Großer Leberegel) – Erreger der Fasciolose. In: *Lehrbuch der Parasitologie für die Tiermedizin* Stuttgart: Enke 2005: 135-45.

Eckert J, Friedhoff KT, Zahner H, Deplazes P. Helminthen. In: *Lehrbuch der Parasitologie für die Tiermedizin*, 2nd edn. Eckert J, Friedhoff KT, Zahner H, Deplazes P, eds. Stuttgart: Enke 2008: 147-369.

EFSUPS. Teaching soil - The ABC of Soil. Exploring the ground - Fostering Scientific Understanding in Primary Schools, 2007: http://www.teaching-soil.eu/files/The_ABC_of_Soil.pdf. 11.08.2015.

Enzyklopädie W-Df. Bodenart. 2015; 10.06.2015: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bodenart&oldid=142957575>. 12.09.2015.

Fahrmeir L, Kneib T, Lang S. Gemischte Modelle. In: *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Dette H, Härdle W, eds. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007: 253-90.

Fairweather I, Boray JC. Fasciolicides: Efficacy, Actions, Resistance and its Management. *The Veterinary Journal* 1999; 158: 81-112.

Fairweather I. Reducing the future threat from (liver) fluke: realistic prospect or quixotic fantasy? *Vet Parasitol* 2011; 180: 133-43.

French MD, Churcher TS, Gambhir M, Fenwick A, Webster JP, Kabatereine NB, Basanez MG. Observed reductions in *Schistosoma mansoni* transmission from large-scale administration of praziquantel in Uganda: a mathematical modelling study. *PLoS Negl Trop Dis* 2010; 4: e897.

Frömming E (1956) *Biologie der mitteleuropäischen Süßwasserschnecken*, 2nd edn. Duncker & Humblot, Berlin. 280

Fuhrer J, Jasper K. Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung Schweiz* 2009; 16: 396-401.

Fürst T, Keiser J, Utzinger J. Global burden of human food-borne trematodiasis: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Infectious Diseases* 2012; 12: 210-21.

Gentleman R, Ihaka R (2013) R, 3.0.1 edn. Statistics Department of the University of Auckland, Auckland, Neuseeland

GERICS, Climate Service Center Germany. Klimawissen: Trockenperiode. Hamburg: Helmholtz Zentrum Geesthacht 2012; 31.07.2012: http://www.climate-service-center.de/033620/index_0033620.html.de. 17.08.2015.

GERICS, Climate Service Center Germany. Klimawissen: Verdunstung. Hamburg: Helmholtz Zentrum Geesthacht 2015; 31.07.2012: http://www.climate-service-center.de/033633/index_0033633.html.de. 13.08.2015.

Gettinby G, Hope-Cawdery MJ, Grainger JNR. Forecasting the incidence of fascioliasis from climatic data. *International Journal of Biometeorology* 1974; 18: 319-23.

Google Inc. (2013) Google Earth, Mountain View, Santa Clara

Google Inc. Google Earth Hilfe - Frequently Asked Questions. Mountain View, Santa Clara: 2015; 2015: <https://support.google.com/earth/answer/187961?vid=1-635753324215265412-3725474318493743554>. 16.08.2015.

Goumghar M, Rondelaud D, Dreyfuss G, Benlemlih M. Influence of aestivation on the survival of *Galba truncatula* (Mollusca: Gasteropoda) populations according to altitude. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 2001; 37: 211-7.

Groll A, Tutz G. Variable selection for generalized linear mixed models by L1-penalized estimation. *Statistics and Computing* 2014; 24: 137-54.

Gyalistras D (2000) Trockenheit in der Schweiz: Trends im 20. Jahrhundert und Szenarien für die Zukunft. In: OcCC/ProClim-Workshop: Trockenheit in der Schweiz. Ed Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) FfCaGCP, Bern, Schweiz

Halimi M, Farajzadeh M, Delavari M, Arbabi M. Developing a climate-based risk map of fascioliasis outbreaks in Iran. *J Infect Public Health* 2015;

Hanna RE, Cromie L, Taylor SM, Couper A. The effect of a parenteral ivermectin/closantel injection on the growth and reproductive development of early immature *Fasciola hepatica* in cattle. *Vet Parasitol* 2006; 142: 78-90.

Hatzfeld von H. Ewiger Kalender. 1997-1998; 06.11.2002: <http://www.salesianer.de/util/kal4dnld.html>. 15.08.2015.

Hatzky W. Biology, Rearing, and Control of the Liver Fluke Snail (*Limnaea truncatula*) and Related Snails. Infection with Miracidia. Diss. med. vet. 1940. Hanover.

Hertzberg H, Ochs H, Ebeid M, Bauer C (2002) Merkblätter zur Parasitenbekämpfung: Rind, Schaf und Ziege. In: Antiparasitika, Impfstoffe und Hinweise zur planmäßigen Bekämpfung, 3rd edn. Institut für Parasitologie, Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen. 76

Hodasi J. The effects of low temperature on *Limnaea truncatula*. Zeitschrift für Parasitenkunde 1976; 48: 281-6.

Hofmeister H (1990) Lebensraum Wald, 3 edn. Parey, Hamburg, Berlin

Hope Cawdery M, Gettinby G, Grainger J. Mathematical models for predicting the prevalence of liver fluke disease and its control from biological and meteorological data. In: Weather and parasitic animal disease. Gibson T, ed. Genf: World Meteorological Organization 1978: 21–38.

Hopkins DR. Homing in on helminths. Am J Trop Med Hyg 1992; 46: 626-34.

Hoshen MB, Heinrich R, Stein WD, Ginsburg H. Mathematical modelling of the within-host dynamics of *Plasmodium falciparum*. Parasitology 2000; 121: 227-35.

Hourdin P, Vignoles P, Dreyfuss G, Rondelaud D. *Galba truncatula* (Gastropoda, Lymnaeidae): effects of daily waterlevel variations on the ecology and ethology of populations living upstream from a dam. Annales de Limnologie - International Journal of Limnology 2006; 42: 173-80.

Hutchinson GW, Macarthur E (2003) Validation of French Antibody ELISA for Liver Fluke. Final Report. Meat and Livestock Australia, North Sydney, New South Wales

Jokinen EH. The Aestivation Pattern of a Population of *Lymnaea elodes* (Say) (Gastropoda:Lymnaeidae). *American Midland Naturalist* 1978; 100: 43-53.

Kaplan RM. *Fasciola hepatica*: a review of the economic impact in cattle and considerations for control. *Vet Ther* 2001; 2: 40-50.

Kendall SB. The Life-History of *Limnaea truncatula* under Laboratory Conditions. *J Helminthol* 1953; 27: 17-28.

Kendall SB. Relationships between the species of *Fasciola* and their molluscan hosts. *Adv Parasitol* 1965; 3: 59-98.

Kendall SB. Relationships between the species of *Fasciola* and their molluscan hosts. *Adv Parasitol* 1970; 8: 251-8.

Kermack WO, McKendrick AG. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 1927; 115: 700-21.

Kleiman F, Pietrokovsky S, Prepelitchi L, Carbajo AE, Wisnivesky-Colli C. Dynamics of *Fasciola hepatica* transmission in the Andean Patagonian valleys, Argentina. *Vet Parasitol* 2007; 145: 274-86.

Klinkenberg D, Heesterbeek JA. A simple model for the within-host dynamics of a protozoan parasite. *Proc Biol Sci* 2005; 272: 593-600.

Knubben-Schweizer G, Scheuerle M, Pfister K. Die Bekämpfung des großen Leberegels beim Rind. *Tierärztliche Praxis Großtiere* 2011; 39: 179-85.

Kölle W (2010) *Wasseranalysen - richtig beurteilt*, 3rd edn. Wiley-VCH, Weinheim

Lassert U (1999) Natur um uns herum. Das Wasser. In: Kopiervorlagen zur Freiarbeit im Sachunterricht. Ed Auer Verlag, Donauwörth

Lessard P, L'Eplattenier R, Norval RA, Kundert K, Dolan TT, Croze H, Walker JB, Irvin AD, Perry BD. Geographical information systems for studying the epidemiology of cattle diseases caused by *Theileria parva*. *The Veterinary record* 1990; 126: 255-62.

Linthicum KJ, Bailey CL, Davies FG, Tucker CJ. Detection of Rift Valley fever viral activity in Kenya by satellite remote sensing imagery. *Science* 1987; 235: 1656-9.

Lopez-Diaz MC, Carro MC, Cadorniga C, Diez-Banos P, Mezo M. Puberty and serum concentrations of ovarian steroids during prepuberal period in Friesian heifers artificially infected with *Fasciola hepatica*. *Theriogenology* 1998; 50: 587-93.

Loyacano AF, Williams JC, Gurie J, DeRosa AA. Effect of gastrointestinal nematode and liver fluke infections on weight gain and reproductive performance of beef heifers. *Vet Parasitol* 2002; 107: 227-34.

Malone JB, Williams TE, Muller RA, Geaghan JP, Loyacano AF. Fascioliasis in cattle in Louisiana: development of a system to predict disease risk by climate, using the Thornthwaite water budget. *Am J Vet Res* 1987; 48: 1167-70.

