

Räumlich hoch aufgelöste Modellierung
der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden
in der Nordwestschweiz

Faktorenbasierte Prognose mit einem Vergleich
von wissensbasierter und teilautomatisierter Abschätzung

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Geogr. Philipp Herbst

geboren am 18. April 1980 in Hannover

2013

Referent: Prof. Dr. Thomas Mosimann

Korreferent: Prof. Dr. Gerald Kuhnt

Tag der Promotion: 24. Januar 2013

*Alles, was die Natur selbst anordnet, ist zu irgendeiner Absicht gut.
Die ganze Natur überhaupt ist eigentlich nichts anderes,
als ein Zusammenhang von Erscheinungen nach Regeln;
und es gibt überall keine Regellosigkeit.*

- Immanuel Kant -

Vorwort

Diese Arbeit entstand am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Naturwissenschaftlichen Fakultät an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Seit 2004 hatte ich die Möglichkeit im Projekt *Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft* mitzuarbeiten. Die vorliegende Dissertation ist nun der vorläufige Abschluss einer langjährigen wissenschaftlichen Beschäftigung mit dem sehr interessanten Themenkomplex der modellgestützten Prognose von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz.

Ich möchte meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Thomas Mosimann ganz herzlich danken, dass er mir das spannende und praxisorientierte Forschungsthema dieser Arbeit anvertraut hat und mich seit dem Studium über viele Jahre gefördert, intensiv betreut und mir, wenn nötig, auch mal zur rechten Zeit einen väterlichen Rat erteilt hat. Herrn Prof. Dr. Gerald Kuhnt danke ich in besonderem Maße für das Interesse und die Unterstützung beim Entstehungsprozess meiner Dissertation und für die Übernahme des Korreferates.

Ein herzlicher Dank gebührt dem Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft und dort besonders Herrn Dr. Roland Bono und Herrn Daniel Schmutz für ihre große logistische Unterstützung bei der Geländearbeit, ihrem Interesse am Fortschritt des Projektes und die vielen interessanten Gespräche.

Herrn Dr. Jens Groß und Herrn Dr. Uwe Meer gebührt besonderer Dank. Zusammen haben wir an der geomorphographischen Reliefgliederung und den technischen Modellstrukturen gearbeitet. Sie haben mich fortwährend motiviert und durch ausführliche Diskussionen zum Fortschritt dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Dr. Jan Bug danke ich vielmals für die vielen motivierenden Gespräche und die Korrekturvorschläge nach der ersten Durchsicht dieser Arbeit. Frau Inga Bug war mir bei der Korrektur und Fertigstellung eine sehr große Hilfe. Ihr möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich danken. Gedankt sei auch meinen Arbeitskollegen am Institut. Sie haben es mir ermöglicht die Dissertation in einem sehr angenehmen Arbeitsumfeld zu verfassen und haben mich immer unterstützt.

Ein großes Dankeschön gilt Frau Brigitte Strübin, die mich während der zahlreichen Aufenthalte im Baselland sehr herzlich bei sich in Liestal aufgenommen hat und bei der ich mich immer sehr wohl gefühlt habe.

Meinen Eltern, Frau Carmen Herbst und Herrn Dr. Lutz-Harald Herbst, sowie meinen Großeltern möchte ich besonders herzlich danken. Sie haben mir meinen bisherigen Werdegang ermöglicht und standen mir immer mit Interesse, Rat und Tat und liebevollem Beistand zur Seite. Meiner Freundin Chantal Spitzer danke ich von ganzem Herzen dafür, dass sie in den letzten Jahren, und besonders in den letzten zurückliegenden Monaten, ihre eigenen Interessen vollkommen zurück gestellt und mir während meiner Arbeit an dieser Dissertation fortwährend liebevoll den Rücken gestärkt und mich immer unterstützt hat.

Kurzfassung

Für viele Gebiete der Schweiz fehlen flächendeckende Angaben zu den Eigenschaften von Waldböden und dem standörtlichen Wasserhaushalt. Diese Informationen sind für die Waldbewirtschaftung und den Umweltschutz jedoch von großer Bedeutung. Um für weite Gebiete Bodenkarten zeitnah verfügbar zu machen, gelangen modellgestützte Verfahren zur Regionalisierung von Bodeninformationen verstärkt zum Einsatz.

In dieser Arbeit erfolgt die hoch aufgelöste Prognose der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden mit wissensbasierter und teilautomatisierter Modellierung. Die Modellergebnisse werden lagebezogen miteinander verglichen. Die Wasserspeicherkapazität (FK/nFK) wird aus einem großen Satz vielfältiger Prädiktoren abgeleitet (v.a. Reliefformen, Gestein, Vegetation, Position). Reliefformen sind hierbei eine der wichtigsten Standortfaktoren für die räumliche Differenzierung des Wasserspeichervermögens und der sie beeinflussenden Bodeneigenschaften. Deshalb wurden mit einer komplexen Reliefgliederung 19 Reliefformtypen modelliert, die sich als maßgebliche Prädiktoren für die standörtliche Wasserversorgungssituation erwiesen haben.

Das methodische Konzept der wissensbasierten Modellierung kombiniert einen häufigkeitsstatistischen Ansatz mit Erfahrungswissen. Die Entwicklung umfangreicher Entscheidungsbäume ermöglicht eine Abschätzung des Wasserspeichervermögens für 75 % der Waldfläche in der Nordwestschweiz (ca. 204 km²). Die räumliche Differenzierung der Prognosen ist hoch und entspricht der bestmöglichen Auflösung gemäß der verfügbaren Daten und der regionsspezifisch erreichbaren Modellkalibrierung. Für ein Viertel der Waldfläche ist bisher keine wissensbasierte Aussage zur Wasserspeicherfähigkeit möglich. Ursachen sind v.a. die hohe Heterogenität der Böden, kleine Stichproben und fehlende Prädiktoreninformationen.

Die teilautomatisierte Modellierung des Wasserspeichervermögens erfolgt mit Random Forest (RF). Nur auf rund 50 % der Waldfläche kann Random Forest für die Standortbedingungen räumlich plausible Vorhersagen der nFK leisten. In den übrigen Waldbereichen treten verbreitet Fehlprognosen, nicht nachvollziehbare Verteilungsmuster und inkonsistente Vorhersagen auf. Die vorliegende Punktdichte von 0,6 Bodenprofilen pro km² reicht für RF nicht mehr aus, um in einem vielfältigen Naturraum wie dem Jura eine flächendeckend hoch aufgelöste und belastbare Prognose liefern zu können.

Der Modellvergleich zeigt eine geringe lagebezogene Übereinstimmung (40 %) und belegt, dass die Prognosen der wissensbasierten Modellierung den teilautomatisierten Vorhersagen grundsätzlich vorzuziehen sind. Das wissensbasierte Modell liefert für einen deutlich höheren Flächenanteil räumlich plausibel differenzierte Verteilungen der nFK-Werte und die Aussage-sicherheit der Prognosen ist insgesamt höher als bei RF. Dies gilt insbesondere für die Waldböden mit kritischen nFK-Werten unter 80 mm. Die wissensbasierten Modellierungsergebnisse sind für weiterführende ökologische Fragestellungen anwendbar. Im Gegensatz dazu ist eine weitere Verwendung der teilautomatisierten Prognosen nur empfehlenswert, wenn diese zuvor mit den wissensbasierten Vorhersagen überprüft wurden.

Stichworte: Waldböden, Bodeneigenschaften, Wasserspeicherfähigkeit, Reliefmodellierung, wissensbasierte Modellierung, Random Forest, digitale Bodenkartierung.

Abstract

There is a lack of comprehensive data on forest soil properties and on water balance capacities for many areas in Switzerland. This data however is very important for forestry management and environmental protection measures. Model-based methods for regionalization of soil information are increasingly being implemented to quickly obtain more soil maps of larger areas.

This thesis paper describes the high resolution prediction of water storage capacities of forest soils by using newly developed knowledge-based as well as semi-automated modeling procedures. The modeled results were compared to each other in regard to position. The water storage capacity of soils (FK/nFK) was derived from a large set of different predictors (in particular landforms, rock type, vegetation, position). The predictor landform is especially important for the spatial differentiation of water storage capacities and of soil properties. Therefore a complex terrain classification approach was used to model 19 landform elements. These landform elements proved to be key predictors for local water supplies.

The methodological concept behind the knowledge-based modeling scheme is a statistical probability approach combined with expertise. The development of comprehensive decision trees enabled an assessment of water storage capacities for 75 % of the forested area in Northwestern Switzerland (approx. 204 km²). The spatial differentiation of the predictions was high and conformed to the highest possible resolution based on available data and regional model calibrations. The water storage capacity of about one-fourth of the forested area could not be assessed, especially because of high soil heterogeneity, small sample sizes and inadequate predictor information.

The semi-automated modeling of water storage capacities is based on Random Forest (RF). Random Forest was able to make spatially plausible predictions for nFK for only about 50 % of the forested areas. Faulty forecasts, incomprehensible distribution patterns and inconsistent predictions were the result for the other half. The sample point density of 0.6 soil profiles per km² is insufficient for RF to provide comprehensive high-resolution and reliable predictions for such a diverse environment such as the Swiss Jura.

The comparison of both approaches shows a low position-related correspondence (40 %) and verifies that the predictions of the knowledge-based approach are superior to those of the semi-automated approach. The knowledge-based model approach provides spatially plausible and differentiated nFK values for a notably larger area. The reliability of the predictions is also higher than RF, especially for forest soils with critical values under 80 mm nFK. The results of the knowledge-based approach can be applied to ecological issues. The results of semi-automated approaches are only recommendable when verified by knowledge-based predictions.

Key words: forest soils, soil properties, water storage capacity, digital terrain modeling, knowledge-based modeling, Random Forest, digital soil mapping.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden - Ausgangspunkt, Fragestellung und Ziele der Arbeit	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Räumliche Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	8
2 Methodisches Vorgehen und Daten	12
2.1 Grundkonzept der Arbeit	12
2.2 Datengrundlage	14
2.2.1 Waldbodendaten	14
2.2.2 Untersuchungsmethoden zur Erfassung einzelner Bodenmerkmale	15
2.2.3 Pedotransferfunktion zur Ableitung der Wasserspeicherfähigkeit	16
2.2.4 Geodaten	19
2.3 Konzept der wissensbasierten empirisch-statistischen Modellierung	20
2.3.1 Theoretische Grundlage	20
2.3.2 Prinzipielles Vorgehen der Modellentwicklung	23
2.4 Random Forest	26
2.5 Technische Modellumsetzung	27
3 Geomorphographische Reliefgliederung für die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften	30
3.1 Grundgedanken und Zielsetzungen	30
3.2 Reliefmodellierung	31
3.2.1 Konzeption der Reliefgliederung	31
3.2.2 Modellierung der Reliefparameter	32
3.2.3 Überprüfung der Modellierungsergebnisse	33
3.3 Ergebnisse und Diskussion	35
3.3.1 Hierarchie und Abgrenzung der Reliefformen für die Bodenvorhersage	35
3.3.2 Morphographische Reliefgliederung der unterschiedlichen Landschaftstypen	36

3.3.3	Quantitative Zusammenhänge zwischen modellierten Reliefformtypen und Bodeneigenschaften	39
3.3.3.1	Gründigkeit	39
3.3.3.2	Skelettgehalt	40
3.3.3.3	Wasserspeichervermögen	41
3.3.4	Gegenüberstellung von morphographischer Detailgliederung und modellgestützten Prognosen von Bodeneigenschaften	42
3.4	Fazit und Schlussfolgerungen	45
4	Stichprobendaten und Prädiktoren für die Prognose der Wasserspeicherfähigkeit	47
4.1	Speicherfähigkeitswerte der Waldbodenprofile	47
4.2	Gesteinstypen und -gruppen	51
4.3	Pflanzenökologische Feuchte- und Reaktionsstufen	53
4.4	Physiologische Gründigkeit und Skelettgehalt der Böden	54
5	Wissensbasierte empirisch-statistische Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit	57
5.1	Prämissen für die Modellierung	58
5.2	Modellentwicklung	59
5.2.1	Übersicht zu den Prädiktoren	59
5.2.2	Grundstruktur der entscheidungsbasierten Prognosemodelle	62
5.2.3	Verfahrensweise bei den Prädiktorenkombinationen mit kleinen Stichproben oder fehlenden Werten zur Wasserspeicherfähigkeit	66
5.2.4	Modellkonstruktion für das Lösshügelland und die Talböden	68
5.2.4.1	Lösshügelland	68
5.2.4.2	Talböden	70
5.2.5	Modellkonstruktion im Jura	72
5.2.5.1	Prüfung der Prognostizierbarkeit von Prädiktorenkombinationen	72
5.2.5.2	Abschätzung und kritische Betrachtung fehlender Wasserspeicherfähigkeitswerte an den Endknoten der Entscheidungsbäume	74
5.3	Überprüfung der ersten Modellprognosen im Gelände und Modellanpassung	76
5.3.1	Datenerhebung und Feldbegehung	77
5.3.2	Prüfung von Grenzverläufen bei markanten Wechseln der prognostizierten Wasserspeicherfähigkeit	78
5.3.3	Differenziertere Abbildung von Standorten mit geringen Wasserspeicherfähigkeitswerten	80
5.4	Die Karten der Wasserspeicherfähigkeit als Ergebnis der wissensbasierten Modellierung	82
5.4.1	Übersicht zur Gesamtkarte	82
5.4.2	Prognose der nFK in den drei Bodenregionen	85
5.4.3	Lagebezogene Übereinstimmung von Modellprognosen und Bodenprofilaten	91