Malone JB, Zukowski SH. Geographic models and control of cattle liver flukes in the Southern USA. *Parasitol Today* 1992; 8: 266-70.

Malone JB, Fehler DP, Loyacano AF, Zukowski SH. Use of LANDSAT MSS imagery and soil type in a geographic information system to assess site-specific risk of fascioliasis on Red River Basin farms in Louisiana. *Ann N Y Acad Sci* 1992; 653: 389-97.

Malone JB, Gommers R, Hansen J, Yilma JM, Slingenberg J, Snijders F, Nachtergaele F, Ataman E. A geographic information system on the potential distribution and abundance of *Fasciola hepatica* and *F. gigantica* in east Africa based on Food and Agriculture Organization databases. *Vet Parasitol* 1998; 78: 87-101.

Mandal S, Sarkar RR, Sinha S. Mathematical models of malaria - a review. *Malaria Journal* 2011; 10: 202-.

Mas-Coma S, Funatsu IR, Bargues MD. *Fasciola hepatica* and lymnaeid snails occurring at very high altitude in South America. *Parasitology* 2001; 123 Suppl: S115-27.

Mas-Coma S. Epidemiology of fascioliasis in human endemic areas. *J Helminthol* 2005; 79: 207-16.

Mas-Coma S, Valero M, Bargues M. Effects of climate change on animal and zoonotic helminthiasis. *Rev Sci Tech* 2008; 27: 443-57.

Mas-Coma S, Valero MA, Bargues MD. Chapter 2. *Fasciola*, lymnaeids and human fascioliasis, with a global overview on disease transmission, epidemiology, evolutionary genetics, molecular epidemiology and control. *Adv Parasitol* 2009a; 69: 41-146.

Mas-Coma S, Valero MA, Bargues MD. Climate change effects on trematodiasis, with emphasis on zoonotic fascioliasis and schistosomiasis. *Vet Parasitol* 2009b; 163: 264-80.

Mathea RS (2015) *Angewandte Mathematik und Optimierung* Schriftenreihe. In: *Eine Übersicht über dynamische Modelle zur mathematischen Epidemiologie*. Eds Professur für Angewandte Mathematik, Professor Dr. rer. nat. Armin Fügenschuh. Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Fachbereich Maschinenbau, Hamburg

Mather JR, Bullock A, Woodings RB (1978) The climatic water budget in environmental analysis. Lexington Books, D.C. Heath and Company, Lexington, Massachusetts

Mather JR (1979) Use of the climatic water budget to estimate streamflow. In: Use of the climatic water budget in selected environmental water problems. Laboratory of Climatology (C.W. Thornthwaite Associates), Elmer, New Jersey

Matt M, Schöpf K, Mader C. Leberegelmonitoring: flächendeckende serologische Untersuchungen zum *Fasciola hepatica*-Befall in Tirol. Veterinary Medicine Austria/ Wiener Tierärztliche Monatsschrift 2007; 94: 210-3.

McCann CM, Baylis M, Williams DJ. The development of linear regression models using environmental variables to explain the spatial distribution of *Fasciola hepatica* infection in dairy herds in England and Wales. Int J Parasitol 2010a; 40: 1021-8.

McCann CM, Baylis M, Williams DJ. Seroprevalence and spatial distribution of *Fasciola hepatica*-infected dairy herds in England and Wales. The Veterinary record 2010b; 166: 612-7.

Mcdonald G (1957) The epidemiology and control of malaria. Oxford University Press, London

Mehl S (1932) Die Lebensbedingungen der Leberegelschnecke (*Galba truncatula* Müller), 1st edn. Dr. F. P. Datterer & Cie. (Sellier), Freising-München

Meier L, Van De Geer S, Bühlmann P. The group lasso for logistic regression. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 2008; 70: 53-71.

MeteoGroup. Meteo Info Belgien. Appenzell: MeteoGroup Schweiz AG 2015: <http://www.meteo-info.be/de/wetter.html>. 11.09.2015.

Mezo M, Gonzalez-Warleta M, Castro-Hermida JA, Muino L, Ubeira FM. Association between anti-*F. hepatica* antibody levels in milk and production losses in dairy cows. *Vet Parasitol* 2011; 180: 237-42.

Morgan E, Charlier J, Hendrickx G, Biggeri A, Catalan D, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Müller E, van Dijk J, Kenyon F, Skuce P, Höglund J, #039, Kiely P, van Ranst B, de Waal T, Rinaldi L, Cringoli G, Hertzberg H, Torgerson P, Wolstenholme A, Vercruyssen J. Global Change and Helminth Infections in Grazing Ruminants in Europe: Impacts, Trends and Sustainable Solutions. *Agriculture* 2013; 3: 484.

Müller OF (1774) *Vermivm terrestrium et fluviatilium, seu animalium infusoriorum, helminthicorum, et testaceorum, non marinorum, succincta historia.* Heineck & Faber, Leipzig, Kopenhagen

Murrell KD, Fried B (2007) *Food-Borne Parasitic Zoonoses. Fish and Plant-Borne Parasites.* Springer, New York

Nice NG, Wilson RA. A study of the effect of temperature on the growth of *Fasciola hepatica* in *Lymnaea truncatula*. *Parasitology* 1974; 68: 47-56.

Nöbauer W. Einleitung. In: *Mathematische Modelle in der Biologie: Eine Einführung für Biologen, Mathematiker, Mediziner und Pharmazeuten.* Nöbauer W, Timischl W, eds. Braunschweig/ Wiesbaden: Vieweg Verlag 1979: 1-3.

Novobilsky A, Kasny M, Beran L, Rondelaud D, Höglund J. *Lymnaea palustris* and *Lymnaea fuscus* are potential but uncommon intermediate hosts of *Fasciola hepatica* in Sweden. *Parasites & Vectors* 2013; 6: 251.

Olaniyi S, Obabiyi OS. Mathematical model for Malaria transmission dynamics in human and mosquito populations with nonlinear forces of infection. *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 2013; 88: 125-56.

Ollerenshaw CB, Rowlands WT. A method of forecasting the incidence of fascioliasis in Anglesey. *Vet. Rec.* 1959; 71: 591-8.

Ollerenshaw CB. The approach to forecasting the incidence of fascioliasis over England and Wales 1958–1962. *Agricultural Meteorology* 1966; 3: 35-53.

Olsen A, Frankena K, Bodker R, Toft N, Thamsborg S, Enemark H, Halasa T. Prevalence, risk factors and spatial analysis of liver fluke infections in Danish cattle herds. *Parasites & Vectors* 2015; 8: 160.

Otto H-J (1994) *Waldökologie*. UTB Ulmer, Stuttgart

Parr SL, Gray JS. A strategic dosing scheme for the control of fasciolosis in cattle and sheep in Ireland. *Vet Parasitol* 2000; 88: 187-97.

Patzner RA, Schreilechner P. Kartierung von Süßwassermollusken im Bundesland Salzburg (Österreich). *Ecology and taxonomy of freshwater Mollusca*, *Heldia* 1998; 4: 13-6.

Petzold F. Zur Populationsdynamik von *Galba truncatula* (Müll.) und deren Infektion mit *Fasciola hepatica* (L.) in einem endemischen Voralpengebiet der Schweiz. *Diss. med. vet.* 1989. Basel.

Ploeger HW, Eysker M. Simulating *Dictyocaulus viviparus* infection in calves: the parasitic phase. *Parasitology* 2000; 120 Suppl: S3-15.

Rahner K. Evangeliums.Net 1904-1984; 2004-2015: http://www.evangeliums.net/zitate/zitat_6402.html. 01.10.2015.

Rapsch C, Schweizer G, Grimm F, Kohler L, Bauer C, Deplazes P, Braun U, Torgerson PR. Estimating the true prevalence of *Fasciola hepatica* in cattle slaughtered in Switzerland in the absence of an absolute diagnostic test. *Int J Parasitol* 2006; 36: 1153-8.

Rapsch C, Dahinden T, Heinzmann D, Torgerson PR, Braun U, Deplazes P, Hurni L, Bar H, Knubben-Schweizer G. An interactive map to assess the potential spread of *Lymnaea truncatula* and the free-living stages of *Fasciola hepatica* in Switzerland. *Vet Parasitol* 2008; 154: 242-9.

Reichmuth W. Die Leberegelschnecke *Galba truncatula* Müll. Zugleich ein Beitrag zur Systematik der Süßwasserschneckenfamilie Lymnaeidae. *Zeitschrift für Morphologie und Ökologie der Tiere* 1936; 31: 207-44.

Roberts EW. Studies on the Life-Cycle of *Fasciola hepática* (Linnaeus) and of its Snail Host, *Limnaea* (*Galba*) *truncatula* (Müller), in the Field and under Controlled Conditions in the Laboratory. *Ann. Trop. Med. Parasit.* 1950; 44: 187-206.

Roberts MG, Lawson JR, Gemmell MA. Population dynamics in echinococcosis and cysticercosis: mathematical model of the life-cycle of *Echinococcus granulosus*. *Parasitology* 1986; 92 (Pt 3): 621-41.

Rondelaud D. Les espèces animales prédatrices de *Lymnaea truncatula* Müller dans ses habitats immergés en Haute-Vienne. Etude expérimentale de leur prédation. *Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse* 1979a; 115: 99-105.

Rondelaud D. Le contrôle biologique de *Lymnaea* (*Galba*) *truncatula* Müller par les Mollusques Zonitidae. Possibilités et limites. *Revue de Médecine Vétérinaire* 1979b; 130: 101-10.

Rondelaud D, Hourdin P, Vignoles P, Dreyfuss G, Cabaret J. The detection of snail host habitats in liver fluke infected farms by use of plant indicators. *Vet Parasitol* 2011; 181: 166-73.

Ross JG, Dow C. The problem of acute fascioliasis in cattle. *The Veterinary record* 1966; 78: 670.

Ross R. SOME A PRIORI PATHOMETRIC EQUATIONS. *British Medical Journal* 1915; 1: 546-7.

Sanchez-Vazquez MJ, Lewis FI. Investigating the impact of fasciolosis on cattle carcass performance. *Vet Parasitol* 2013; 193: 307-11.

Sander C. Alles Öko. Lebensraum Wald. Regensburg: Treeland.de 2003; 2003: <http://www.treeland.de/Wald/Lebensraum>. 12.09.2015.

Schnieder T. Helminthosen der Wiederkäuer. In: *Veterinärmedizinische Parasitologie*. Schnieder T, ed. Stuttgart: Parey in MVS Medizinverlage Stuttgart GmbH & Co. KG 2006: 166-234.

Schwarz G. Estimating the dimension of a model. *Ann Stat* 1978; 6: 461–4.

Schweikle V (1997) Bodenversauerung – Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen. In: *Handbuch Boden*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

Schweizer G, Plebani GF, Braun U. Prävalenz von *Fasciola hepatica* und *Dicrocoelium dendriticum* beim Rind: Untersuchung in einem Ostschweizer Schlachthof. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 2003; 145: 177-9.

Schweizer G, Braun U, Deplazes P, Torgerson PR. Estimating the financial losses due to bovine fasciolosis in Switzerland. *The Veterinary record* 2005a; 157: 188-93.

Schweizer G, Hässig M, Braun U. Das Problembewusstsein von Landwirten in Bezug auf die Fasciolose des Rindes. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 2005b; 147: 253-7.

Schweizer G, Meli ML, Torgerson PR, Lutz H, Deplazes P, Braun U. Prevalence of *Fasciola hepatica* in the intermediate host *Lymnaea truncatula* detected by real time TaqMan PCR in populations from 70 Swiss farms with cattle husbandry. *Vet Parasitol* 2007; 150: 164-9.

Sedlacek K-D. Schnee. In: *Emergenz: Strukturen der Selbstorganisation in Natur und Technik*, 1 edn. Sedlacek K-D, ed. Norderstedt: Books on Demand 2010: 142-3.

Selemetas N, Ducheyne E, Phelan P, O'Kiely P, Hendrickx G, de Waal T. Spatial analysis and risk mapping of *Fasciola hepatica* infection in dairy herds in Ireland. *Geospat Health* 2015a; 9: 281-91.

Selemetas N, Phelan P, O'Kiely P, de Waal T. Cluster analysis of fasciolosis in dairy cow herds in Munster province of Ireland and detection of major climatic and environmental predictors of the exposure risk. *Geospat Health* 2015b; 9: 271-9.

Smith G, Wilson RA. Seasonal Variations in the Microclimate of *Lymnaea truncatula* Habitats. *Journal of Applied Ecology* 1980; 17: 329-42.

Smith G. A mathematical model for the evolution of anthelmintic resistance in a direct life cycle nematode parasite. *Int J Parasitol* 1990; 20: 913-21.

Soulsby EJJ (1982) *Helminths, arthropods and protozoa of domesticated animals*, 7th edn. Baillière Tindall, London

Sullivan A, Agosto F, Bewick S, Su C, Lenhart S, Zhao X. A mathematical model for within-host *Toxoplasma gondii* invasion dynamics. *Math Biosci Eng* 2012; 9: 647-62.

Taylor EL (1964) *Fascioliasis and the Liver Fluke*. F.A.O., Rome

Thomas AP. Memoirs: The Life History of the Liver-Fluke (*Fasciola hepatica*). Quarterly Journal of Microscopical Science 1883; 2: 99-133.

Thomas M (1979) Towards a Mathematical Model for the Transmission of Fascioliasis. DPhil. University of York

Thornthwaite C, Mather J (1955) The water balance. Publications in climatology. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey

Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review 1948; 38: 55-94.

Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) 1996: 267-88.

Torgerson P, Claxton J. Epidemiology and control. In: Fasciolosis. Dalton JP, ed. Oxfordshire, New York: CABI 1999: 113-49.

Trouve S, Degen L, Goudet J. Ecological components and evolution of selfing in the freshwater snail *Galba truncatula*. J Evol Biol 2005; 18: 358-70.

Tum S, Puotinen ML, Copeman DB. A geographic information systems model for mapping risk of fasciolosis in cattle and buffaloes in Cambodia. Vet Parasitol 2004; 122: 141-9.

Tum S, Puotinen ML, Skerratt LF, Chan B, Sothoeun S. Validation of a geographic information system model for mapping the risk of fasciolosis in cattle and buffaloes in Cambodia. Vet Parasitol 2007; 143: 364-7.

Vaessen MA, Veling J, Frankena K, Graat EA, Klunder T. Risk factors for *Salmonella dublin* infection on dairy farms. Vet Q 1998; 20: 97-9.

van Dijk J, Sargison ND, Kenyon F, Skuce PJ. Climate change and infectious disease: helminthological challenges to farmed ruminants in temperate regions. *Animal* 2010; 4: 377-92.

Van Velthuizen H, Verelst L, Santacrose P (1995) Crop Production System Zones (CPSZ) of the IGADD Sub-Region. Agrometeorology working paper series. Ed Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy

Volterra V (1990) *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie*. Autorisierter Nachdruck der Originalausgabe von 1931. Éditions Jacques Gabay, Paris. 222

von Ebner-Eschenbach M. Lebenslust und Lebenskunst. In: *Lebensweisheiten berühmter Dichter und Denker*. Leonhardt R, ed. Hannover: humboldt, Schlütersche Verlagsgemeinschaft 2011: 298-316.

Walton CL. Liver Rot of Sheep, and Bionomics of *Limnaea truncatula* in the Aberystwyth Area. *Parasitology* 1918; 10: 232-66.

Wasserwirtschaftsamt München. Grundwasser und Boden. München: 2015: http://www.wwa-m.bayern.de/grundwasser_boden/index.htm. 12.09.2015.

Wickert U (2001) *Zeit zu handeln. Den Werten einen Wert geben*, 1st edn. Hoffman und Campe, Hamburg

Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. Keyhole Markup Language. 2015a; 07.03.2015:

https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Keyhole_Markup_Language&oldid=139562259. 19.09.2015.

Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. Schweiz. 2015b; 28.09.2015: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schweiz&oldid=146478990>.

28.09.2015.

Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. Google Earth. 2015c; 21.07.2015: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Google_Earth&oldid=144232154. 16.08.2015.

Wittchen U, Schwarz J, Moll E. Agrarmeteorologische Stationen: Vergleich der „vor Ort“ gewonnenen Wetterdaten mit denen umliegender offizieller Wetterstationen. *Journal für Kulturpflanzen* 2011; 63: 259-69.

Wolstenholme AJ, Fairweather I, Prichard R, von Samson-Himmelstjerna G, Sangster NC. Drug resistance in veterinary helminths. *Trends in Parasitology* 2004; 20: 469-76.

Woolhouse MEJ. On the application of mathematical models of schistosome transmission dynamics. I. Natural transmission. *Acta Tropica* 1991; 49: 241-70.

World Health Organization. Fasciolosis. WHO (World Health Organization) 2015; 2015: http://www.who.int/foodborne_trematode_infections/fascioliasis/en/. 16.09.2015.

Ximenes T, Rondelaud D, Mage C, Chermette R. L'élimination de la Limnée tronquée dans les pâturages: contrôle biologique et lutte intégrée contre la fasciolose. *Le Point vétérinaire: revue d'enseignement post-universitaire et de formation permanente* 1993; 24: 55-61.

Yilma JM, Malone JB. A geographic information system forecast model for strategic control of fasciolosis in Ethiopia. *Vet Parasitol* 1998; 78: 103-27.

Zhao R, Milner FA. A Mathematical model of *Schistosoma mansoni* in *Biomphalaria glabrata* with control strategies. *Bull Math Biol* 2008; 70: 1886-905.

Zimmermann L, Raspe S, Schulz C, Grimmeisen W. Wasserverbrauch von Wäldern - Bäume und Bestände verdunsten unterschiedlich stark. *LWF-aktuell* 2008; 66: 16-20.