5.4.4	Bedeutung der einzelnen Prädiktoren in der Prognose und von den Prädiktoren abhängige Fehler	92
5.4.4.1	Reliefformtypen	92
5.4.4.2	Gesteinstypen und -gruppen	94
5.4.4.3	Pflanzenökologische Feuchtestufen	96
5.5	Zusammenfassende Bemerkungen zur Leistungsfähigkeit und den Grenzen des entwickelten Modells	97
6	Vorhersage des Wasserspeichervermögens mit Random Forest	99
6.1	Entwicklung der Random Forest-Modelle	100
6.1.1	Teilautomatisierte Modellkonstruktion und Kalibrierung	100
6.1.2	Modellparameter und Einschätzung der Modellqualität	102
6.2	Die Karten der Wasserspeicherfähigkeit als Ergebnis der Random Forest-Modellierung	104
6.2.1	Übersicht zur Gesamtkarte	104
6.2.2	Prognosen der nFK in den drei Bodenregionen	107
6.2.3	Lagebezogene Übereinstimmung von Modellprognosen und Bodenprofilaten	112
6.2.4	Betrachtung kritischer Bereiche der teilautomatisierten Prognosen und deren mögliche Ursachen	114
6.3	Fazit zur teilautomatisierten Modellierung mit Random Forest	116
7	Vergleich der wissensbasierten Prognosen mit den Ergebnissen der teilautomatisierten Modellierung	118
7.1	Grundlagen für die Vergleichbarkeit der Modellvorhersagen	118
7.2	Flächenbilanz der Übereinstimmung der beiden Modellierungsansätze	119
7.3	Lagebezogene Unterschiede der Modellprognosen und Bemerkungen zu den Gründen	121
8	Methodische Folgerungen	126
8.1	Wie beeinflusst die Auflösung der Prädiktoreninformationen die räumliche Prognose der Wasserspeicherfähigkeit?	126
8.2	Grenzen für die Modellierung des Wasserspeichervermögens	128
8.3	Gesamtbewertung und Schlussfolgerungen	131
9	Ausblick	135
10	Quellenverzeichnis	137
Anhang		147

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Untersuchungsgebiet mit Bodenregionen und Lage der Waldbodenprofile	9
Abb. 2	Konzept und Aufbau der Arbeit	13
Abb. 3	Schema der Pedotransferfunktion zur Abschätzung des Wasserspeichervermögens für Prädiktorenkombinationen für die keine ausreichenden Stichprobendaten vorliegen	17
Abb. 4	Komponenten des wissensbasierten Modells für die Prognose von Bodeneigenschaften	21
Abb. 5	Der Weg zum entscheidungsbasierten Vorhersagemodell	24
Abb. 6	Vereinfachtes Schema zum Ablauf der Modellierung mit Random Forest	26
Abb. 7	Schema der technischen Modellumsetzung und GIS-Kopplung	28
Abb. 8	Konzeptionelle Vorgehensweise der digitalen Relieffanalyse	32
Abb. 9	Reliefeinheiten und -formtypen der zweistufigen hierarchischen morphographischen Haupt- und Detailgliederung im Jura	35
Abb. 10	Ausschnitte der morphographischen Relieffgliederung aus der Modellregion Jura	37
Abb. 11	Boxplots der Bodeneigenschaften für die Reliefformtypen der Detailgliederung in der Modellregion Jura	40
Abb. 12	Gegenüberstellung von morphographischer Detailgliederung und wissensbasierter Modellprognose der Gründigkeit für einen Kartenausschnitt im östlichen Tafeljura	43
Abb. 13	Gegenüberstellung der wissensbasierten Modellprognosen von Skelettgehalt und nutzbarer Feldkapazität für einen Kartenausschnitt im östlichen Tafeljura	44
Abb. 14	Häufigkeitsverteilung der Stichprobe der nutzbaren Feldkapazität mit Normalverteilungskurve und Klassifikation für die Modellentwicklung	48
Abb. 15	Häufigkeitsverteilung der Stichprobe der Feldkapazität mit Normalverteilungskurve und Klassifikation für die Modellentwicklung	48
Abb. 16	Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Klassen der nutzbaren Feldkapazität in den drei Bodenregionen	49
Abb. 17	Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Klassen der Feldkapazität in den drei Bodenregionen	49
Abb. 18	Petrographische Gesteinstypen und -gruppen im Tafeljura zwischen Diepflingen und Tecknau	52
Abb. 19	Nutzbare Feldkapazität in Abhängigkeit von Gründigkeit und Skelettgehalt	55
Abb. 20	Konzept und Ablauf der wissensbasierten empirisch-statistischen Modellentwicklung und Prognose	57
Abb. 21	Verwendete Prädiktoren für die Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden	61
Abb. 22	Vereinfachte Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der Prognosemodelle der nutzbaren Feldkapazität	63

Abb. 23	Lage der Kartiergebiete und der Bohrpunkte der Feldkartierung im Kanton Baselland	77
Abb. 24	Gegenüberstellung von markanten Grenzverläufen in der Gesteinstypenkarte und der Modellprognose der nutzbaren Feldkapazität für einen Kartenausschnitt im Tafeljura westlich von Bubendorf	78
Abb. 25	Vereinfachter Profilschnitt der Substratsituation am Schällenberg (Gebiet Waldenburg, Faltenjura)	79
Abb. 26	Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der nFK (Abschätzung im Feld)	81
Abb. 27	Ergebniskarte der wissensbasierten Prognose der nutzbaren Feldkapazität der Waldböden in den Kantonen BL und BS	83
Abb. 28	Legende der Ergebniskarten der wissensbasierten Modellierung der nutzbaren Feldkapazität	84
Abb. 29	Flächenanteile der wissensbasiert prognostizierten Stufen nutzbarer Feldkapazität	85
Abb. 30	Flächenbilanzen der wissensbasiert prognostizierten nutzbaren Feldkapazität in den Bodenregionen	86
Abb. 31	Wissensbasierte Prognose der nutzbaren Feldkapazität im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz	87
Abb. 32	Wissensbasierte Prognose der nutzbaren Feldkapazität für die Beispielgebiete Diepflingen – Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura)	88
Abb. 33	Flächenbilanzen der wissensbasiert prognostizierten nutzbaren Feldkapazität für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura	89
Abb. 34	Bedeutung der Scheitel auf Plateaus zur Abgrenzung geringer nFK auf Tonmergeln und Juranagelfluh	93
Abb. 35	Einfluss der pflanzenökologischen Feuchtestufen auf die wissensbasierten Modellprognosen	96
Abb. 36	Konzept und Ablauf der teilautomatisierten Modellentwicklung und Ausgabe der Prognosekarten	99
Abb. 37	Verlauf des OOB error für die Prognose der nFK-Klassen und für den gesamten Random Forest in Abhängigkeit von der Anzahl an Entscheidungsbäumen im Ensemble	101
Abb. 38	Variable importance measures des kalibrierten Random Forest-Modells für die Prognose der nFK	102
Abb. 39	Ergebniskarte der Prognose der nutzbaren Feldkapazität der Waldböden mit Random Forest in den Kantonen BL und BS.	105
Abb. 40	Legende der Ergebniskarten der Prognose der nutzbaren Feldkapazität mit Random Forest	106
Abb. 41	Flächenanteile der Stufen der prognostizierten nutzbaren Feldkapazität (Random Forest - Prognose)	106
Abb. 42	Flächenbilanzen der nutzbaren Feldkapazität prognostiziert mit Random Forest in den Bodenregionen	107

Abb. 43	Prognose der nutzbaren Feldkapazität mit Random Forest im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz	108
Abb. 44	Prognose der nutzbaren Feldkapazität mit Random Forest für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura)	110
Abb. 45	Flächenbilanzen der prognostizierten nutzbaren Feldkapazität (Random Forest) für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura	111
Abb. 46	Flächenanteile übereinstimmender und abweichender Prognosen der nutzbaren Feldkapazität mit wissensbasierten und teilautomatisierten Vorhersagen	119
Abb. 47	Abweichungen der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura)	122
Abb. 48	Legende der Karte der Abweichung der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage	123
Abb. 49	Flächenbilanzierung abweichender nFK-Prognosen im Tafel- und Faltenjura (RF / Wissensbasiert)	123
Abb. 50	Häufigkeitsverteilungen der Modellprognosen der nFK auf der gesamten Waldfläche im Vergleich mit den Häufigkeitsverteilungen auf den Flächen mit wissensbasierter Aussage und mit einer <i>CPE</i> über 50 % (Random Forest)	116

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Mindestanforderungen an die Bodenprofil Datensätze zur Verwendung für die Modellentwicklung	14
Tab. 2	Stichproben mit den jeweiligen Mindestanforderungen an die Datengrundlage	15
Tab. 3	Verwendete Geodaten in Form von Vektor- und Rasterdatensätzen	19
Tab. 4	Liste der verwendeten geomorphometrischen Reliefparameter	33
Tab. 5	Modellierte Reliefeinheiten und -formtypen mit Abgrenzungskriterien für die grundlegenden geomorphometrischen Reliefparameter	34
Tab. 6	Mittelwerte und Standardabweichungen der Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt und Wasserspeichervermögen für die Reliefformtypen der Detailgliederung in der Modellregion Jura	41
Tab. 7	Einstufung der pflanzenökologischen Feuchte- und Reaktionsstufe	53
Tab. 8	Klassen der prognostizierten Gründigkeit und des Skelettgehalts	56
Tab. 9	Übersicht zu den Prädiktoren für die räumliche Modellierung der einzelnen Waldbodeneigenschaften	60
Tab. 10	Auflistung der regionsspezifisch verwendeten Prädiktoren und Schwellenwerte in den wissensbasierten Modellen der drei Bodenregionen	65
Tab. 11	Nutzbare Feldkapazität der Waldbodenprofile im Lösshügelland differenziert nach modellrelevanten Reliefeinheiten und Substratbedingungen	69
Tab. 12	Nutzbare Feldkapazität der ungestörten und gestörten Waldbodenprofile auf den Schotterebenen in der Bodenregion Talböden	71
Tab. 13	Auszüge aus der Tabelle zur Einstufung der Prognostizierbarkeit von Prädiktorenkombinationen im Modellbereich Jura	73
Tab. 14	Lagebezogene Übereinstimmung der statistisch-begründeten Modellprognosen der nFK mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile	91
Tab. 15	Probleme der Modellierung durch ungenaue und fehlende Informationen zu den Gesteinstypen	95
Tab. 16	Verwendete Parameter für die iterative Kalibrierung der Random Forest-Modelle	100
Tab. 17	Modellparameter der kalibrierten Random Forest-Modelle für die Prognose von nFK und FK	103
Tab. 18	Lagebezogene Übereinstimmung der Prognosen der nutzbaren Feldkapazität von Random Forest mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile	113
Tab. 19	Gründe für problematische Fälle und Fehler bei der Modellierung mit Random Forest	115

Tab. 20	Gütemaße des lagebezogenen Vergleichs der wissensbasierten Modellierung der nFK mit den Random Forest-Prognosen. Bezug: wissensbasiert prognostizierbare Waldflächen	120
Tab. 21	Gründe für die Ausweisung von Flächen ohne Prognose beim wissensbasierten Modell	129

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ArcGIS	Geographisches Informationssystem von ESRI
BL	Kanton Basel-Landschaft
BS	Kanton Basel-Stadt
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CART	Classification and Regression Trees
CPE	Class probability estimates (Random Forest)
DGM	Digitales Geländemodell
d.h.	das heißt
D8	Deterministic 8 (single-flow Algorithmus)
DSM	Digital Soil Mapping (Digitale Bodenkartierung)
et al.	et alii (und andere)
FK	Feldkapazität (in mm)
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geographische Informationssysteme
GK	Geologische Karte
GOF	Geländeoberfläche
i.d.R.	in der Regel
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
k.A.	keine Angabe
Kap.	Kapitel
ME	Mean Error (Mittlerer oder systematischer Fehler)
nFK	Nutzbare Feldkapazität (in mm)
OOB	out of bag cases (Random Forest)
OOB error	out of bag estimate of error rate (Random Forest)
PGDB	Personal Geodatabase
PTF	Pedotransferfunktion
R	R: A Language and Environment for Statistical Computing
RF	Random Forest (Modelle)
RMSE	Root Mean Square Error (Quadratwurzel aus mittl. quadratischem Fehler)
s.	siehe
SAGA	System for Automated Geoscientific Analysis
Tab.	Tabelle
TK	Topographische Karte
URL	Uniform Resource Locator
v.a.	vor allem
VAT	Value Attribute Table
vgl.	vergleiche
VIM	Variable importance measures (Random Forest)
Vol.-%	Volumen in Prozent
z.B.	zum Beispiel
(-)	dimensionslos

1 Einleitung

1.1 Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden - Ausgangspunkt, Fragestellung und Ziele der Arbeit

Wälder bedecken weltweit derzeit noch etwa 31 % der Landfläche (FAO 2011). Die Vereinten Nationen haben zu ihrem Schutz aufgerufen und das Jahr 2011 zum *Internationalen Jahr der Wälder* erklärt (UN 2011). Die Erhaltung der Wälder und ihrer ökologischen Multifunktionalität kann auf globaler, regionaler und lokaler Ebene aber nur gelingen, wenn auch die Waldböden, als elementare Grundlage eines vitalen und ertragreichen Waldes, langfristig erhalten bleiben.