Zukowski S, Hill JM, Jones FW, Malone JB. Development and validation of a soil-based geographic information system model of habitat of *Fossaria bulimoides*, a snail intermediate host of *Fasciola hepatica*. *Prev Vet Med* 1991; 11: 221-7.

Zukowski SH. A geographic information system for risk assessment of *Fasciola hepatica* in cattle. *Diss. med. vet.* 1990.

Zukowski SH, Wayne Wilkerson G, Malone Jr JB. Fasciolosis in cattle in Louisiana. II. Development of a system to use soil maps in a geographic information system to estimate disease risk on Louisiana coastal marsh rangeland. *Vet Parasitol* 1993; 47: 51-65.

IX. ANHANG

1. Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Entwicklungszyklus von Fasciola hepatica (Illustration von Matthias Haab, modifiziert nach ECKERT (2005))</i>	5
<i>Abbildung 2: Komponenten des Wasserhaushalts von Wäldern (ZIMMERMANN et al., 2008)</i>	16
<i>Abbildung 3: Messfeld-Station in Aigle mit 10 m hohem Windmasten, einer Messbrücke auf 2 m (Temperatur, Feuchtigkeit und Strahlung) und einem Pluviometer (Niederschlag), 1,5 m über Boden (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE METEOSCHWEIZ, 2014c)</i>	47
<i>Abbildung 4: Devianzverlauf für das grlasso (links) und BIC-Verlauf für das glmmLasso (rechts) gegen den optimalen Tuningparameter λ_{opt} (gestrichelte vertikale Linie)</i>	59
<i>Abbildung 5: Verlauf der Koeffizientenpfade für das grlasso (links) und das glmmLasso (rechts) gegen den optimalen Tuningparameter λ_{opt} (gestrichelte vertikale Linie)</i>	59

2. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Zoomstufen und Maßstäbe verwandter Schweizer Landeskarten</i>	34
<i>Tabelle 2: Maßstäbe und Lagegenauigkeiten der Gewässernetzkarten</i>	38
<i>Tabelle 3: Zur Regressionsanalyse herangezogene boden- und geländeabhängige Kovariablen</i>	44
<i>Tabelle 4: Bezeichnungen und Granularitäten meteorologischer Ausgangsvariablen, zu denen Daten erhoben wurden</i>	50
<i>Tabelle 5: Bezugskategorien kategorialer Kovariablen des grlasso und glmmLasso in alphabetischer Reihenfolge</i>	61
<i>Tabelle 6: Die zehn einflussreichsten Regressionsparameter des grlasso-Modells</i>	62
<i>Tabelle 7: Regressionsparameter des grlasso-Modells mit schwach positiven Effekten und $\beta > 0,1$</i>	63

<i>Tabelle 8: Regressionsparameter des grplasso-Modells mit schwach negativen Effekten und $\beta > 0,1$</i>	64
<i>Tabelle 9: Einflussreiche Regressionsparameter des glmLasso-Modells mit $\beta > 0,1$</i>	65
<i>Tabelle 10: In beiden Modellen ausgewählte Regressionsparameter, geordnet nach der Größe aller grplasso-Schätzer</i>	66
<i>Tabelle 11: In beiden Regressionsansätzen ausgewählte Klimavariablen mit $\beta \geq 0,1$</i>	100
<i>Tabelle 12: Boden- und geländeabhängige Kovariablen, zu denen Daten erhoben wurden</i>	142
<i>Tabelle 13: Referenzkategorien aller kategorialen boden- und geländeabhängigen Kovariablen, die in die Regressionsanalysen miteinbezogen wurden</i>	143
<i>Tabelle 14: Konstruierte Klimavariablen (Eis-, Frost-, Sommer- und Hitzetage)</i>	144
<i>Tabelle 15: Konstruierte niederschlagsabhängige Klimavariablen</i>	144
<i>Tabelle 16: Konstruierte Klimavariablen, basierend auf 5 cm über dem Boden gemessenen Temperaturen</i>	145
<i>Tabelle 17: Konstruierte Klimavariablen, basierend auf 2 m über dem Boden gemessenen Temperaturen</i>	145
<i>Tabelle 18: Vollständige Listung aller untersuchten Geländekoordinaten, zugeordneter Wetterstationen sowie deren Entfernungen und Höhenunterschieden zu den Bezugspunkten</i>	146
<i>Tabelle 19: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Bäume/ Sträucher</i>	159
<i>Tabelle 20: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Bodeneignung für Kulturland</i>	159
<i>Tabelle 21: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Gesteinklassierung</i>	159
<i>Tabelle 22: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Gewässer im Umkreis von 100 m</i>	159
<i>Tabelle 23: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Gründigkeit</i>	160
<i>Tabelle 24: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Grundwasservorkommen 500</i>	160
<i>Tabelle 25: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Grundwasserzusatz</i>	160

<i>Tabelle 26: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Hanglagen</i>	
<i>Landwirtschaft</i>	160
<i>Tabelle 27: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Hangwasseraustritt</i>	
.....	161
<i>Tabelle 28: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Klimaeignung</i>	
<i>Übersicht</i>	161
<i>Tabelle 29: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Lithologie</i>	
<i>Hauptgruppen</i>	161
<i>Tabelle 30: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable</i>	
<i>Nährstoffspeichervermögen</i>	161
<i>Tabelle 31: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable</i>	
<i>Niederschlagshaushalt</i>	162
<i>Tabelle 32: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable REN Feuchtgebiet</i>	
.....	162
<i>Tabelle 33: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable REN</i>	
<i>Trockenstandort</i>	162
<i>Tabelle 34: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable REN Wald</i>	162
<i>Tabelle 35: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Riet/ Feuchtflächen</i>	
.....	163
<i>Tabelle 36: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Vernässung</i>	163
<i>Tabelle 37: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Wald Bild</i>	163
<i>Tabelle 38: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable</i>	
<i>Wasserdurchlässigkeit</i>	163
<i>Tabelle 39: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable</i>	
<i>Wasserspeichervermögen</i>	164
<i>Tabelle 40: In grplasso und glmLasso ausgewählte Regressionsparameter,</i>	
<i>geordnet nach absteigender Größe der Schätzer des grplasso-Modells</i>	165

3. Qualitätsinformationen zu Daten des IDAweb

Die Legende für die Interpretation der Qualitätsinformationen sowie eine ausführliche Beschreibung der Abläufe der Qualitätskontrollen und Bearbeitung von Messwerten ist unter <http://www.meteoschweiz.admin.ch/de/aboutdata> zu finden.

3.1. Plausibilitätsinformationen

Die Plausibilitätsinformation ist Bestandteil der Datenqualitätsinformation. Sie beschreibt die Plausibilität eines Wertes aufgrund von Limiten- und Konsistenztests.

Eine Plausibilitätsinformation ist vorhanden, sobald ein Messwert die für jede Station und jeden Parameter definierten Plausibilitätstests verletzt. Bei den Plausibilitätstests werden verschiedene Aspekte der Messreihen überprüft:

1. Ist ein Wert physikalisch möglich? (z. B. Lufttemperatur $> 50^{\circ}\text{C}$)
2. Entsprechen die Schwankungen der Messreihe einer natürlichen Variabilität? (z. B. Windrichtung während 6 Stunden konstant)
3. Sind die Werte innerhalb der Station konsistent zu anderen Werten (z. B. Sonnenscheindauer zu Globalstrahlung)
4. Sind die Werte im räumlichen Vergleich konsistent? (z. B. Luftdruckverteilung)
5. Sind die Werte inhomogen oder driftverdächtig? (z. B. Störungen durch Instrumentenwechsel oder Standortverschiebungen)

3.2. Mutationsinformationen

Die Mutationsinformation ist ebenfalls Bestandteil der Datenqualitätsinformation. Sie beschreibt die Bearbeitung, mit der ein Ersatzwert für einen fehlenden oder fehlerhaften Messwert bestimmt wurde.

4. Tabellen des Anhangs

Tabelle 12: Boden- und geländeabhängige Kovariablen, zu denen Daten erhoben wurden

Kovariable	
Bäume	Lithologie Hauptgruppen
Bewässerungsbedürftigkeit *	Nährstoffspeichervermögen
Bodeneignung für Kulturland	Niederschlagshaushalt
Gesteinklassierung	REN Feuchtgebiet
Gewässer (im Umkreis von 100 m)	REN Fließgewässer/ Seen *
Gründigkeit	REN Wald
Grundwasservorkommen 500	REN Trockenstandort
Grundwasser (GW)-Zusatz	Riet/ Feuchtflächen
Hanglagen	Wald Bild
Hangwasseraustritt	Vernässung
Höhe über N. N.	Wasserdurchlässigkeit
Klimaeignung Übersicht	Wasserspeichervermögen

* Kovariablen, die aufgrund unvollständiger Datensätze in den Regressionsanalysen nicht berücksichtigt werden konnten

Tabelle 13: Referenzkategorien aller kategorialen boden- und geländeabhängigen Kovariablen, die in die Regressionsanalysen miteinbezogen wurden

Kovariable	Referenzkategorie (in Worten)	Referenz numerisch
Bäume	keine Bäume	0
Bodeneignung für Kulturland	sehr gute Produktion (Hangneigung < 25 %)	1
Gesteinklassierung	Lockergesteine	1
Gewässer (im Umkreis von 100 m)	kein Gewässer	0
Gründigkeit	mittel	3
Grundwasservorkommen 500	ohne ergiebige Vorkommen	1
Grundwasser (GW)-Zusatz	GW-Fassungen > 5000 l/ min, Flussinfiltration ins GW, bedeutende Vorkommen, tieferes GW-Stockwerk mit oder ohne Kontakt zu darübergelegenen	0
Hanglagen	Hangneigung < 18 %	1
Hangwasseraustritt	kein Hangwasseraustritt	0
Klimaeignung Übersicht	Dauergrünland	4
Lithologie Hauptgruppen	Tone, Silte, Sande	2
Nährstoffspeichervermögen	gut	5
Niederschlagshaushalt	ausgeglichen	2
REN Feuchtgebiet	kein Feuchtgebiet	0
REN Wald	Ausbreitungsgebiet Wald	2
REN Trockenstandort	kein Trockenstandort	0
Riet/ Feuchtflächen	kein(e) Riet/ Feuchtflächen	0
Wald Bild	kein Wald	4
Vernässung	keine Vernässung	1
Wasserdurchlässigkeit	schwach gehemmt	3
Wasserspeichervermögen	gut	5

Tabelle 14: Konstruierte Klimavariablen (Eis-, Frost-, Sommer- und Hitzetage)

Kovariablen	Zeitraum vor Felduntersuchung
Eistage-1	Monat 26-37
Eistage-2	Monat 14-25
Eistage-3	Monat 2-13
Frosttage-1	Monat 26-37
Frosttage-2	Monat 14-25
Frosttage-3	Monat 2-13
Sommertage-1	Monat 26-37
Sommertage-2	Monat 14-25
Sommertage-3	Monat 2-13
Hitzetage-1	Monat 26-37
Hitzetage-2	Monat 14-25
Hitzetage-3	Monat 2-13

Tabelle 15: Konstruierte niederschlagsabhängige Klimavariablen

Kovariablen	Zeitraum vor Felduntersuchung
Trockenperiode-1	Tag 732-1096
Trockenperiode-2	Tag 367-731
Trockenperiode-3	Tag 2-366
Niederschlag \geq 5-1	Tag 732-1096
Niederschlag \geq 5-2	Tag 367-731
Niederschlag \geq 5-3	Tag 2-366

Tabelle 16: Konstruierte Klimavariablen, basierend auf 5 cm über dem Boden gemessenen Temperaturen

Kovariable	Zeitraum vor Felduntersuchung
Temp5max<0-1	Tag 732-1096
Temp5max<0-2	Tag 367-731
Temp5max<0-3	Tag 2-366
Temp5max>30-1	Tag 732-1096
Temp5max>30-2	Tag 367-731
Temp5max>30-3	Tag 2-366
Temp5mean<0-1	Tag 732-1096
Temp5mean<0-2	Tag 367-731
Temp5mean<0-3	Tag 2-366
Temp5mean>20-1	Tag 732-1096
Temp5mean>20-2	Tag 367-731
Temp5mean>20-3	Tag 2-366
Temp5min<0-1	Tag 732-1096
Temp5min<0-2	Tag 367-731
Temp5min<0-3	Tag 2-366
Temp5min>15-1	Tag 732-1096
Temp5min>15-2	Tag 367-731
Temp5min>15-3	Tag 2-366

Tabelle 17: Konstruierte Klimavariablen, basierend auf 2 m über dem Boden gemessenen Temperaturen

Kovariable	Zeitraum vor Felduntersuchung
Temp200max>30-1	Tag 732-1096
Temp200max>30-2	Tag 367-731
Temp200max>30-3	Tag 2-366
Temp200mean<0-1	Tag 732-1096
Temp200mean<0-2	Tag 367-731
Temp200mean<0-3	Tag 2-366
Temp200mean>20-1	Tag 732-1096
Temp200mean>20-2	Tag 367-731
Temp200mean>20-3	Tag 2-366
Temp200min>15-1	Tag 732-1096
Temp200min>15-2	Tag 367-731
Temp200min>15-3	Tag 2-366

Tabelle 18: Vollständige Listung aller untersuchten Geländekoordinaten, zugeordneter Wetterstationen sowie deren Entfernungen und Höhenunterschieden zu den Bezugspunkten

ID		y	Höhe (m ü.M.)	Schnecken- fund	nächste Wetterstation	Koordinaten der Wetterstation (CH1903+ / LV95)	Höhe der Wetterstation (m ü.M.)	Distanz zur Wetterstation (km)	Höhenunterschied zur Wetterstation (m)
1	713065	258668	623,3	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	2,8	84,3
3	713002	258607	606,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	2,8	67,4
7	710203	265492	520,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	5,8	-18,9
8	710203	265492	520,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	5,8	-18,9
9	739506	240195	925,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	16,0	149,4
10	739503	240168	927,8	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	16,0	151,8
11	739210	240249	892,5	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	16,0	116,5
12	739671	240252	962,3	ja	Hörnli	716515 / 247755	1132,0	24,0	-169,7
12	739671	240252	962,3	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	16,0	186,3
14	693557	244251	438,5	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	9,0	-117,5
15	688437	245048	611,0	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	5,0	55,0
18	715196	272875	398,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	14,0	-140,6
19	705255	255752	593,2	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	6,5	54,2
20	705414	255821	575,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	6,5	36,4
21	705245	255541	540,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	6,5	1,4
22	705568	255649	542,8	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	6,5	3,8
23	719384	253425	694,8	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	155,8
24	719299	253661	680,8	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	141,8
25	719409	253429	692,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	153,1
26	722276	248052	729,7	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	106,7
26	722276	248052	729,7	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	26,0	-46,3
27	722292	248070	728,8	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	105,8

27	722292	248070	728,8	ja	St. Gallen	747861 / 254585	776,0	26,0	-47,2
28	722274	248094	728,1	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	105,1
28	722274	248094	728,1	ja	St. Gallen	747861 / 254585	776,0	26,0	-47,9
30	721919	247909	746,3	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	123,3
30	721919	247909	746,3	ja	St. Gallen	747861 / 254585	776,0	26,0	-29,7
31	722276	248052	729,7	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	106,7
31	722276	248052	729,7	ja	St. Gallen	747861 / 254585	776,0	26,0	-46,3
32	722292	248070	728,8	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	105,8
32	722292	248070	728,8	ja	St. Gallen	747861 / 254585	776,0	26,0	-17,2
35	721919	247909	746,3	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	11,0	123,3
35	721919	247909	746,3	ja	St. Gallen	747861 / 254585	776,0	26,0	-29,7
36	724315	276494	566,3	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	14,0	126,3
36	724315	276494	566,3	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	6,0	-133,7
37	709770	277396	541,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	2,5
38	709767	277427	529,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	-9,5
39	709484	277326	544,8	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	5,8
40	709770	277396	541,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	2,5
41	709767	277427	529,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	-9,5
43	721357	261263	622,8	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	83,8
44	721472	261371	631,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	92,5
45	721516	261404	633,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	94,1
46	721357	261263	622,8	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	83,8
47	721472	261371	631,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	92,5
48	721516	261404	633,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	11,0	94,1
49	728587	265234	482,1	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	13,0	42,1
50	728349	265350	478,9	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	13,0	38,9

51	728587	265234	482,3	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	13,0	42,3
53	679964	246346	489,1	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	6,5	-66,9
54	679964	246346	489,1	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	6,5	-66,9
55	712698	252239	701,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	8,0	162,4
56	712698	252239	701,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	8,0	162,4
57	744158	256099	674,2	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	4,0	-101,8
58	744531	256015	617,9	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	3,5	-158,1
59	707675	269568	385,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	10,0	-153,5
60	706936	248419	641,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	12,0	102,4
69	717673	265303	468,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	-70,9
70	717673	265303	468,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	-70,9
73	727149	259673	531,0	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	16,5	-8,0
74	727149	259673	531,0	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	16,5	-8,0
77	724013	268781	423,2	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	16,0	-115,8
79	735467	255021	594,9	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	25,0	55,9
79	735467	255021	594,9	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	20,5	-28,1
79	735467	255021	594,9	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,5	-181,1
80	735467	255021	594,9	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	25,0	55,9
80	735467	255021	594,9	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	20,5	-28,1
80	735467	255021	594,9	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,5	-181,1
81	735985	256400	597,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	26,0	58,4
81	735985	256400	597,4	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	22,0	-25,6
81	735985	256400	597,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-178,6
82	735985	256400	597,4	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	26,0	58,4
82	735985	256400	597,4	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	22,0	-25,6
82	735985	256400	597,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-178,6