Waldböden sind dabei viel mehr als nur ein maßgeblicher Produktionsfaktor für die Forstwirtschaft. Mit ihren wichtigen ökologischen Funktionen wie Filterung des Sickerwassers, Transformation von aus der Atmosphäre eingetragenen Schadstoffen, Grund- und Quellwasserschutz, Abflussregulation, Speicherung klimarelevanter Spurengase und nicht zuletzt als Lebensraum, gehören die Waldböden als Teil des Waldökosystems zu den wichtigsten natürlichen Ressourcen (MOSIMANN ET AL. 2011). Sie sind damit ein bedeutsames Element des Landschaftshaushaltes. Aus diesen Gründen hat die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz das *Internationale Jahr der Wälder* zum Anlass genommen, den Waldboden zum *Boden des Jahres 2011* zu küren (BGS 2010). Damit fällt die Fertigstellung der vorliegenden Arbeit in eine Zeit, in der das Bewusstsein der breiteren Öffentlichkeit über die Bedeutung und Schutzbedürftigkeit nicht nur der Wälder, sondern auch ihrer Böden, gestärkt werden soll.

Unter den verschiedenen bodenphysikalischen und -chemischen Merkmalen der Waldböden ist das Wasserspeichervermögen eine besonders wichtige Eigenschaft. Mit den sich bereits abzeichnenden Niederschlagsveränderungen und der zunehmenden Wahrscheinlichkeit länger anhaltender Trockenphasen durch den Klimawandel (CH2011 2011), kommt dem Waldboden als Wasserspeicher und damit als ausgleichendes Medium für die Wasserversorgung, eine immer größere Bedeutung zu. Von der Verfügbarkeit des Bodenwassers sind die Existenzmöglichkeiten vieler mitteleuropäischer Baumarten und die Vitalität der Wälder sehr stark abhängig (KÖLLING & FALK 2010).

Für die lokal angepasste Entwicklung der Wälder, die schonende forstwirtschaftliche Nutzung und den Umweltschutz sind flächendeckend hochaufgelöste Kenntnisse über die Eigenschaften von Waldböden eine immer wichtigere Planungsgrundlage. Leider fehlen diese Informationen in Form von Bodenkarten noch für viele Waldgebiete, so auch in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Gleichzeitig werden großflächig detaillierte Geländekartierungen für die zuständigen Einrichtungen immer schwieriger finanzierbar und dauern lange. Deshalb hat in den letzten Jahren eine Entwicklung hin zur modellgestützten Erstellung von Bodenkarten eingesetzt. Dabei werden statistische Zusammenhänge zwischen den Bodeneigenschaften und der räumlichen Ausprägung der bodenbeeinflussenden Faktoren (z.B. Relief, Gestein) ermittelt. So lassen sich systematische Aussagen über die räumliche Differenzierung der Bodeneigenschaften ableiten.

In diesem Zusammenhang wurden im süddeutschen Raum, in Österreich und in der Schweiz bereits mit unterschiedlichen Regionalisierungsverfahren (z.B. Geostatistik, Regressionsstatistik, Entscheidungsbäume) Karten von Bodeneigenschaften erstellt (z.B. EGLI ET AL. 2005, FVA 2009, HOFMANN ET AL. 2009, KELLER ET AL. 2011, LWF 2011). Für die Wälder des Kantons Basel-Landschaft in der Nordwestschweiz liegen Karten der Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt, Vernässung und Azidität vor (MOSIMANN ET AL. 2011). Das methodische Konzept dieser faktorenbasierten Modellierung kombiniert einen häufigkeitsstatistischen Ansatz mit Expertenwissen. Karten zur Wasserspeicherfähigkeit fehlen bisher noch. Diese wichtige Informationslücke will die vorliegende Arbeit schließen.

In den letzten Jahren finden Methoden der automatisierten selbstständigen Mustererkennung (*machine learning*) für die Generierung und Regionalisierung von Bodenprognosen immer häufiger Verwendung (GRUNWALD 2009). In dieser Arbeit sollen deshalb Prognosemodelle der Wasserspeicherfähigkeit mit einem wissensbasierten empirisch-statistischen Ansatz und mit Hilfe des teilautomatisierten Random Forest-Algorithmus (BREIMAN 2001) entwickelt und die Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Ein Kernaspekt der Arbeit liegt in der Formulierung von Restriktionen für die modellgestützte Prognose des Wasserspeichervermögens. Denn die immer begrenzte Anzahl an standörtlichen Bodeninformationen und die vielfältigen und kleinräumigen Variationen des Naturraums, begrenzen für bestimmte räumliche Konstellationen unabdingbar die Prognostizierbarkeit von Bodeneigenschaften. Diese Grenzen gilt es für das Untersuchungsgebiet in der Nordwestschweiz aufzuzeigen. Zudem gibt es bisher nur wenig Erfahrungen über die Verlässlichkeit von automatisierten Modellprognosen im flächendeckenden Vergleich mit den Vorhersagen expertenbasierter Modelle (HERBST & MOSIMANN 2010). Die Belastbarkeit automatisierter Vorhersagen wird tendenziell überschätzt. Die Beurteilung der Prognosequalität erfolgt häufig modellgestützt, beruht auf Stichproben, die auch für die Modellentwicklung dienen oder vergleicht Punkt- mit Flächeninformationen (LAGACHERIE 2008). Die Aussagekraft dieser Validierungen zur flächendeckenden Plausibilität der Modellvorhersagen ist gering.

Durch umfangreiche Analysen der beiden Modellierungsverfahren und ihrer Prognosen, soll die Arbeit weiterführende Erkenntnisse zu diesen offenen methodischen Fragen liefern. Die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit sollen am Beispiel des nordwestschweizer Juras aufgezeigt und belastbare Prognosekarten für die gesamte Waldfläche des Kantons Basel-Landschaft (rund 204 km²) erstellt werden.

Vor diesem Hintergrund lassen sich die Kernfragen dieser Arbeit wie folgt formulieren:

- Mit welchem Verfahren können Reliefformtypen ausgewiesen werden, von denen die Bodeneigenschaften maßgeblich abhängen?
- Welche flächendeckend verfügbaren Prädiktoren eignen sich gut oder hinreichend, um die Wasserspeicherfähigkeit im Untersuchungsgebiet zu prognostizieren?
- Mit welcher räumlichen Auflösung und mit welcher Aussagesicherheit lässt sich das Wasserspeichervermögen mit einem wissensbasierten Modell prognostizieren?

- Reicht die vorhandene Bodenprofilstichprobe für eine flächendeckende Vorhersage der Wasserspeicherefähigkeit mit Random Forest aus?
- Welches sind die inhaltlichen und naturräumlichen Restriktionen bei der faktorenbasierten Regionalisierung des Wasserspeichervermögens?
- Wie belastbar sind die Modellvorhersagen und welches Modell liefert die plausibelsten Prognosen des Wasserspeichervermögens im Untersuchungsgebiet?

Zur Beantwortung dieser Fragen, hat sich die vorliegende Arbeit folgende Ziele gesetzt:

1. Eine GIS-gestützte Reliefgliederung, ausgerichtet auf die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften im Jura.
2. Wissensbasierte empirisch-statistische Modellierung der Wasserspeicherefähigkeit für die Waldflächen des Untersuchungsgebietes.
3. Teilautomatisierte Prognose des Wasserspeichervermögens der Waldböden mit Random Forest.
4. Lagebezogener Vergleich der Ergebnisse wissensbasierter Modellierung mit den teilautomatisierten Vorhersagen.
5. Möglichkeiten und Restriktionen für die Anwendbarkeit der beiden Modellierungsverfahren nennen.
6. Kritische Beurteilung der Belastbarkeit der Modellprognosen im nordwestschweizerischen Jura.

1.2 Stand der Forschung

Das Bodenwasser ist von zentraler Bedeutung für die Entwicklung und den Bestand von Waldökosystemen, denn nahezu alle bodenchemischen, -physikalischen und -biologischen Vorgänge sind an das Vorhandensein von Wasser gebunden (HANGEN & SCHERZER 2005). Das Wachstum der mitteleuropäischen Hauptbaumarten reagiert in einem sehr weiten Nährstoffrahmen vorrangig auf den Wasserhaushalt (ELLENBERG 1996, GAUER ET AL. 2011). Um den Wasserhaushalt von Waldböden so gut wie möglich erfassen und das pflanzenverfügbare Wasserangebot abschätzen zu können, sind deshalb neben den Informationen über den Niederschlag und die Evapotranspiration, Kenntnisse über die Wasserspeicherefähigkeit der Böden unerlässlich (KÖLLING & FALK 2010).

Kennwerte für das Wasserspeichervermögen

Für die Betrachtung des Wasserspeichervermögens sind dabei die bodenhydraulischen Kennwerte *Feldkapazität* (FK) und *nutzbare Feldkapazität* (nFK) von wesentlicher Bedeutung. Als FK wird jene Bodenwassermenge je Volumeneinheit Boden verstanden, die ein Boden in ungestörter Lage bei einer Saugspannung von pF 1,8 (BLUME ET AL. 2002) maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Die nFK (pF 1,8 - 4,2) (AD-HOC-AG BODEN 2005) ist der maximale Wert der pflanzlichen Wasserversorgung je Volumeneinheit Boden (KUNTZE ET AL. 1994). Die nFK ist im deutschsprachigen Raum damit allgemein als die Differenz der

volumetrischen Wassergehalte zwischen FK (pF 1,8) und permanenten Welkepunkt (pF 4,2) definiert (AD-HOC-AG BODEN 2005, RUSS & RIEK 2011).

Die Abschätzung des Wasserspeichervermögens erfolgt in dieser Arbeit nach AD-HOC-AG BODEN (2005) in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohdichte unter Einbezug von Gründigkeit und Skelettgehalt für eine standardisierte Bezugstiefe von 100 cm. Diese Normierung macht einen Vergleich der Speicherfähigkeit verschiedener Standorte möglich und umfasst den Hauptwurzelraum sowie den wichtigeren Teil des Nebenwurzelraums der Waldbäume (MOSIMANN 2011). Die oberen 100 cm des Bodens erfassen zudem den Großteil der von RAISSI ET AL. (2009) zusammengefassten, durch verschiedene Verfahren ermittelten effektiven Durchwurzelungstiefen von Forststandorten und schließen auch den Betrachtungsraum für das Wasserregime (i.d.R. 60 cm Tiefe) zur forstlichen Standortkartierung mit ein (AKS 2003, GAUER 2009).

Entwicklung und Anwendung von Pedotransferfunktionen

Eine messtechnische Erfassung bodenhydraulischer Parameter ist in der Praxis insbesondere für Waldböden nur mit sehr hohem Aufwand möglich (SCHRAMM ET AL. 2006). Für die realistische Abschätzung des Wasserspeichervermögens werden deshalb Pedotransferfunktionen (PTF) benötigt (HANGEN & SCHERZER 2005). Hierbei handelt es sich um numerische Simulations- und Rechenmodelle, mit deren Hilfe auf der Grundlage bekannter bodenphysikalischer Merkmale eine Berechnung der erforderlichen bodenhydraulischen Kennwerte erfolgt (WÖSTEN ET AL. 2001, HANGEN & SCHERZER 2004).

In PACHEPSKY & RAWLS (2004) wird ein umfassender Überblick über die verschiedensten Methoden für die Entwicklung von PTF, deren Anwendung zur Ableitung bodenhydraulischer Kennwerte (TIMLIN ET AL. 2004) (z.T. in Kombination mit Reliefanalysen, ROMANO & CHIRICO 2004) und zu möglichen Evaluierungsmethoden gegeben. Speziell für Waldböden liefern die Studien von HANGEN & SCHERZER (2004, 2005) und SCHRAMM ET AL. (2006) einen umfangreichen Überblick über die Ermittlung von PTF zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushaltes, Modellierungsansätze für den Bodenwasserhaushalt und über die Validierung von PTF zur Berechnung von bodenhydraulischen Parametern. OSENSTETTER ET AL. (2009) haben die Einflüsse von sechs PTF auf Ergebnisse bodenhydrologischer Modellierungen an Waldstandorten in Bayern untersucht. RUSS & RIEK (2011) validieren unterschiedliche PTF zur Ableitung der nFK beispielhaft für Waldböden des norddeutschen Tieflandes.

Ein grundsätzliches Problem bei der Anwendung von PTF für die Ableitung bodenhydraulischer Kenngrößen von Waldböden besteht darin, dass sich die Verteilung von Bodendichte und Humusgehalt von denen der Ackerböden unterscheidet (TEEPE ET AL. 2003). Oberböden von Waldstandorten weisen im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Böden geringere Trockenrohdichten, ein größeres Grobporenvolumen und höhere Humusgehalte auf (OSENSTETTER ET AL. 2009, GAUER ET AL. 2011). In der häufig angewandten Kartieranleitung der AD-HOC-AG BODEN (2005), basieren die Ableitungen bodenphysikalischer Kenngrößen auf Erhebungen landwirtschaftlich genutzter Böden. Nach GAUER ET AL. (2011) ist die Verwendung dieser Kennwerte bei der Abschätzung bodenhydraulischer

Merkmale von Waldböden mit Unsicherheiten verbunden. Auch TEEPE ET AL. (2003) sehen die bisherige Abschätzung als unzureichend an und haben deshalb auf der Grundlage von Waldböden auch die nutzbare Wasserspeicherkapazität (WSK) abgeleitet. Die Ergebnisse zeigen aber, dass die Unterschiede der berechneten WSK im Vergleich zu den Ackerböden relativ gering ausfallen. HANGEN (2009) hat anhand von Forststandorten eine Validierung verschiedener PTF zur Ableitung der nFK durchgeführt. Dabei wurde für die PTF nach AD-HOC-AG BODEN (2005) die höchste Schätzgenauigkeit festgestellt.