83	736281	265739	554,0	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	7,0	114,0
84	736281	265739	554,0	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	7,0	114,0
85	689443	267849	467,7	ja	Zürich / Kloten	682706 / 259337	426,0	11,0	41,7
87	707263	244739	707,3	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	15,0	168,3
88	737910	264397	506,6	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	9,0	66,6
89	738173	264271	510,0	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	9,0	70,0
90	738227	264231	510,5	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	9,0	70,5
92	724037	259792	657,2	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	13,5	118,2
93	723773	259607	673,0	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	13,5	134,0
94	723842	259553	677,7	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	13,5	138,7
95	724111	259512	663,6	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	13,5	124,6
96	724454	260169	620,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	13,5	81,5
100	730256	252260	661,3	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	18,0	-114,7
100	730256	252260	661,3	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	15,5	38,3
101	729925	252452	635,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	18,0	-140,6
101	729925	252452	635,4	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	15,5	12,4
102	713954	260336	557,6	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	3,5	18,6
103	714156	260367	548,4	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	3,5	9,4
104	732581	271915	555,4	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	6,0	115,4
105	732413	270851	516,2	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	6,0	76,2
106	713230	229080	473,7	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	19,0	-11,3
107	713141	229121	483,0	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	19,0	-2,0
108	713230	229080	473,7	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	19,0	-11,3
110	661564	219357	575,9	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	10,0	121,9
111	661564	219357	575,9	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	10,0	121,9
112	716602	254472	676,2	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	8,0	137,2

113	736428	267208	516,0	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	7,0	76,0
114	727767	262857	639,0	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,5	100,0
115	727767	262857	639,0	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,5	100,0
116	730857	272556	564,7	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	8,0	124,7
117	730852	272549	564,7	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	8,0	124,7
118	730845	272537	564,6	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	8,0	124,6
119	730857	272556	564,7	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	8,0	124,7
120	730852	272549	564,7	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	8,0	124,7
121	730845	272537	564,6	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	8,0	124,6
123	696587	239950	468,5	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	10,0	-16,5
124	696587	239950	468,5	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	10,0	-16,5
125	719282	279662	651,0	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	0,5	-49,0
125	719282	279662	651,0	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	22,0	112,0
126	735582	252454	622,3	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-153,7
126	735582	252454	622,3	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	-0,7
127	735629	252259	638,8	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-137,2
127	735629	252259	638,8	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	15,8
128	735897	252029	660,9	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-115,1
128	735897	252029	660,9	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	37,9
129	735913	252549	628,0	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-148,0
129	735913	252549	628,0	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	5,0
130	734189	251987	598,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	25,0	59,5
130	734189	251987	598,5	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	17,0	-24,5
130	734189	251987	598,5	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	-177,5
131	735484	252250	627,2	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,5	-148,8
131	735484	252250	627,2	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	4,2

133	735897	252029	660,9	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	-115,1
133	735897	252029	660,9	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	37,9
134	735913	252549	628,0	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	12,0	-148,0
134	735913	252549	628,0	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	18,0	5,0
135	734189	251987	598,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	25,0	59,5
135	734189	251987	598,5	ja	Ebnat-Kappel	726349 / 237167	623,0	16,5	-24,5
135	734189	251987	598,5	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	-177,5
136	742506	253830	634,1	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	5,0	-141,9
137	742549	253937	644,5	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	5,0	-131,5
138	742586	253870	637,0	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	5,0	-139,0
139	742559	253931	644,6	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	5,0	-131,4
140	742540	253828	628,9	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	5,0	-147,1
142	668727	216750	427,1	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	7,0	-26,9
147	722593	214869	449,2	ja	Glarus	723752 / 210568	517,0	4,0	-67,8
148	722593	214869	449,2	ja	Glarus	723752 / 210568	517,0	4,0	-67,8
149	694620	238716	573,9	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	8,0	88,9
150	715431	276343	535,3	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	-3,7
150	715431	276343	535,3	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	4,0	-164,7
151	715431	276343	535,3	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	17,0	-3,7
151	715431	276343	535,3	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	4,0	-164,7
153	736319	254659	649,0	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	11,0	-127,0
154	717199	277762	591,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	18,0	52,5
154	717199	277762	591,5	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	4,0	-108,5
157	735406	246821	805,5	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	29,5
158	735394	246768	823,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	47,4
159	735359	246916	789,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	13,4

163	735394	246768	823,4	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	47,4
164	735273	246869	800,1	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	24,1
165	734608	246943	833,8	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	14,0	57,8
167	749037	257565	658,7	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	3,0	-117,3
168	702306	279961	424,9	ja	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	14,0	-13,1
173	717068	265079	479,0	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	-60,0
174	716990	265697	551,6	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	12,6
175	717068	265079	479,0	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	-60,0
176	716990	265697	551,6	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	12,6
177	707287	233966	450,0	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	14,0	-35,0
178	707657	233779	455,4	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	14,0	-29,6
179	707754	233836	456,6	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	14,0	-28,4
180	707287	233966	450,0	ja	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	14,0	-35,0
183	715291	251697	690,7	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	151,7
184	715296	251683	695,0	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	156,0
185	715111	251962	650,7	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	9,0	111,7
187	698162	256322	636,9	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	12,0	97,9
189	698162	256322	636,9	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	12,0	97,9
191	741952	263443	529,0	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	10,0	89,0
192	741386	263282	521,6	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	10,0	81,6
193	741952	263443	529,0	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	10,0	89,0
194	722318	277777	588,1	ja	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	21,0	49,1
194	722318	277777	588,1	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	4,0	-111,9
195	739451	266579	502,1	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	7,0	62,1
196	739715	266212	516,6	ja	Güttingen	738420 / 273960	440,0	7,0	76,6
197	738999	256610	745,3	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	9,0	-30,7

198	739069	256537	744,8	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	9,0	-31,2
199	739029	256801	755,1	ja	St. Gallen	747861 / 254586	776,0	9,0	-20,9
206	690110	278640	406,0	ja	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	4,5	-32,0
206	690110	278640	406,0	ja	Zürich/ Kloten	682706 / 259337	426,0	20,5	-20,0
207	690078	278569	407,1	ja	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	4,5	-30,9
207	690078	278569	407,1	ja	Zürich/ Kloten	682706 / 259337	426,0	20,5	-18,9
208	690064	278541	406,5	ja	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	4,0	-31,4
208	690064	278541	406,5	ja	Zürich/ Kloten	682706 / 259337	426,0	20,5	-19,4
217	696523	254817	594,2	ja	Zürich-Fluntern	685117 / 248062	556,0	13,0	38,2
220	717665	276616	578,5	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	3,0	-121,5
220	717665	276616	578,5	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	18,0	39,5
220	717665	276616	578,5	ja	*Singen	47,774 / 8,822	445,0	18,0	133,5
221	717574	276583	575,1	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	3,0	-124,9
221	717574	276583	575,1	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	18,0	36,1
221	717574	276583	575,1	ja	*Singen	47,774 / 8,822	445,0	18,0	130,1
222	717521	276521	572,2	ja	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	3,0	-127,8
222	717521	276521	572,2	ja	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	18,0	33,2
222	717521	276521	572,2	ja	*Singen	47,774 / 8,822	445,0	18,0	127,2
230	692299	242843	608,5	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	9,0	52,6
231	692356	242856	606,7	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	9,0	50,7
237	691051	239054	715,1	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	11,0	159,1
245	669870	211611	535,7	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	81,7
246	669950	211573	539,3	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	85,3
247	669969	211548	538,3	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	84,3
248	670057	211622	546,2	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	92,2
249	670015	211676	548,8	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	94,8

255	673190	218770	577,4	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	12,0	123,4
256	673192	218776	576,3	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	12,0	122,3
257	673241	218748	593,4	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	12,0	139,4
265	671121	260417	605,8	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	18,0	49,8
266	671132	260409	601,1	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	18,0	45,1
267	671173	260421	588,5	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	18,0	32,5
268	671170	260415	590,6	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	18,0	34,6
276	693065	241831	581,8	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	25,8
277	693074	241827	578,3	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	22,3
278	693088	241745	585,7	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	29,7
281	669010	214185	535,7	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,5	81,7
282	668981	214011	530,2	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,5	76,2
284	669159	214017	532,4	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,5	78,4
285	669071	214005	530,9	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,5	76,9
290	667285	220468	465,1	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	11,0	11,1
291	667324	220409	462,9	ja	Luzern	665540 / 209848	454,0	11,0	8,9
293	677353	242274	525,0	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-31,0
294	677232	241955	529,4	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-26,6
295	677181	241834	534,8	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-21,2
296	676993	241789	541,0	ja	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-15,0
547	700886	280453	448,0	nein	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	12,0	10,0
547	700886	280453	448,0	nein	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	23,0	-91,0
548	700862	280371	439,0	nein	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	12,0	1,0
548	700862	280371	439,0	nein	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	23,0	-100,0
549	700772	280386	441,0	nein	Schaffhausen	688698 / 282796	438,0	12,0	3,0
549	700772	280386	441,0	nein	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	23,0	-98,0