Informationen zum Wasserspeichervermögen von Waldböden

Insgesamt liegen für mitteleuropäische Waldstandorte bisher nur in einem geringen Umfang Ergebnisse zur Schätzung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers vor (GAUER ET AL. 2011). Dies gilt auch für die Bestimmung des effektiven Wurzelraumes von Waldböden, deren Ableitung gegenwärtig noch nicht geregelt ist (RAISSI ET AL. 2009, GAUER ET AL. 2011). Die Ursache für die bisher geringe Anzahl an Studien zur Schätzung der Wasserspeicherkapazität von Waldböden sind die mangelnden Grundlagendaten. Für große Waldflächen liegen bisher nur wenige standardisierte und frei zugängliche Informationen über die Böden vor. Es fehlt also eine überregional repräsentative Grundlage für die rechnerische Ableitung von Kenngrößen des Bodenwasserhaushaltes oder für die Regionalisierung von Waldbodeninformationen.

Um die Leistungsfähigkeit der Wälder und ihrer Böden zu erhalten und ihre ökologischen Funktionen zu entwickeln und zu schützen, benötigen die Forstwirtschaft und der Umweltschutz möglichst flächendeckend hochauflösende Informationen über bodenphysikalische und -chemische Parameter. In Deutschland wurden deshalb mit der als Rasteruntersuchung angelegten *Bodenzustandserhebung im Wald* (BZE I & II), an rund 2000 Stichprobenpunkten Daten über die aktuellen Zustände und Veränderungen charakteristischer Eigenschaften von Waldböden erhoben (BMELV 2007, GAUER 2009). Mit einer Maschenweite von 8 x 8 km liefert diese Untersuchung aber keine flächendeckenden Informationen zur kleinräumigen Variabilität der Waldbodeneigenschaften.

In der Schweiz stehen im Rahmen der *langfristigen Waldökosystem-Forschung* (WSL 2012) mittlerweile Informationen über rund 1100 Waldböden zur Verfügung. Das primäre Ziel ist hier die standortkundliche Untersuchung der Auswirkungen von natürlichen und anthropogenen Einflüssen auf den Zustand der Waldökosysteme. Die Bodeninformationen dienen vor allem der Dokumentation des ökologischen Verhaltens der Waldpflanzen in Bezug auf das standörtliche Wasser- und Nährstoffangebot und auf verschiedene Bodeneigenschaften. WALTHER ET AL. (2004) haben diesen Datenbestand und weitere Waldbodendaten aus verschiedenen Projekten erstmals ganzheitlich und systematisch ausgewertet und dokumentiert. Sie geben einen grundlegenden Überblick über die wichtigsten und häufigsten Waldböden der Schweiz, aber nicht über deren räumliche Verbreitung und Variabilität. Die Darstellung für die ganze Nordwestschweiz basiert auf lediglich vier Standorten. Im Gegensatz dazu stellt MOSIMANN (2011) die Vielfalt, die ökologischen Eigenschaften und die Verbreitung der Waldböden im Kanton Basel-Landschaft deutlich differenzierter vor. Die Studie basiert auf der umfassenden Auswertung von rund 90 Waldstandorten.

Räumliche Modellierung von Bodeneigenschaften

Für viele Gebiete in Deutschland, Österreich und der Schweiz gibt es derzeit noch keine flächendeckend hochauflösenden Karten wichtiger Waldbodeneigenschaften. Da detaillierte Feldkartierungen sehr personal- und kostenintensiv und für größere Gebiete durch die zuständigen Institutionen kaum mehr finanzierbar sind (BEHRENS & SCHOLTEN 2006), müssen für Anwendungen in naher Zukunft die Bodeneigenschaften vorläufig prognostiziert werden. Deshalb entstehen etwa seit Beginn der 1990er Jahre Bodenkarten vermehrt modellgestützt (EBERHARDT 2011). Generell werden hierfür mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen (SCULL ET AL. 2003, LAGACHERIE ET AL. 2007, GRUNWALD 2009) Bodeninformationen mit räumlich flächendeckend vorliegenden qualitativen und quantitativen Informationen über die bodenbildenden Faktoren (z.B. Relief, Gestein) verknüpft, um so auf Bodeneigenschaften in nicht kartierten Gebieten zu schließen (VOLTZ ET AL. 1997, EBERHARDT 2011). Die verschiedenen entwickelten Verfahren werden insgesamt als *digitale Bodenkartierung* bzw. *Digital Soil Mapping* (DSM) bezeichnet (MCBRATNEY ET AL. 2003).

Das Relief ist einer der Schlüsselfaktoren bodenbildender Prozesse und der standörtlichen Ausprägung von Bodeneigenschaften (MCBRATNEY ET AL. 2003, GEITNER ET AL. 2011). Reliefparameter sind die derzeit meistgenutzte Vorhersagegröße in der digitalen Bodenkartierung (MCBRATNEY ET AL. 2003, DOBOS & HENGL 2009, FLORINSKY 2012). Rasterbasierte Höhenmodelle (DGM) als Grundlage digitaler Reliefanalysen sind mittlerweile weit verbreitet und stehen immer häufiger auch hochauflösend (ca. 1-2 m) zur Verfügung (BEHRENS ET AL. 2010). Die GIS-gestützte Modellierung von Reliefformen ist deshalb die elementare Voraussetzung für die räumliche Differenzierung der Ausbildung und Verbreitung der Bodeneigenschaften und des standörtlichen Wasserhaushalts (MOORE ET AL. 1991, SCULL ET AL. 2003, LI ET AL. 2005, GEITNER ET AL. 2011). Für die Berechnung einer Vielzahl geomorphometrischer Merkmalsausprägungen und hydrologischer Kennwerte des Reliefs stehen seit einigen Jahren etablierte Algorithmen zur Verfügung (ZEVENBERGEN & THORNE 1987, JENSON & DOMINGUE 1988, TARBOTON ET AL. 1991, WILSON & GALLANT 2000). Diese Methoden bilden die Grundlage unterschiedlichster Reliefklassifizierungsansätze (DIKAU & SCHMIDT 1999, DENG 2007, HENGL & REUTER 2009) und sind in gebräuchlichen GIS (z.B. ArcGIS, SAGA) weitestgehend implementiert.

Diese Arbeit stellt die Entwicklung und Durchführung einer komplexen Reliefgliederung für die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz vor. Der methodische Ansatz ermöglicht die umfangreiche Modellierung und Kombination verschiedener Reliefparameter unter Berücksichtigung detaillierter Geländekenntnisse (HERBST ET AL. 2012). Einen umfassenden Überblick über die verschiedensten Methoden und Anwendungsbeispiele digitaler Reliefanalysen, -modellierungen und -klassifikationen zur räumlichen Vorhersage von Bodeneigenschaften geben u.a. LI ET AL. (2005), DENG (2007), HENGL & REUTER (2009), FLORINSKY (2012).

Die Inhalte und Methoden des DSM variieren sehr stark, je nach zugrunde liegender Fragestellung und betrachteter Bodeneigenschaft, der Größe und naturräumlichen Situation der Untersuchungsgebiete, in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Bodeninformationen und vom Umfang und der Qualität des Prädiktorensatzes sowie von der

angestrebten Auflösung der Modellprognosen. Einen umfassenden Stand über die angewandten Berechnungs- und Modellierungsverfahren sowie regionale Anwendungsbeispiele geben u.a. MCBRATNEY ET AL. (2003), SCULL ET AL. (2003), LAGACHERIE ET AL. (2007), LAGACHERIE (2008), GRUNWALD (2009), HENGL & MACMILLAN (2009) und BOETTINGER ET AL. (2010). BEHRENS & SCHOLTEN (2006) fassen den Stand des DSM in Deutschland zusammen. Verschiedene Vorgehensweisen für die Modellierung von Waldbodeninformationen werden u.a. von SKIDMORE ET AL. (1996), THOMAS ET AL. (1999), BORUVKA ET AL. (2007) und SEIBERT ET AL. (2007) vorgestellt. Untersuchungen aus dem deutschsprachigen Raum liegen hierfür u.a. von ZIRLEWAGEN (2003), SCHULTZE ET AL. (2005), BECK ET AL. (2009), FVA (2009), HOFMANN ET AL. (2009), SPIELVOGEL ET AL. (2009) und MOSIMANN ET AL. (2011) vor.

Bei den verwendeten Berechnungs- und Modellierungsverfahren für die Regionalisierung von Bodeninformationen kommen im DSM unterschiedliche Ansätze zum Einsatz. Darunter geostatistische Verfahren (WACKERNAGEL 2003, BORUVKA ET AL. 2007, WEBSTER & OLIVER 2007, JORDAN & GLATZEL 2008, HENGL 2009, KELLER ET AL. 2011), regressionsstatistische Verfahren (BRUBAKER ET AL. 1994, ZIRLEWAGEN 2003, SCHULTZE ET AL. 2005, MEERSMANS ET AL. 2008, FALK & DIETZ 2009), fuzzy-theoretische Näherungsverfahren (ZADEH 1965, MCBRATNEY & ODEH 1997, BRUIN & STEIN 1998, BURROUGH ET AL. 2000, FRIEDRICH 2001), Entscheidungsbäume (BREIMAN ET AL. 1984, DE'ATH & FABRICIUS 2000, MERTENS ET AL. 2002, SCULL ET AL. 2005, BUI ET AL. 2006, SCHMIDT ET AL. 2008, HOFMANN ET AL. 2009, BOU KHEIR ET AL. 2010), Random Forests (BREIMAN 2001, GRIMM ET AL. 2008, HERBST & MOSIMANN 2010, WIESMEIER ET AL. 2011, LIEß ET AL. 2012) und künstliche neuronale Netze (BEHRENS ET AL. 2005, FÖRSTER ET AL. 2005, ESHANI & QUIEL 2008, ALAVI ET AL. 2010). Je nach vorhandenem Expertenwissen und Verfahren sind auch wissensbasierte Regeln (COOK ET AL. 1996, SKIDMORE ET AL. 1996, MACMILLAN ET AL. 2007, WALTER ET AL. 2007, ZHU ET AL. 2008, MOSIMANN ET AL. 2011) in die Modelle integrierbar (EBERHARDT 2011).

Insgesamt gewinnen modellgestützte Vorhersagen gegenüber der klassischen Feldkartierung zusehends an Bedeutung (BEHRENS & SCHOLTEN 2006). Da auch die zur Verfügung stehenden Datenmengen immer umfangreicher werden, entwickeln sich die Methoden derzeit sukzessive von einfacheren statistischen Anwendungen hin zu komplexen Verfahren des automatisierten *data mining* (BEHRENS ET AL. 2005, BEHRENS & SCHOLTEN 2007). Random Forest (RF) (BREIMAN 2001, LIAW & WIENER 2010) ist hierbei einer der jüngeren Algorithmen des maschinellen Lernens (PRASAD ET AL. 2006). RF hat sich nach den Ergebnissen verschiedener Studien (HAMZA & LAROCQUE 2005, BENITO GARZÓN ET AL. 2006, CUTLER ET AL. 2007, DAHINDEN 2007, PETERS ET AL. 2007, STUM ET AL. 2010) als ein flexibles und robustes Prognosemodell erwiesen und wird daher immer häufiger verwendet (GRIMM ET AL. 2008, WIESMEIER ET AL. 2011, LIEß ET AL. 2012).

Für den süddeutschen Raum und die Schweiz liegen verschiedene Untersuchungen zur Regionalisierung von Bodeninformationen vor (FVA 2009). ZIRLEWAGEN (2003) hat im Südschwarzwald eine Untersuchung über regressionsstatistische Verfahren für die Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften durchgeführt. Im Projekt *Karten für die Zukunft* des LWF (2011) werden u.a. Entscheidungsbäume und Regressionsstatistiken eingesetzt, um Waldflächen in Bayern mit fehlenden Informationen Bodeneigenschaften

zuzuweisen (BECK ET AL. 2009, DIETZ ET AL. 2009). HÄRING & SCHRÖDER (2010) haben dazu die Verlässlichkeit der Regionalisierung mit Random Forest getestet und OSENSTETTER ET AL. (2009) verschiedene PTF für die bodenhydrologische Modellierung an Waldstandorten untersucht. In der Schweiz wurden bisher außer mit verschiedenen (geo-)statistischen Anwendungen (KELLER ET AL. 2011, RUETTE ET AL. 2011) auch faktorenbasierte Regionalisierungen (EGLI ET AL. 2004, 2005) u.a. mit Entscheidungsbäumen durchgeführt.

In der Nordwestschweiz werden mit dem Projekt *Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft* seit 2004 flächenhafte Informationen über die Waldböden erarbeitet. MOSIMANN ET AL. (2011) haben mit einem wissensbasierten Ansatz Vorhersagemodelle für die Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt, Vernässungsrisiko und Azidität im Ober- sowie im Unterboden entwickelt und einen Vergleich der Ergebnisse mit Random Forest-Prognosen durchgeführt (HERBST & MOSIMANN 2008, 2010). Die Projektarbeiten werden mit dieser Untersuchung zu den Möglichkeiten der räumlich expliziten Vorhersage des Wasserspeichervermögens mit einem kombinierten Verfahren aus wissensbasierter Modellierung und teilautomatisierten Prognosen mit RF weitergeführt. Dabei entstehen hochauflösende Karten der Wasserspeicherkapazität der Waldböden für ein 204 km² großes Untersuchungsgebiet in der Nordwestschweiz.