550	736555	276533	411,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	-29,0
550	736555	276533	411,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-128,0
550	736555	276533	411,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	-31,5
551	736690	276448	412,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	-28,0
551	736690	276448	412,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-127,0
551	736690	276448	412,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	-30,5
552	736850	276394	409,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	-31,0
552	736850	276394	409,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-130,0
552	736850	276394	409,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	-33,5
553	739577	272990	455,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	15,0
553	739577	272990	455,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-84,0
553	739577	272990	455,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	12,5
554	739445	273076	453,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	13,0
554	739445	273076	453,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-86,0
554	739445	273076	453,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	10,5
555	739689	273507	430,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	-10,0
555	739689	273507	430,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-109,0
555	739689	273507	430,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	-12,5
556	739391	273166	450,0	nein	Güttingen	738420 / 273960	440,0	3,0	440,0	10,0
556	739391	273166	450,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	31,0	539,0	-89,0
556	739391	273166	450,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,0	442,5	7,5
557	717094	277016	581,0	nein	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	2,5	700,0	-119,0
557	717094	277016	581,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	18,5	539,0	42,0
557	717094	277016	581,0	nein	*Singen	47,774 / 8,822	445,0	17,0	445,0	136,0
558	717074	276871	577,0	nein	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	2,5	700,0	-123,0
558	717074	276871	577,0	nein	Aadorf/ Tännikon	710515 / 259821	539,0	18,5	539,0	38,0

558	717074	276871	577,0	nein	*Singen	47,774 / 8,822	445,0	17,0	132,0
561	722444	277710	594,0	nein	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	3,5	-106,0
561	722444	277710	594,0	nein	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	21,5	55,0
561	722444	277710	594,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,5	151,5
562	722903	277818	607,0	nein	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	3,5	-93,0
562	722903	277818	607,0	nein	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	21,5	68,0
562	722903	277818	607,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	442,5	8,5	164,5
563	722647	277607	596,0	nein	Salen-Reutenen	718900 / 278900	700,0	3,5	-104,0
563	722647	277607	596,0	nein	Aadorf/ Tänikon	710515 / 259821	539,0	21,5	57,0
563	722647	277607	596,0	nein	*Konstanz	47,6774 / 9,1901	412,5	8,5	153,5
564	676153	261685	480,0	nein	Zürich / Kloten	682706 / 259337	426,0	7,0	54,0
565	676195	261600	479,0	nein	Zürich / Kloten	682706 / 259337	426,0	7,0	53,0
566	695538	249979	512,0	nein	Zürich-Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-44,0
567	695507	249909	511,0	nein	Zürich-Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-45,0
568	695761	249800	517,0	nein	Zürich-Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-39,0
569	695740	249828	517,0	nein	Zürich-Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-39,0
571	687221	259975	481,0	nein	Zürich / Kloten	682706 / 259337	426,0	5,0	55,0
572	692807	254888	527,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-29,0
573	692831	254837	532,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-24,0
574	692836	255016	516,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-40,0
575	692879	255143	518,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-38,0
577	675212	224221	453,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	-1,0
578	675129	224226	457,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	3,0
579	674109	217327	648,0	nein	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	23,0	163,0
580	674208	217476	647,0	nein	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	23,0	162,0
581	695475	249467	510,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	11,0	-46,0

582	695640	249428	515,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	11,0	-41,0
583	695619	249364	505,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	11,0	-51,0
584	698536	256423	654,0	nein	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	12,5	115,0
584	698536	256423	654,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	15,5	98,0
585	698628	256168	664,0	nein	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	12,5	125,0
585	698628	256168	664,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	15,5	108,0
586	698640	256256	662,0	nein	Aadorf / Tänikon	710515 / 259821	539,0	12,5	123,0
586	698640	256256	662,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	15,5	106,0
587	694866	246413	466,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-90,0
588	694766	246398	475,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-81,0
589	695032	246347	464,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	10,0	-92,0
590	689766	246706	591,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	5,0	35,0
591	689731	246649	592,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	5,0	36,0
592	689621	246725	592,0	nein	Zürich / Fluntern	685117 / 248062	556,0	5,0	36,0
593	664664	220078	526,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	10,0	72,0
594	664616	219951	530,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	10,0	76,0
595	676893	229964	449,0	nein	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	16,0	-36,0
596	676813	230062	443,0	nein	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	16,0	-42,0
597	676289	227838	415,0	nein	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	16,0	-70,0
598	676231	227906	415,0	nein	Wädenswil	693849 / 230708	485,0	16,0	-70,0
599	676966	222980	435,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	-19,0
600	677014	222862	437,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	-17,0
601	677057	222813	435,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	-19,0
602	678396	218707	417,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	-37,0
603	678526	218646	426,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	17,0	-28,0
604	672806	215616	612,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	9,0	158,0

605	672877	215716	614,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	9,0	160,0
606	659361	217344	551,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	10,0	97,0
607	659399	217210	553,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	10,0	99,0
608	658152	211956	614,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	7,5	160,0
609	658230	211884	608,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	7,5	154,0
610	658219	211934	610,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	7,5	156,0
611	660961	212613	533,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	79,0
612	660983	212536	525,0	nein	Luzern	665540 / 209848	454,0	5,0	71,0

Bezugssysteme der Koordinaten: CH1903+/LV95 bzw. CH1903/LV03 bzw. * WGS84 (lat/ lon) für deutsche Wetterstationen

Tabelle 19: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Bäume/Sträucher*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Bäume			
Ja	87	2	89
Nein	93	60	153

Tabelle 20: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Bodeneignung für Kulturland*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Bodeneignung für Kulturland			
sehr gute Produktion (Hangneigung < 25 %)	96	52	148
gute Produktion (Hangneigung < 25 %)	7	0	7
mäßige Produktion (Hangneigung < 25 %)	25	4	29
Ackerbau beeinträchtigt (Hangneigung Ø 25 %, max. 35 %)	26	2	28
ungeeignet	26	4	30

Tabelle 21: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Gesteinklassierung*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Gesteinklassierung			
Lockergesteine	95	32	127
Sedimentgesteine	85	30	115
Kristalline Gesteine	0	0	0
Gewässer, Seen	0	0	0
Gletscher, Firn	0	0	0

Tabelle 22: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Gewässer im Umkreis von 100 m*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Gewässer (im Umkreis von 100 m)			
Ja	150	8	158
Nein	30	54	84

Tabelle 23: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Gründigkeit*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Gründigkeit			
sehr flach	0	0	0
flach	0	0	0
mittel	83	12	95
tief	97	50	147
sehr tief	0	0	0

Tabelle 24: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Grundwasservorkommen 500*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Grundwasservorkommen 500			
ohne ergiebige	50	22	72
weniger ergiebige	111	28	139
ergiebige bis sehr ergiebige	19	12	31

Tabelle 25: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Grundwasserzusatz*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Grundwasserzusatz			
GW-Fassungen > 5000 l/ min; Flussinfiltration ins GW; bedeutende Vorkommen; tieferes GW-Stockwerk mit oder ohne Kontakt zu darübergelegenen	99	50	149
wichtige gefasste und ungefasste Quelle < 600 l/ min	13	0	13
Bruch; Kombination aus Bruch und tieferem GW-Stockwerk ohne Kontakt zu darüber gelegenen	39	12	51
wichtige gefasste und ungefasste Quelle > 600 l/ min	9	0	9
Grundwasserfassungen < 5000 l/ min	20	0	20

Tabelle 26: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Hanglagen Landwirtschaft*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Hanglagen Landwirtschaft			
Hangneigung < 18 %	98	59	157
Hangneigung 18 - 35 %	62	3	65
Hangneigung > 35 - 50%; Hangneigung > 50 %	20	0	20

Tabelle 27: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Hangwasseraustritt*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Hangwasseraustritt			
Ja	42	0	42
Nein	138	62	200

Tabelle 28: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Klimaeignung Übersicht*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Klimaeignung Übersicht			
Ackerbau und Spezialkulturen begünstigt	3	1	4
Futterbau und Ackerbau	69	22	91
Futterbau	30	27	57
Dauergrünland	78	12	90

Tabelle 29: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Lithologie Hauptgruppen*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Lithologie Hauptgruppen			
Konglomerate, Brekzien	40	7	47
Tone, Silte, Sande	83	33	116
Sandsteine, z.T. Mergel	34	6	40
Sande, Kiese, Gerölle	16	0	16
Mergelschiefer, Kalkphyllite; Kalksteine, z.T. Mergel; Mergel, z.T. Sandstein	7	16	23

Tabelle 30: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Nährstoffspeichervermögen*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Nährstoffspeichervermögen			
extrem gering	0	0	0
sehr gering	0	0	0
gering	7	0	7
mäßig	46	10	56
gut	127	52	179
sehr gut	0	0	0

Tabelle 31: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable Niederschlagshaushalt

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Niederschlagshaushalt			
sehr trocken, mäßig trocken	3	0	3
ausgeglichen	51	21	72
mäßig trocken bis mäßig feucht	19	2	21
mäßig feucht, feucht und unausgeglichen	38	27	65
mäßig bis sehr feucht, sehr feucht, sehr feucht und unausgeglichen	69	12	81

Tabelle 32: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable REN Feuchtgebiet