1.3 Räumliche Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Die Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt befinden sich in der Nordwestschweiz an der Grenze zu Frankreich und Deutschland (Abb.1). Damit liegt das Untersuchungsgebiet im Schnittpunkt der geotektonisch unterschiedlich geprägten Landschaftseinheiten Rheingraben, Tafeljura und Faltenjura. Diese drei Hauptlandschaftstypen unterscheiden sich bei den Reliefformtypen und Neigungsverhältnissen, Gesteinstypen und -serien, der quartären Sedimentation und Verwitterungsdeckenbildung, Höhenlage und den sich daraus ableitenden klimatischen Verhältnissen, Bodengesellschaften, Pflanzengesellschaften, wasser- und stoffhaushaltlichen Eigenschaften und der Nutzung (MOSIMANN 1985). Hieraus resultiert eine starke Variation in der räumlichen Konstellation der bodenbildenden Faktoren, welche im Untersuchungsgebiet vielfältige, regionstypische und z.T. kleinräumig wechselnde Ausbildungen der Bodeneigenschaften zur Folge haben. Aus diesem Grund muss das Untersuchungsgebiet für die Reliefanalyse und die Modellierung des Wasserspeichervermögens in drei Bodenregionen gegliedert werden: *Lösshügelland*, *Jura* (Tafel- und Faltenjura) und *Talböden*. Die Grenzen dieser drei Modellregionen entsprechen den generalisierten naturräumlichen Mustern, welche durch die landschaftlichen Haupteinheiten vorgegeben werden.

Der Gesteinsuntergrund des *Lösshügellandes*, das an den Südwestrand des Oberrheingrabens anschließt, besteht aus mächtigen tertiären Sedimentpaketen (Tone, Mergel und sandige Mergel), die während des Quartärs großflächig mit 2 - 10 m mächtigen Lössablagerungen und in den Talbereichen mit Schottern überdeckt worden sind. Das Relief ist nach periglazialer Formung durch niedrige flache Hügel, Dellen und Muldentäler geprägt,

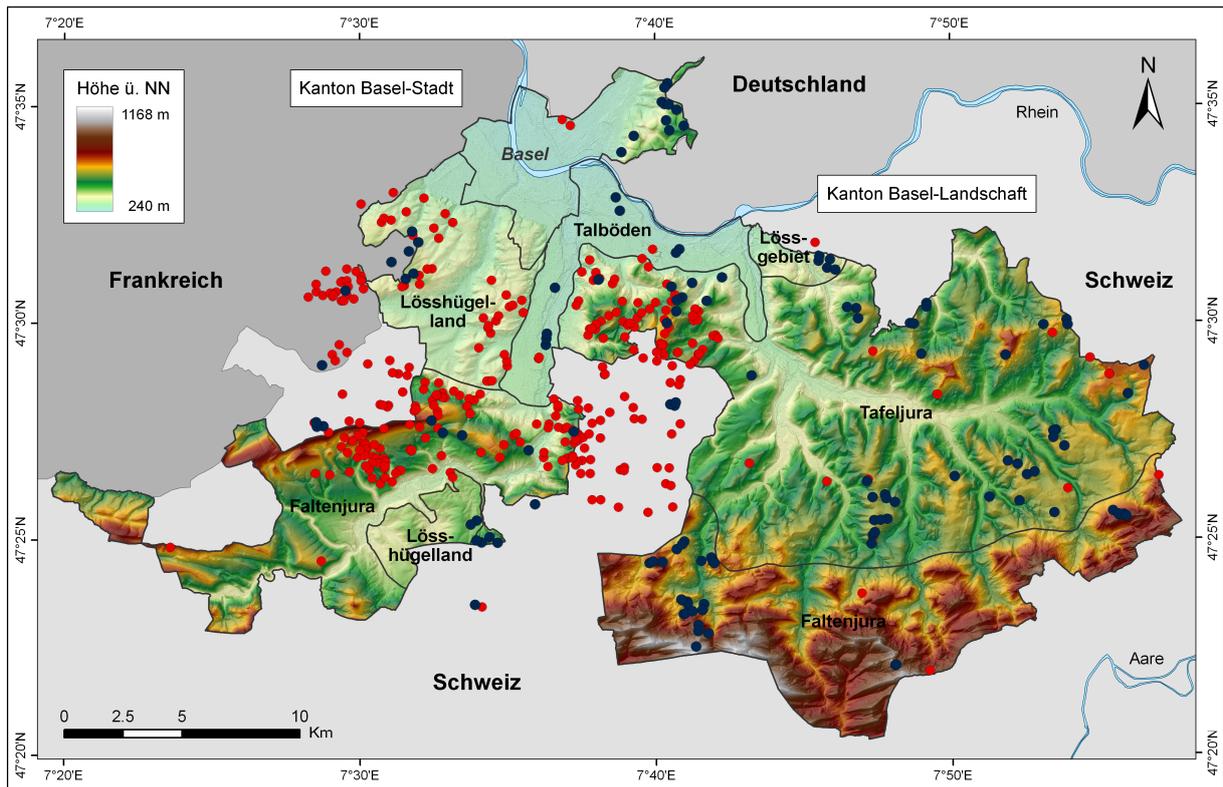


Abb. 1 Untersuchungsgebiet mit Bodenregionen und Lage der Waldbodenprofile.

Die Punkte zeigen die Verteilung der Waldbodenprofile ($n = 442$) im Kanton Basel-Landschaft und den angrenzenden Nachbargebieten. Hiervon markieren die dunkelblauen Punkte die Standorte mit genauen Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit ($n = 129$).

und weist daher vorwiegend geringe bis mittlere Hangneigungen und eine geringe Höherstreckung innerhalb der kollinen Stufe auf. Die verwitterten Lössse und die umgelagerten Schwemmlössse bestehen vorwiegend aus tonigen bis schluffigen Lehmen. Durch die nahezu skelettfreien und mächtigen Ausgangssubstrate und der vorherrschenden Bodenart, weisen die zumeist tiefgründigen Böden weit verbreitet eine hohe Wasserspeicherfähigkeit auf ($nFK > 160$ mm bis 100 cm Tiefe) (BONO 1985, MOSIMANN 2011). Die Böden sind weitgehend gute Ackerbaustandorte (BONO 1985). Der Waldflächenanteil ist deshalb mit rund 16 % gering.

Tafel- und *Faltenjura* sind aus Sedimentgesteinen des Mesozoikums aufgebaut, deren stratigraphische Abfolge aus Karbonatgesteinen verschiedener Härte (Kalke und Dolomite), Mergeln, Tonmergeln und Mergeltonen die Herausbildung der Oberflächenformen wesentlich vorgeben hat (MOSIMANN 1985). Der Tafeljura besteht aus ungefalteten, leicht schräg gestellten mesozoischen Schichten, die durch Brüche in ein Mosaik von Schollen zerlegt wurden. Die Tafeln wurden seit der im Altpleistozän begonnenen Anlage des Hochrheintals durch rückschreitende Erosion der Nebenflüsse zerschnitten und schufen so die heutige Schichtstufenlandschaft (VAVRUCH 1985, S. 29). Das Großrelief zeigt eine Abfolge von pultförmigen welligen Tafelbergen, welche durch meist steilwandige Mulden- und Sohlentäler unterbrochen werden. Die Talbereiche sind nahezu vollständig von Schottern gefüllt. Die erosionsresistenten harten Kalke und Mergel des Hauptrogenstein (Dogger) sowie die darunter liegenden Wechsellagen aus sandigen Mergeln und Kalken stellen in Richtung des südlich angrenzenden Faltenjura hauptsächlich die Deckenformation der Tafeln dar und

treten am Rande als markante Geländekanten (Fluh) in Erscheinung (VAVRUCH 1985, S. 29). Im südlichen Teil des Kantons geht der Tafeljura im Bereich einer etwa 5 km breiten Schuppenbauzone in den Faltenjura über. Die steil nordwärts stoßenden Schichtenfronten unterscheiden sich orographisch deutlich vom Tafeljura, indem sich kürzere längliche steile Kuppen und längere Bergleisten mit dazwischen liegenden Isoklinaltälern häufen (LABHART 2001). Im Faltenjura wurden die Gesteine nicht in Bruchschollen zerlegt, sondern großräumig gefaltet. Der Falten- bzw. Kettenjura ist von langgezogenen wellenförmigen Hügelzügen und Tälern geprägt, wobei die Antiklinalen teilweise durch schluchtartige Quertäler (Klusen) durchbrochen werden (SCHMASSMANN 1959, BARSCH 1969, GUTERSOHN 1969, KÖNIG 1972, LABHART 2001).

Die periglaziale Formung und Verwitterungsbildung hat im Jura einen entscheidenden Einfluss auf die heutige Substratverbreitung und die darin entwickelten Böden. Auf großen Flächen befinden sich Deckschichten periglazialen Ursprungs über dem Gesteinsuntergrund. In Hanglagen ist das anstehende Gestein fast immer von wenigen Dezimetern bis mehrere Meter mächtigen umgelagerten Deckschichten überlagert. Flächenmäßig dominieren Böden in Deckschichten gegenüber den Böden, die sich in den Gesteinen der geologischen Formationen entwickelt haben. Diese lassen sich in allen Reliefbereichen finden, in denen keine Ab- und Umlagerung von Verwitterungsmaterial stattgefunden hat (MOSIMANN 2011). Die Deckschichten sind durch Solifluktion, Lösseinwehung, Überspülung und Kalkumlagerung geprägte Schutt- und Lehmdecken in stark variierender Ausprägung. Das Spektrum reicht von skelettreichen Gehängeschuttdecken und Kalkverwitterungsschichten über feinmaterialreiche Hanglehme und Tonmergeldecken bis hin zu Lössschleiern und bis zu 2 m mächtigen Decklehmern auf den Tafeljurahochflächen (VAVRUCH 1985, MOSIMANN 2011). Die Bodenarten liegen fast immer im Bereich der sandig bis tonigen Lehme. Die vielfältigen Substrate in Kombination mit der Vielfalt an Gesteinstypen und Reliefformen führen dazu, dass alle wichtigen ökologischen Eigenschaften der Böden in einem weiten Bereich und z.T. sehr kleinräumig variieren (WALTHER ET AL. 2004, MOSIMANN 2011).

Im Gegensatz zum Lösshügelland ist die Spannweite beim Wasserspeichervermögen im Jura entsprechend sehr groß. Tiefgründige Waldböden auf Lösslehm (nFK ~ 200 mm) speichern 10- bis 15-mal mehr pflanzenverfügbares Wasser als die flachgründigsten Rendzinen (nFK ~20 mm) in steilen Hangbereichen (MOSIMANN 2011). Da die mittleren jährlichen Niederschlagssummen im Jura mit über 1000 mm bis 1300 mm hoch ausfallen, ist die klimatische Wasserbilanz bei einer Jahresmitteltemperatur von 8°C im Durchschnitt für das ganze Jahr positiv. Deshalb stockt der Wald flächendeckend auch auf den Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität, da die Wasserversorgung in Durchschnittsjahren gewährleistet oder nur geringfügig reduziert ist (PAUL 2010, MOSIMANN 2011).

Der Wald ist vor allem in den Talbereichen, auf den flacheren Hängen und auf den Tafeljurahochflächen stark zurückgedrängt worden. Der Kanton Basel-Landschaft nimmt dennoch mit einem Waldanteil von über 40 % der Gesamtfläche, den 5. Platz in der Rangliste der waldreichsten Kantone der Schweiz ein (AMT FÜR WALD BEIDER BASEL 2012, BFS 2012). Die Waldfläche im Untersuchungsgebiet beläuft sich auf rund 204 km². Charakteristisch für die Region sind verschiedenste Buchenwälder, die im Jura auf fast allen Böden stocken.

Daneben sind im waldarmen Lösshügelland Eschenwälder, im Tafeljura an Steilhängen Linden-, Ahorn und Eichenwälder sowie Ahorn- und Eschenwälder in Hangfußlagen und im Faltenjura an steileren Hängen und in Gratlagen oberhalb von ca. 800 m Höhe Tannen-, Buchen- sowie Ahorn- und Eschenwälder weitere prägende Waldgesellschaften (BURNAND & HASSPACHER 1999).

2 Methodisches Vorgehen und Daten

2.1 Grundkonzept der Arbeit

Die Arbeit sieht die faktorenbasierte Modellierung der Wasserspeicherefähigkeit für die Wälder des nordwestschweizerischen Jura vor. Das methodische Konzept basiert auf einer wissensbasierten empirisch-statistischen Modellierung und parallel dazu durchgeführten teilautomatisierten Prognosen mit Random Forest. Dabei entstehen Prognosekarten deren Analyse und lagebezogener Vergleich der Ermittlung von Möglichkeiten und Grenzen der räumlich expliziten Vorhersage des Wasserspeichervermögens dienen. Abb. 2 stellt das Konzept und den Aufbau der Arbeit in einem Überblick schematisch dar.

In einem ersten Schritt erfolgt die Aufbereitung und Kontrolle der zur Verfügung stehenden standörtlichen Waldbodeninformationen und Geodaten aus dem Projekt *Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft* (MOSIMANN ET AL. 2011).

Auf der Grundlage des digitalen Geländemodells (DGM) wird eine komplexe geomorphographische Reliefgliederung für die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften durchgeführt. Die Entwicklung und das methodische Vorgehen dieser Reliefmodellierung werden als wichtiges Teilergebnis dieser Arbeit in Kap. 3 ausführlich behandelt. Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den modellierten Reliefformtypen und den Bodeneigenschaften dient als Grundlage um die Reliefformtypen als Vorhersagegrößen zu bewerten.

Daran schließt die wissensbasierte empirisch-statistische Modellentwicklung an (Kap. 5). Hierzu dienen sehr viele häufigkeitsstatistische Analysen, um aussagekräftige Prädiktorenkombinationen zu ermitteln. Darauf aufbauend können die Entscheidungsbäume entwickelt und kalibriert werden. An einigen Endknoten der Entscheidungsbäume fehlen Stichproben- daten für die Abschätzung der Wasserspeicherefähigkeit. Für diese bestimmten Prädiktorenkombinationen werden die notwendigen Informationen zum Wasserspeichervermögen mit Hilfe einer Pedotransferfunktion abgeschätzt. Im Anschluss daran erfolgen die GIS- technische Modellumsetzung und die Erstellung der Prognosekarten (Kap. 5.4). Die Modellergebnisse müssen anschließend im Gelände auf ihre Plausibilität geprüft werden. Hierfür erfolgten mehrere Feldkartierungen in unterschiedlichen Regionen des Untersuchungsgebietes (Kap. 5.3). Die Ergebnisse dienen der abschließenden Kalibrierung der wissensbasierten Modelle und liefern sehr wichtige Erkenntnisse für die Diskussion über die räumliche Plausibilität der wissensbasierten und teilautomatisierten Modellvorhersagen.

Die Entwicklung von teilautomatisierten Prognosemodellen mit Random Forest (BREIMAN 2001) erfolgt parallel zur wissensbasierten Modellierung (Kap. 6). Die Qualität der Modelle und der Vorhersagen der Speicherefähigkeit werden begutachtet und ebenfalls Prognosekarten erstellt. Darauf folgt ein flächendeckender lagebezogener Vergleich der wissensbasierten Modellprognosen mit den teilautomatisierten Vorhersagen. Hierzu dient die Berechnung von Flächenbilanzen und von Kontrast- sowie Fehlerindizes (Kap. 7).

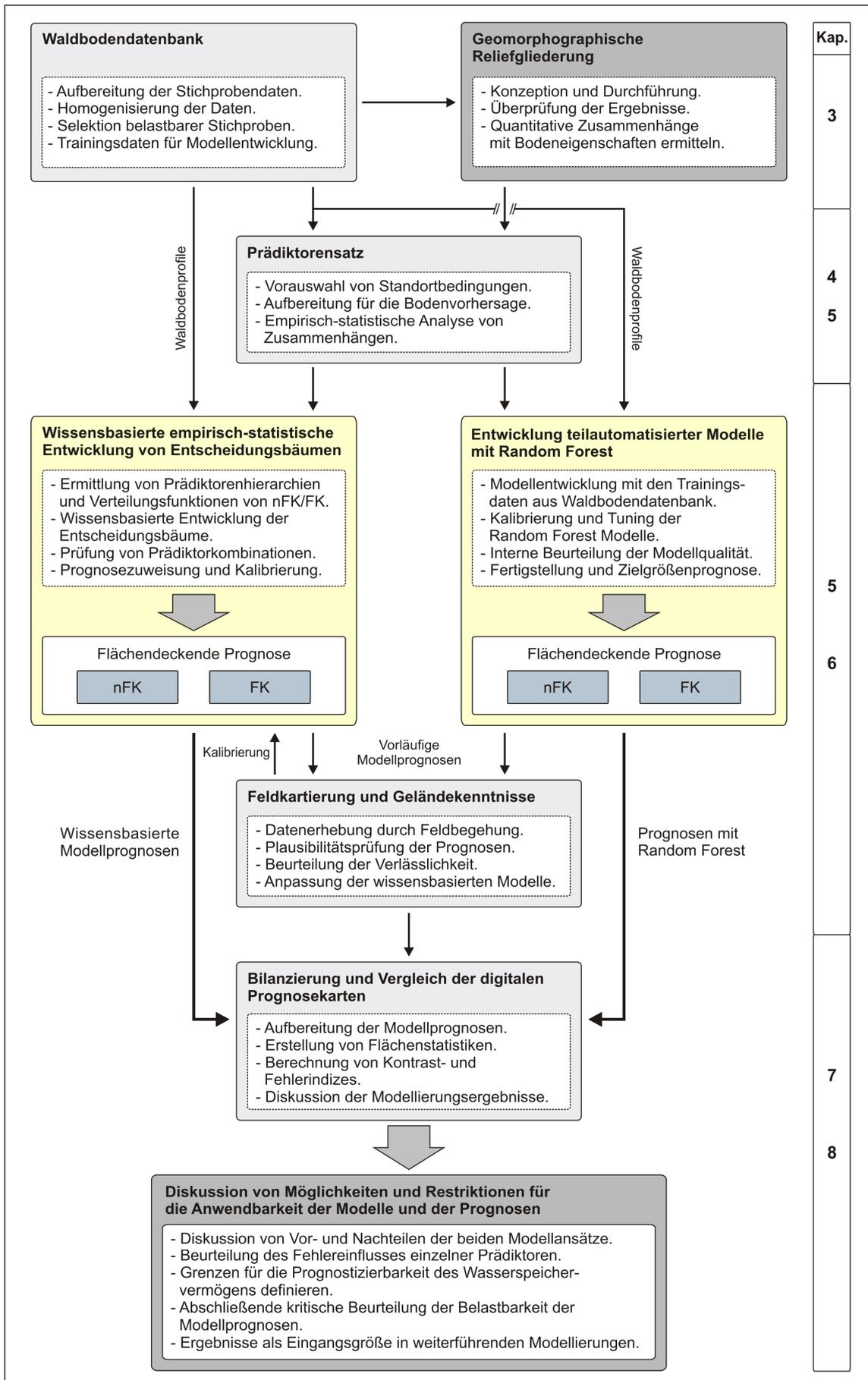


Abb. 2 Konzept und Aufbau der Arbeit.

Zusammen mit den Erkenntnissen aus der Modellentwicklung und der Feldkartierung dienen die Ergebnisse der Erarbeitung und Formulierung von Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendbarkeit der entwickelten Modelle und ihrer Prognosen. Abschließend folgt eine zusammenfassende kritische Beurteilung der Belastbarkeit der Modellprognosen. Zudem wird die Anwendbarkeit der Prognosen als Eingangsgröße in weiterführenden Modellierungen und die Übertragbarkeit der Modelle in andere Regionen diskutiert.

2.2 Datengrundlage

Die gesamte Datengrundlage dieser Arbeit entstammt dem Forschungsprojekt *Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft* (MOSIMANN ET AL. 2011).

2.2.1 Waldbodendaten

Für die Modellentwicklung liegen in einer unter *MS Access 2007* geführten Datenbank rund 450 Fälle profil- und horizontbezogener Punktinformationen zu den Waldböden vor. Alle im Bodenaufschluss beschriebenen Waldbodenprofile des Kantons Basel-Landschaft und der unmittelbaren Nachbargebiete wurden hierfür zusammengeführt (Abb. 1). Alle Bodeninformationen werden im Wesentlichen entsprechend den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) (AD-HOC-AG BODEN 2005) erfasst, klassifiziert und standardisiert.

In den Jahren 2004 - 2009 wurden 95 Waldstandorte bodenkundlich neu aufgenommen und wissenschaftlich dokumentiert (MOSIMANN 2005, MOSIMANN ET AL. 2006, 2009, 2010). Damit wurden wichtige räumliche und inhaltliche Lücken der Informationsbasis für die flächen-deckende Ableitung von Bodeneigenschaften geschlossen (MOSIMANN 2011). Diese 95 Profile mit kontrollierten und z.T. neu berechneten Angaben zur Wasserspeicherefähigkeit liefern den überwiegenden Teil der in dieser Arbeit verwendeten Stichprobe (n = 129). Die Bodenprofildaten dienen in variierendem Umfang als Datenbasis für die Modellentwicklungen und -kalibrierungen. Aufgrund der zentralen Bedeutung dieses Datensatzes, wurden Mindestanforderungen an die Vollständigkeit und Qualität der Daten gestellt. Die in dieser Arbeit für die Modellentwicklung verwendeten Stichprobendatensätze verfügen über die in der Tab. 1 angeführten Informationen.

Informationen die für jeden Stichprobendatensatz zur Modellentwicklung vorliegen müssen

Bodenprofil ID	Flow Path Length (m)	Gründigkeit (cm)
Rechtswert	Distanz zur Hangkante (m)	Skelettgehalt (Vol.-%)
Hochwert	Distanz zu Felsband (m)	Azidität Oberboden (pH)
Bodenregion	Stratigraphischer Gesteinstyp	Azidität Mineralboden (pH)
Höhe ü. NN (m)	Petrographische Gesteinstypklasse	Vernässung
Hangneigung (Grad)	Substrattyp	Waldgesellschaft
Reliefeinheit	Deckschicht	Pflanzensoziolog. Feuchtestufe
Reliefformtyp	Horizontbezogene Bodenart	Pflanzensoziolog. Reaktionsstufe
Vertikalabstand zur Tiefenlinie (m)	Horizontbezogene Lagerungsdichte	FK / nFK (für Teilstichprobe)

Tab. 1 Mindestanforderungen an die Bodenprofilatensätze zur Verwendung für die Modellentwicklung.

Für die verschiedenen Untersuchungen dieser Arbeit werden aus der Waldbodendatenbank nur jeweils die Profilinformatoren verwendet, deren Datenqualität den jeweiligen Fragestellungen entsprechen. Daraus ergibt sich ein variierender Stichprobenumfang für die verschiedenen Aufgabenstellungen. In Tab. 2 werden die wichtigsten verwendeten Teilstichproben angeführt.

Stichprobe	Mindestanforderungen	Anzahl Fälle
Alle Standorte mit Informationen zum Boden in der Waldbodendatenbank.	Informationen über einen Teil der Bodeneigenschaften vorhanden.	442
Profildatensatz zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Reliefformtypen und den Bodeneigenschaften (Kap. 3).	Profilstandorte liegen im Bereich der durchgeführten Reliefmodellierung, Informationen zu Gründigkeit, Skelettgehalt und Versauerung vorhanden.	333
Profildatensatz für die Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit.	Informationen gemäß Tab. 1 vorhanden, kontrollierte und neu berechnete Angaben zu FK / nFK liegen vor.	129

Tab. 2 Stichproben mit den jeweiligen Mindestanforderungen an die Datengrundlage.

2.2.2 Untersuchungsmethoden zur Erfassung einzelner Bodenmerkmale

Die Bodenansprache wurde in bis zu 2,5 m tiefen Bodenaufschlüssen durchgeführt. Die Erfassung der profil- und horizontbezogenen Merkmale erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) (AD-HOC-AG BODEN 2005). Die Methoden der Laboranalysen orientieren sich im Wesentlichen an SCHLICHTING ET AL. (1995), mit kleinen Anpassungen entsprechend der Vorgaben der beteiligten Labors. Die folgenden Darstellungen entsprechen in weiten Teilen den Erläuterungen von MOSIMANN (2005) und beschränken sich auf die Bodenmerkmale, welche für die Abschätzung der Kennwerte des Wasserspeichervermögens *Feldkapazität* (FK) und *nutzbare Feldkapazität* (nFK) benötigt wurden. Die Berechnungsverfahren zur Ableitung der FK / nFK werden im Kap. 2.2.3 detailliert dargestellt.

Beprobung und Probenaufbereitung

Entnahme von Gewichtsproben (Mischproben aus mindestens drei Stellen je Tiefenbereich) in der Profilwand aus den einzelnen Bodenhorizonten (je nach Skelettgehalt ein Volumen von mehreren 100 cm³ bis mehreren 1000 cm³). In einem Becken Aussortieren der größeren Steine (siehe Bestimmung des Skelettgehaltes), Mischen und allenfalls Probenteilung. Nach Trocknung der Probe im Labor, Mörsern und Absieben des Grobbodens mit dem 2 mm-Sieb.

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung wurde mit einem kombinierten Siebungs- und Sedimentationsverfahren ermittelt (DIN 19683 Bl.1-2; SCHLICHTING ET AL. 1995):

- Die Fraktionen 0,063 - 2 mm wurden durch Nasssiebung mit einem Siebsatz (630 µm, 200 µm und 63 µm) bestimmt.
- Die Bestimmung der Fraktionen < 63 µm, < 20 µm, < 6,3 µm und < 2 µm erfolgte mittels Pipettanalyse nach KÖHN.

Skelettgehalt

Der Skelettgehalt beschreibt den Steingehalt (in Vol.-%) der einzelnen Bodenhorizonte. Die Skelettgehalte wurden mit einer kombinierten Feld-/Labormethode bestimmt:

- Aussortieren aller größeren Steine im Gelände und Bestimmung des Gewichtes der aussortierten Steine mit der Federwaage.
- Probentrocknung, Mörsern und Absieben mit dem 2 mm-Sieb. Bestimmung der Laborgewichte des Materials < 2 mm und > 2 mm.
- Bestimmung des Gesamtgewichtes der Steine durch Addition von Feldgewicht aller aussortierten Steine und Gewicht des abgeseibten Materials > 2 mm.
- Bestimmung des Volumenanteils des Skeletts durch Division der Gewichte durch die mittleren Lagerungsdichten (2,6 t/m³ für Steine, 1,5 t/m³ für Feinmaterial) und Verhältnisbildung.

Pflanzennutzbare Gründigkeit

Hierunter wird das geschätzte effektiv verfügbare Wurzelraumvolumen verstanden (MOSIMANN 2005). Die Gründigkeit ergibt sich für jedes Bodenprofil aus dem Volumen mit Feinboden (100 % - Volumenprozent Skelettgehalt). Von diesem Feinbodenvolumen werden zudem vernässte und/oder verfestigte Volumenanteile abgezogen. Damit handelt es sich um einen nicht messbaren Parameter, der mitunter erheblicher subjektiver Prägung unterliegt.

Trockenrohddichte

Für den überwiegenden Teil der Bodenaufschlüsse wurde die effektive Lagerungsdichte nach KA5 für die einzelnen Bodenhorizonte im Feld angesprochen und anschließend der entsprechenden Stufe der Trockenrohddichte zugeordnet. Für ausgewählte Bodenaufschlüsse wurden Stechzylinderproben in natürlicher Lagerung aus den einzelnen Bodenhorizonten entnommen und bei 105 °C getrocknet. Die Trockenrohddichte (in g/cm³) ergibt sich aus der getrockneten Masse der Bodenprobe bezogen auf ihr Volumen (AD-HOC-AG BODEN 2005).