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
REN Feuchtgebiet			
keines	152	61	213
Kerngebiet Feuchtgebiete	5	0	5
Ausbreitungsgebiet Feuchtgebiete	4	0	4
Kontinuum Feuchtgebiete	19	1	20
Korridor Feuchtgebiete	0	0	0

Tabelle 33: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable REN Trockenstandort

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
REN Trockenstandort			
keines	175	62	237
Kerngebiet Trockenstandort	0	0	0
Ausbreitungsgebiet Trockenstandort	0	0	0
Kontinuum Trockenstandort	5	0	5
Korridor Trockenstandort	0	0	0

Tabelle 34: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable REN Wald

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
REN Wald			
Kerngebiet Wald	0	0	0
Ausbreitungsgebiet Wald	21	0	21
Kontinuum Wald	100	24	124
Korridor Wald	6	0	6
kein REN Wald	53	38	91

Tabelle 35: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Riet/Feuchtflächen*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Riet/ Feuchtflächen			
Ja	29	0	29
Nein	151	62	213

Tabelle 36: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Vernässung*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Vernässung			
keine	28	26	54
grundfeucht	41	27	68
schwach grundnass	88	9	97
grundnass	23	0	23

Tabelle 37: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Wald Bild*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Wald Bild			
im/ am Wald	51	1	52
Nähe Wald (< 200 m)	76	13	89
kein Wald	53	48	101

Tabelle 38: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Wasserdurchlässigkeit*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Wasserdurchlässigkeit			
stark gehemmt	0	0	0
gehemmt	47	0	47
schwach gehemmt	124	58	182
normal bis übermäßig	9	4	13

Tabelle 39: absolute Häufigkeiten innerhalb der Kovariable *Wasserspeichervermögen*

Kovariable/ Kategorien	y = 1	y = 0	gesamt
Wasserspeichervermögen			
extrem gering	0	0	0
sehr gering	0	0	0
gering	0	0	0
mäßig	41	8	49
gut	104	25	129
sehr gut	35	29	64

Tabelle 40: In grplasso und glmmLasso ausgewählte Regressionsparameter, geordnet nach absteigender Größe der Schätzer des grplasso-Modells

	grplasso	glmmLasso
Icept	6.0754	1.9789
Riet..Feuchtflächen	3.1833	0.2866
Hangwasseraustritt	2.8894	0.8263
Gewässer..100m.	2.5184	0.9888
Bäume	1.6874	0.5142
Grundwasser2	1.0572	0.0000
Wald.Bild3	0.7015	0.0000
Höhe..m.	0.5940	0.0000
Lithologie.Hauptgruppen3	0.4395	0.0000
Wald.Bild2	0.3364	0.0000
Bodeneignung.Kulturland2	0.2235	0.0000
Lithologie.Hauptgruppen4	0.1843	0.0000
KlimaeignungAckerbau	0.1818	0.0000
Wasserdurchlässigkeit2	0.1795	0.0000
Bodeneignung.Kulturland5	0.1542	0.0000
KlimaeignungFutterbau	0.1009	0.0000
Hanglagen.LW3	0.0759	0.0000
Wasserspeichervermögen4	0.0000	< 0.0001
Wasserspeichervermögen6	0.0000	-0.0417
Eistage-3	0.0000	0.0518
Temp5max<0-3	0.0000	0.0231
Temp200max>30-1	0.0000	-0.1142
Temp200mean>20-1	0.0000	-0.0732
Hanglagen.LW2	-0.0100	0.0000
KlimaeignungFutterbau und Ackerbau	-0.1034	0.0000
Gründigkeit4	-0.1119	-0.1332
Bodeneignung.Kulturland3	-0.1796	0.0000
Temp5max<0-1	-0.2543	0.0000
Bodeneignung.Kulturland4	-0.3570	0.0000
Wasserdurchlässigkeit4	-0.3799	0.0000
Temp5mean>20-1	-0.4010	-0.2997
Grundwasser3	-0.6096	0.0000
Lithologie.Hauptgruppen1	-0.7878	0.0000
Temp5min>15-1	-0.8943	0.0000
Lithologie.Hauptgruppen6	-0.9002	0.0000
Temp5mean<0-3	-0.9162	0.0000
Temp5mean<0-2	-1.5847	-0.4727
Hitzetage-1	-1.6773	-0.3951
$\hat{\sigma}_b$	-	0.6725

X. DANKSAGUNG

In jede hohe Freude mischt sich eine Empfindung der Dankbarkeit.

(Marie Freifrau von Ebner-Eschenbach, 1911)

Mein größter Dank gilt Frau Prof. Dr. Gabriela Knubben-Schweizer für die Anvertrauung eines spannenden Themas, das mir Herausforderung und Zugang zu neuen Fachgebieten jenseits der Tiermedizin zugleich war. Danke für diese Gelegenheit, über den Tellerrand der Buiatrik hinauszublicken, für die höchstkompetente Betreuung mit Herzblut und die hilfreichen Ratschläge, welche über das Thema der Arbeit weit hinausgingen. Danke für die Motivation und Ermutigung in kritischen Phasen und Deinen Beistand, unabhängig von jeglicher Mentoring-Vereinbarung.

Darüber hinaus danke ich Frau Prof. Dr. Francesca Biagini dafür, mir mit Dr. Andreas Groll einen Fels in der Brandung aller statistischen Weltmeere zur Seite gestellt zu haben. Lieber Andreas, ohne Dich wäre ich verloren gewesen. Ich bewundere Deine Fähigkeit, komplexe mathematische Zusammenhänge auch fachfremden Personen wie mir verständlich näherbringen zu können. Herzlichen Dank für Deinen Einsatz bei der Modellplanung, den Regressionsanalysen und der Suche nach dem perfekten Modell. Schön, dass wir einen gewissen Hang zur Pedanterie teilen und, dass Du trotz aller Länge des Projektes mit dabei geblieben bist.

Rhea Baggenstos danke ich sehr für die Überlassung von Daten aus ihrer Feldstudie und die ausführlichen Erläuterungen dazu.

Ferner bedanke ich mich bei Dr. sc. Tobias Dahinden, für die Unterstützung in kartografischen Fragen und Frau Prof. Dr. Miriam Dünforth für die Hilfestellung bei der Interpretation lithologischer Sachverhalte.

Den Bundesämtern für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, für Landestopographie swisstopo, für Landwirtschaft (BLW) und Umwelt (BAFU) sowie der Schweizerischen Geotechnischen Kommission (SGTK) und Agroscope danke ich für die Bereitstellung der erforderlichen Daten zu allen potenziellen Einflussgrößen. Ein Vergelt's Gott an all deren Mitarbeiter, die in unserer Korrespondenz stets höflich und ausführlich auf meine Fragen zu ihren

Fachgebieten und dem verwendeten Datenmaterial eingegangen sind. Zu ihnen zählen Patrick Aeby (Bundesamt für Landestopographie swisstopo), Stefan Bader (Abteilung Klima, Eidgenössisches Departement des Innern EDI, MeteoSchweiz), Milan Beres (Bundesamt für Landestopographie swisstopo), Donat Fulda (SGTK), Juerg Schenker (BAFU), Michael Sinreich (BAFU), Beat Tschumi (BLW), Peter Weisskopf (agroscope) und Adrien Zeender (BAFU).

Des Weiteren geht mein Dank an den Deutschen Wetterdienst für den Zugang zu wichtigen Temperaturdaten im Grenzgebiet zur Schweiz, im Besonderen Herrn Lothar Bock für seinen fachkundigen Ratschlag und den Verweis auf eine hilfreiche Publikation.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl für Physiologie und Pathologie der Fortpflanzung und in der Ambulanz danke ich dafür, dass sie mir während des Verfassens der Dissertation den Rücken freigehalten haben. Vielen Dank auch meinem Chef, Herrn Prof. Dr. Holm Zerbe, für die Rücksichtnahme auf meine „Doppelbelastung“.

Danke, lieber Herr Prof. Dr. Mansfeld, dass sie mich nach dem ersten wissenschaftlichen „Fehlstart“ dazu ermutigt haben nicht aufzugeben, an einer Hochschullaufbahn festzuhalten und mich für das Mentee-Programm zu bewerben.

Nicht vergessen möchte ich mein altes Doktorandenteam, welches mir wenigstens in Form zweier liebgewonnener Kollegen erhalten geblieben ist: Ihr seid mir alle zu wahren Freunden geworden und ich hoffe, dass diese Verbindung auch weiterhin über die geographischen Distanzen hinweg erhalten bleibt.

Schließlich möchte ich meiner Familie von ganzem Herzen danken: Für die allzeit richtige Mischung aus Empathie, Ansporn und kritischer Distanz, den unerschütterlichen Glauben an mich sowie für alle kulinarischen wie emotionalen Dienste in den letzten Monaten.

Danke, lieber Matthias, auch Dir für Deine Nachsicht, Deine Wärme und den Verzicht auf einige gemeinsame Stunden zugunsten der Wissenschaft oder des Klinikalltages.

Die Tugend des Alltags ist die Hoffnung, in der man das Mögliche tut und das Unmögliche Gott zutraut. (Karl Rahner)