2.2.3 Pedotransferfunktion zur Ableitung der Wasserspeicherefähigkeit

Die Erfassung des Wasserspeichervermögens der Waldböden erfolgt in dieser Arbeit mit den bodenhydraulischen Kennwerten *Feldkapazität* (FK) und *nutzbare Feldkapazität* (nFK). Für jedes Bodenprofil erfolgt die rechnerische Abschätzung von FK und nFK mit einer Pedotransferfunktion (PTF) in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohddichte unter Einbezug von Gründigkeit (cm) und Skelettgehalt (Vol.-%). Aus Bodenart und Trockenrohddichte wird nach KA5 für jeden Horizont ein mittlerer Volumenwert für die FK und nFK ermittelt. Die Summen für die Horizonte ergeben sich aus den Feinbodenvolumina und ihren Mächtigkeiten, die Summen für die Profile aus der Addition der Horizonte (MOSIMANN 2005).

Im Rahmen der wissensbasierten Modellentwicklung wird die PTF angewendet, um die FK und nFK für Prädiktorenkombinationen abzuschätzen, für die keine Wasserspeicherefähigkeitswerte für ein Bodenprofil vorliegen. Abb. 3 stellt die Vorgehensweise schematisch dar.

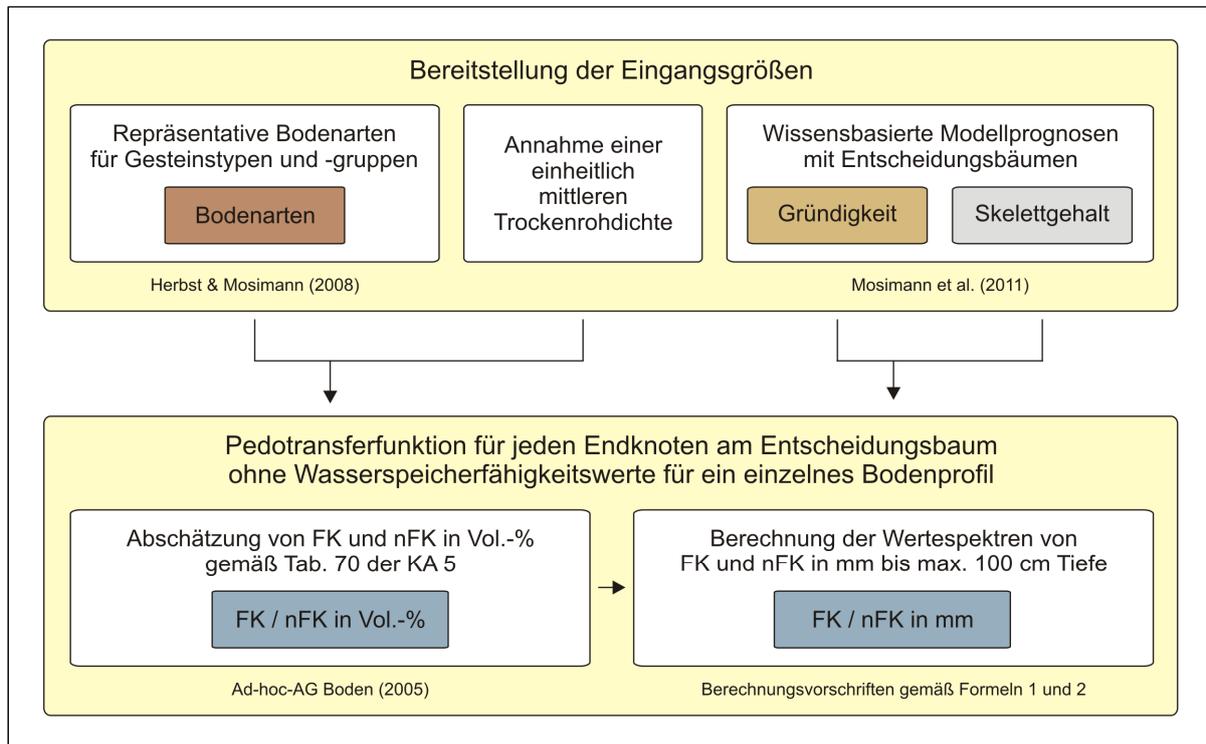


Abb. 3 Schema der Pedotransferfunktion zur Abschätzung des Wasserspeichervermögens für Prädiktorenkombinationen für die keine ausreichenden Stichprobendaten vorliegen.

Die Abschätzung basiert auf den Eingangsdaten Gründigkeit (cm), Skelettgehalt (Vol.-%) und repräsentativen Bodenarten. Für die Bodeneigenschaften Gründigkeit und Skelettgehalt liegen von MOSIMANN ET AL. (2011) entscheidungsbasierte Prognosemodelle vor. Anhand der Unterteilungsregeln dieser Entscheidungsbäume ist jeder Prädiktorenkombination ohne Wasserspeicherfähigkeitswert für ein Bodenprofil eine Prognose der Gründigkeit und des Skelettgehalts zuweisbar. Die prognostizierten Gründigkeits- und Skelettgehaltsklassen ermöglichen dann die Abschätzung der FK und nFK mit Hilfe der PTF.

Alle Gesteine im Kanton BL und den angrenzenden Nachbargebieten wurden petrographischen Gesteinstypenklassen zugeordnet. Die petrographischen Gesteinstypen zählen zu den wichtigsten Prädiktoren in den Vorhersagemodellen (Kap. 4.2). In der Arbeit von HERBST & MOSIMANN (2008) wurden getrennt nach Bodenregionen für jeden Gesteinstyp die repräsentativen Bodenarten statistisch ermittelt. Die getrennte Ableitung für den Oberboden (0 - 50 cm) und den Unterboden (50 - 100 cm) basiert auf einer Stichprobe von 324 Bodenprofilen.

Informationen zur Trockenrohdichte stehen für den überwiegenden Teil der Waldbodenprofile horizontweise zur Verfügung. Beim Großteil der Profile haben die Horizonte mit einer mittleren Trockenrohdichte ($1,4 - 1,6 \text{ g/cm}^3$) (AD-HOC-AG BODEN 2005) den überwiegenden Volumenanteil an den oberen 100 cm des Bodens. Eine plausible Differenzierung der Trockenrohdichte über einen Prädiktor ist in dieser Arbeit nicht möglich. Aus diesen Gründen wird bei der PTF generell von einer mittleren Trockenrohdichte ausgegangen (HERBST & MOSIMANN 2008).

Berechnungsverfahren zur Ableitung von FK und nFK

Die Berechnungsschritte zur Ermittlung von FK und nFK für die einzelnen Bodenprofile in der Waldbodendatenbank und für die Prädiktorenkombinationen in den Entscheidungsbäumen ohne Wasserspeicherfähigkeitswerte für ein Bodenprofil, ergeben sich nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und HERBST & MOSIMANN (2008):

1. Gemäß Tab. 70 der KA5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) werden FK und nFK in Vol.-% in Abhängigkeit von der Bodenart und der Trockenrohdichte ermittelt.
2. Bei den Bodenprofilen wird die Berechnung der FK und nFK getrennt für jeden Horizont t_i durchgeführt.

Für die Prädiktorenkombinationen erfolgt die Berechnung getrennt für die zwei Tiefenbereiche t_1 (0 - 50 cm) und t_2 (50 - 100 cm) unter Berücksichtigung der Mächtigkeit (Gründigkeit in cm) und des Feinbodenvolumens (Skelettgehalt Vol.-%). Ist die prognostizierte maximale Gründigkeit < 100 cm, werden die Untergrenzen von t_1 und t_2 entsprechend angepasst.

Die Berechnung von FK und nFK erfolgt mit den Formeln (1) und (2):

$$FK (mm) = \sum_{i=1}^t \left(\left(fk_i * \left(\frac{100 - s_i}{100} \right) \right) * \left(\frac{m_i}{100} \right) \right) \quad (1)$$

$$nFK (mm) = \sum_{i=1}^t \left(\left(nfk_i * \left(\frac{100 - s_i}{100} \right) \right) * \left(\frac{m_i}{100} \right) \right) \quad (2)$$

mit: fk_i FK in Vol.-% des Tiefenbereichs t_i gemäß Tab.70 der KA 5 (s. Schritt 1)
 nfk_i nFK in Vol.-% des Tiefenbereichs t_i gemäß Tab.70 der KA 5 (s. Schritt 1)
 s_i Skelettgehalt in Vol.-% des Tiefenbereichs t_i .
 m_i Mächtigkeit des Tiefenbereichs t_i in mm.

Die gesamte Wasserspeicherfähigkeit (FK / nFK in mm bis max. 100 cm Tiefe) ergibt sich aus der Summe der ermittelten FK / nFK-Werte der einzelnen Tiefenbereiche.

Da bei den Prädiktorenkombinationen ohne Stichprobendaten zur Wasserspeicherfähigkeit sowohl die Angaben zur Gründigkeit als auch zum Skelettgehalt nur in klassifizierter Form vorliegen (Kap. 4.4), werden für die einzelnen Modellpositionen jeweils minimale und maximale Werte des Wasserspeichervermögens berechnet. Die Berechnung des Minimums ergibt sich aus der Verwendung der Untergrenze der Gründigkeitsklasse und der Obergrenze der Skelettgehaltsklasse. Das Maximum wird durch das Einsetzen der Obergrenze der Gründigkeitsklasse und der Untergrenze der Skelettgehaltsklasse ermittelt.

Aus den minimalen und maximalen Werten für FK und nFK ergibt sich so ein Wertespektrum (HERBST & MOSIMANN 2008), in welchem sich das Wasserspeichervermögen für die jeweilige Modellposition gemäß PTF bewegt. Über den Mittelwert aus Minimum und Maximum kann diese Information dann in klassifizierter Form in die wissensbasierte Modellentwicklung und Prognose integriert werden (Kap. 5.2.6).

2.2.4 Geodaten

Als Grundlage für die Reliefanalysen und für die Modellumsetzung stehen die in der folgenden Tabelle angeführten Geodaten des Kantons Basel-Landschaft flächendeckend zur Verfügung. Alle Geodaten werden unter *ArcGIS 9.3* geführt. Die Karten der Waldbodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt, Vernässung, Azidität im Ober- und Unterboden sind in das GIS des Kantons Basel-Landschaft (*geoViewBL*) integriert und können dort eingesehen werden (www.geo.bl.ch).

Daten	Format	Anmerkungen und Referenz
Digitales Geländemodell DTM-AV GRID 2m	Raster (2 x 2 m)	Aus Vektorpunkten (<i>Airborne Laser Scanning</i>) interpoliertes Rastergittermodell (SWISSTOPO 2005).
Geologische Karten	Vektor	1 : 25.000 im westlichen und 1 : 100.000 im östlichen Teil des Kantons BL.
Topographische Karten	Georeferenzierte TIFF	1 : 25.000 Blätter: Aarau, Arlesheim, Basel, Delémont, Frick, Hauenstein, Oberstorf, Passwang, Sissach (SWISSTOPO).
Waldflächen	Vektor	Waldflächen der Kantone BL und BS. Sie dienen zur Abgrenzung des Modellierungsraumes.
Pflanzensoziologie	Vektor	Pflanzensoziologische Waldgesellschaften 1 : 5.000 erhoben von BURNAND & HASSPACHER (1999).
Waldbestandsdaten	Vektor	Baumartenanteile und pflanzensoziologische Einheiten.
Schuttwald	Vektor	Besondere Bestands- und Waldtypen auf Schutthalden.
Felsband	Vektor	Felsbänder im Kanton Basel-Landschaft.
Waldbodeneigenschaften	Raster / Vektor	Prognosekarten wichtiger Waldbodeneigenschaften von MOSIMANN ET AL. (2011).

Tab. 3 Verwendete Geodaten in Form von Vektor- und Rasterdatensätzen.

2.3 Konzept der wissensbasierten empirisch-statistischen Modellierung

2.3.1 Theoretische Grundlage

Die aktuelle Ausprägung und räumliche Verbreitung der Bodeneigenschaften ist das Resultat des Zusammenwirkens komplexer und zeitlich variierender Prozesse, die durch standort-spezifische Faktoren gesteuert werden (BÖHNER & KÖTHE 2003). Die von JENNY (1941) grundlegend dargestellten Beziehungen zwischen den bodenbeeinflussenden Faktoren und den Bodeneigenschaften haben MCBRATNEY ET AL. (2003) wie folgt formuliert:

$$S_a = f(S, C, O, R, P, A, N) \quad (3)$$

mit: S_a Bodeneigenschaft, S Boden (bereits bekannte Bodeneigenschaften),
 C Klima, O Organismen einschließlich der menschlichen Wirkungen,
 R Relief, P Ausgangsgestein der Bodenbildung, A Alter (Zeit),
 N geographische Position.

Der Zustand des Bodens wird als eine Funktion der bodenbildenden Standortfaktoren beschrieben. Für die faktorenbasierte Prognose von Bodeneigenschaften wird deshalb versucht, die Beziehungen zwischen den bodenrelevanten Parametern und den aus ihren Ausprägungen resultierenden Bodeneigenschaften mit unterschiedlichsten Verfahren quantitativ zu beschreiben (EBERHARDT 2011). Die Regionalisierung von punktuellen Bodeninformationen stößt häufig dadurch an ihre Grenzen, dass die räumliche Auflösung der Bodenprofildaten zu gering ist, um die Verteilungsmuster und Variationen der Böden repräsentativ erfassen zu können (HARTEMINK ET AL. 2008). Um trotz kleiner Stichproben eine räumlich hoch aufgelöste Prognose erzielen zu können, empfehlen u.a. MCKENZIE & GALLANT (2007) und WALTER ET AL. (2007) lokale bodenkundliche Kenntnisse und Kartiererfahrung in die modellgestützte Prognose von Bodeneigenschaften zu implementieren.

129 Bodenprofile mit Angaben zur Wasserspeicherfähigkeit stehen in dieser Arbeit für die Modellierung zur Verfügung. Aufgrund der vielfältigen naturräumlichen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet reicht diese Datenbasis für rein geostatistische und faktorenbasierte automatische Modellierungen nach aktuellem methodischen Kenntnisstand nicht aus. Die geringe Datendichte und die ungleich verteilte Lage der Profile im naturräumlich heterogenen Untersuchungsgebiet haben zur Folge, dass die Stichproben häufig nur bei den weitverbreiteten Standortbedingungen ausreichend groß sind, um statistisch belegbare Aussagen treffen zu können. Deshalb muss die Analyse der Zusammenhänge zwischen der Wasserspeicherfähigkeit und den bodenbildenden Faktoren um regionales Erfahrungswissen über die Bodenverhältnisse ergänzt werden (WALTER ET AL. 2007). Vor diesem Hintergrund wurde von MOSIMANN ET AL. (2011) ein Modellansatz entwickelt, der die Kombination der Erkenntnisse aus statistischen Analysen mit der Integration von Expertenwissen ermöglicht (SKIDMORE ET AL. 1996, ZEIDLER 1999) und deshalb als wissensbasierte Modellierung bezeichnet werden kann (MCBRATNEY ET AL. 2003, MACMILLAN 2008). Abb. 4 stellt die Komponenten des wissensbasierten Modells und deren Beziehungen dar.

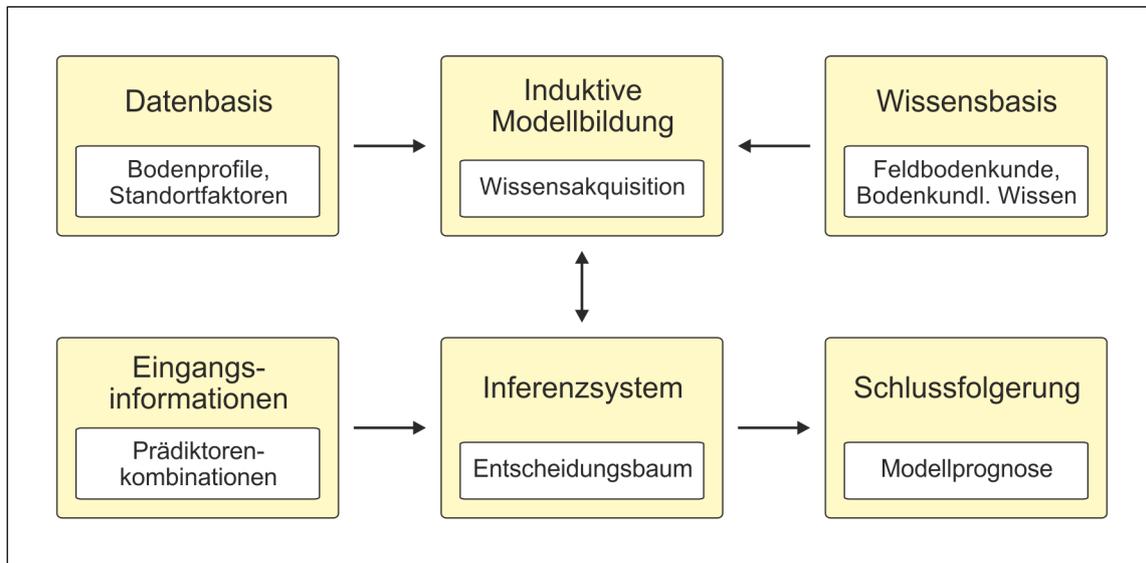


Abb. 4 Komponenten des wissensbasierten Modells für die Prognose von Bodeneigenschaften. Die Pfeile stellen die vereinfachten Beziehungen der Modellkomponenten dar. Darstellung in Anlehnung an SKIDMORE ET AL. (1996) und ZEIDLER (1999).

Mit induktiver Modellbildung (BÖHNER 2011) erfolgt die Wissensakquisition auf Basis häufigkeitsstatistischer Analysen der Bodenprofilaten unter Integration des vorhandenen Erfahrungswissens aus der praktischen Feldarbeit und des bodenkundlichen Wissens aus der Region. Zusammenhänge zwischen der Wasserspeicherfähigkeit und den wichtigsten Standortfaktoren (Prädiktoren) werden identifiziert und daraus Modellfunktionen (Unterteilungsregeln) formuliert. Auf diesen Modellfunktionen basiert die Erstellung eines regelbasierten Entscheidungsbaumes. In diesem Inferenzsystem fassen die Unterteilungsregeln die wichtigsten Standortfaktoren zu Standortkombinationen zusammen, die jeweils "ein Prozessgefüge mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Bodenausprägung repräsentieren" (BÖHNER & KÖTHE 2003, S. 72). Auf Grundlage der Klassifizierungsregeln können dann für die Prädiktorenkombinationen im Untersuchungsgebiet flächenbezogene Prognosen zur Ausprägung des Wasserspeichervermögens erfolgen.

Grundlagen zur Wissensakquisition und Modellbildung

Ein wichtiger Schritt der Modellentwicklung ist die Wissensakquisition (ZEIDLER 1999). COOK ET AL. (1996), SKIDMORE ET AL. (1996), COLE & BOETTINGER (2007), MACMILLAN ET AL. (2007), MCKENZIE & GALLANT (2007), WALTER ET AL. (2007) und ZHU ET AL. (2008) stellen verschiedene methodische Konzepte vor (z.B. *Decision trees*, *Fuzzy logic*, *Neural networks*, *Bayesian analysis*), die neben der statistischen Analyse der Datenbasis auch vorhandenes Expertenwissen formal erfassen (in Form von Algorithmen) (ZEIDLER 1999) und in Prognosemodelle für die digitale Bodenkartierung einbinden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Basisdaten und das regionale wie thematische Expertenwissen Unsicherheiten ganz unterschiedlichen Ausmaßes und unterschiedlicher Qualität unterliegen (SCHULZ 1997). Dies hat zur Folge, dass daraus gezogenen Schlussfolgerungen Unschärfen unterschiedlichen Ausmaßes anhaften. Nach FRIEDRICH (2001) lassen sich stochastische, linguistische, informationale und räumliche Unsicherheiten als Ursachen von Unschärfe bei flächenbezogenen Fragestellungen differenzieren.

In der vorliegenden Arbeit können die Ursachen von Unsicherheiten z.B. in einer unzureichenden inhaltlichen Differenzierung der Bodeninformationen (stochastisch), in semantischen Ungenauigkeiten bei der Datenerfassung (linguistisch), in indirekt erhobenen Informationen mittels Pedotransferfunktionen (informational) und v.a. in der Abgrenzung der Standortfaktoren (räumlich) liegen. So stellen die Prädiktorenkombinationen jeweils eine durch Klassifikation bedingte Diskretisierung der kontinuierlich variierenden Standortbedingungen dar. Die aus der räumlichen Unsicherheit der Abgrenzung resultierende Unschärfe führt dazu, dass die Ausprägung der Wasserspeicherfähigkeit auf den Flächen einheitlicher Faktorenkombinationen variiert (BÖHNER & KÖTHE 2003). Bei der dargestellten Information kann es sich deshalb grundsätzlich nur um eine für diesen Raumausschnitt typische (aber nicht die einzige) Merkmalsausprägung handeln. Diese durch Klassifikation und Aggregation des kontinuierlichen Naturraumes bedingten räumlich-inhaltlichen Unsicherheiten sind ein fester Bestandteil empirischer Erhebungen (FRIEDRICH 2001).

Es wird deshalb ein wahrscheinlichkeitsbasierter Ansatz gewählt, um der aus der Unschärfe in der Daten- und Wissensbasis und den aus der kleinräumigen Variabilität der Bodeneigenschaften resultierenden Unsicherheiten bei der Modellierung Rechnung zu tragen (ZADEH 1965, MCBRATNEY & ODEH 1997). Entsprechend wird bei der häufigkeitsstatistischen Analyse genügend großer Stichproben, die häufigste Ausbildung der Wasserspeicherfähigkeit unter bestimmten Standortbedingungen als ihre wahrscheinlichste (primäre) Ausprägung verstanden. Die übrigen Häufigkeiten benachbarter Ausprägungen repräsentieren weitere vorkommende Varianten. Hieraus ist bei einseitiger Häufigkeitsverteilung eine Tendenz zu höherer oder geringerer Wasserspeicherfähigkeit ableitbar. Die Häufigkeitsverteilung wird näherungsweise als Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen. Dies ermöglicht Schlussfolgerungen über die Sicherheit (Wahrscheinlichkeit) des Auftretens der einzelnen Merkmalsausprägungen, solange die Stichprobe repräsentativ ist und keine Zuweisungen subjektiver Wahrscheinlichkeiten, "z.B. in linguistischer Form als Expertenaussagen vorliegen" (FRIEDRICH 2001, S. 22).

Einschränkungen für die häufigkeitsstatistische Analyse ergeben sich grundsätzlich dadurch, dass die Menge an Bodeninformationen begrenzt ist ($n = 129$). Das hat zur Folge, dass die Stichproben wegen der naturräumlichen Vielfalt des Untersuchungsgebietes, nur bei weiter verbreiteten Standortbedingungen für eine rein statistisch begründete Aussage genügend groß sind. Hinzu kommt, dass bei kleinen Stichproben ($n < 10$) überproportional vertretene Ausreißer die statistischen Analyseergebnisse verzerren und damit zu falschen Aussagen führen können. Bei kleinen Stichproben muss die häufigkeitsstatistische Aussage deshalb mit vorhandenem bodenkundlichen Wissen kombiniert werden (WALTER ET AL. 2007). Hierunter sind die vorhandenen Kenntnisse über die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Standortbedingungen und den zu prognostizierenden Bodeneigenschaften zu verstehen. Dieses Expertenwissen beruht im Wesentlichen auf:

- örtlichem Erfahrungswissen aus umfassenden bodenkundlichen Standortaufnahmen,
- im Rahmen vergleichbarer Untersuchungen gewonnener oder aus der Region bekannter Erkenntnisse über die regel- bis gesetzmäßig auftretenden Zusammenhänge zwischen der Ausprägung der Standortfaktoren und den Bodenverhältnissen.

Die empirische Wissensbasis dient grundsätzlich der Überprüfung und Bewertung der Verteilungsfunktionen der Wasserspeicherfähigkeitswerte für die jeweiligen Standortbedingungen und der Entscheidung über die Ungültigkeit von Ausreißern. Bei sehr kleinen Stichproben, unscharfen oder standortkundlich unplausiblen Häufigkeitsverteilungen fehlt die Basis für eine statistisch begründete Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit. Die fehlende häufigkeitsstatistische Aussage kann bei genügendem Erfahrungswissen durch die Expertenaussage ersetzt werden. Dabei finden die vorliegenden Teilstichproben bzw. die einzelnen Profilinformatoren zur empirischen Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit Berücksichtigung. Für die wahrscheinlichkeitsbasierte Beurteilung der Sicherheit dieser wissensbasiert ermittelten Zusammenhänge fehlt die verteilungstatistische Basis (FRIEDRICH 2001). Aus diesem Grund beruht hier die Einstufung der Aussagesicherheit auf einer rein empirischen Bewertung. Die Integration des Erfahrungswissens in die Modellbildung ermöglicht desweiteren eine grundsätzliche Abschätzung der Prognostizierbarkeit von Bodeneigenschaften im Untersuchungsgebiet unter verschiedenen Standortbedingungen. So können bestimmte Prädiktorenkombinationen identifiziert werden, die Standortsituationen repräsentieren, bei denen die kleinräumige Variabilität der Bodenmerkmale nicht erfassbar ist (Kap. 5.2). Für diese Standortkombinationen kann empirisch begründet keine modellgestützte Aussage zur Wasserspeicherfähigkeit erfolgen.

Mit dem vorliegenden Modellkonzept ist der Einfluss der einzelnen Prädiktoren und ihrer Kombinationen auf die Verteilungsfunktionen der Bodeneigenschaften zu jedem Zeitpunkt der Modellbildung nachvollziehbar. Im Gegensatz zu automatisierten und geostatistischen Modellansätzen ermöglicht diese Vorgehensweise damit die Offenlegung von Standortbedingungen für die keine Aussagen zur Wasserspeicherfähigkeit möglich sind. Dies ist der Fall wenn die kleinräumige Variation der Speicherfähigkeit zu groß ist oder ohne erkennbare räumliche Abhängigkeit variiert, wenn die Stichproben zu klein sind oder sie die Realität eindeutig nicht repräsentativ wiedergeben, die Informationen einzelner Prädiktoren ungenügend sind und wenn das verfügbare Wissen nicht ausreicht (FRACEK & MOSIMANN 2012). Die mit der Wissensakquisition gewonnenen Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Standortbedingungen und der Wasserspeicherfähigkeit sind die Grundlage für die Erstellung des regelbasierten Vorhersagemodells.

2.3.2 Prinzipielles Vorgehen der Modellentwicklung

Die in dieser Arbeit durchgeführte Verfahrensweise der wissensbasierten Modellentwicklung ist im Projekt *Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft* entstanden und wird von MOSIMANN ET AL. (2011) vorgestellt. Abb. 5 fasst den Ablauf der wissensbasierten Entwicklung eines entscheidungsbasierten Vorhersagemodells zusammen. Die grundsätzliche Aufgabe der Modellentwicklung besteht darin, die aus der Wissensakquisition gewonnenen Erkenntnisse über die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Standortbedingungen und der Wasserspeicherfähigkeit der Waldböden in einem geeigneten Inferenzsystem formal (in Form von Algorithmen) umzusetzen (ZEIDLER 1999).

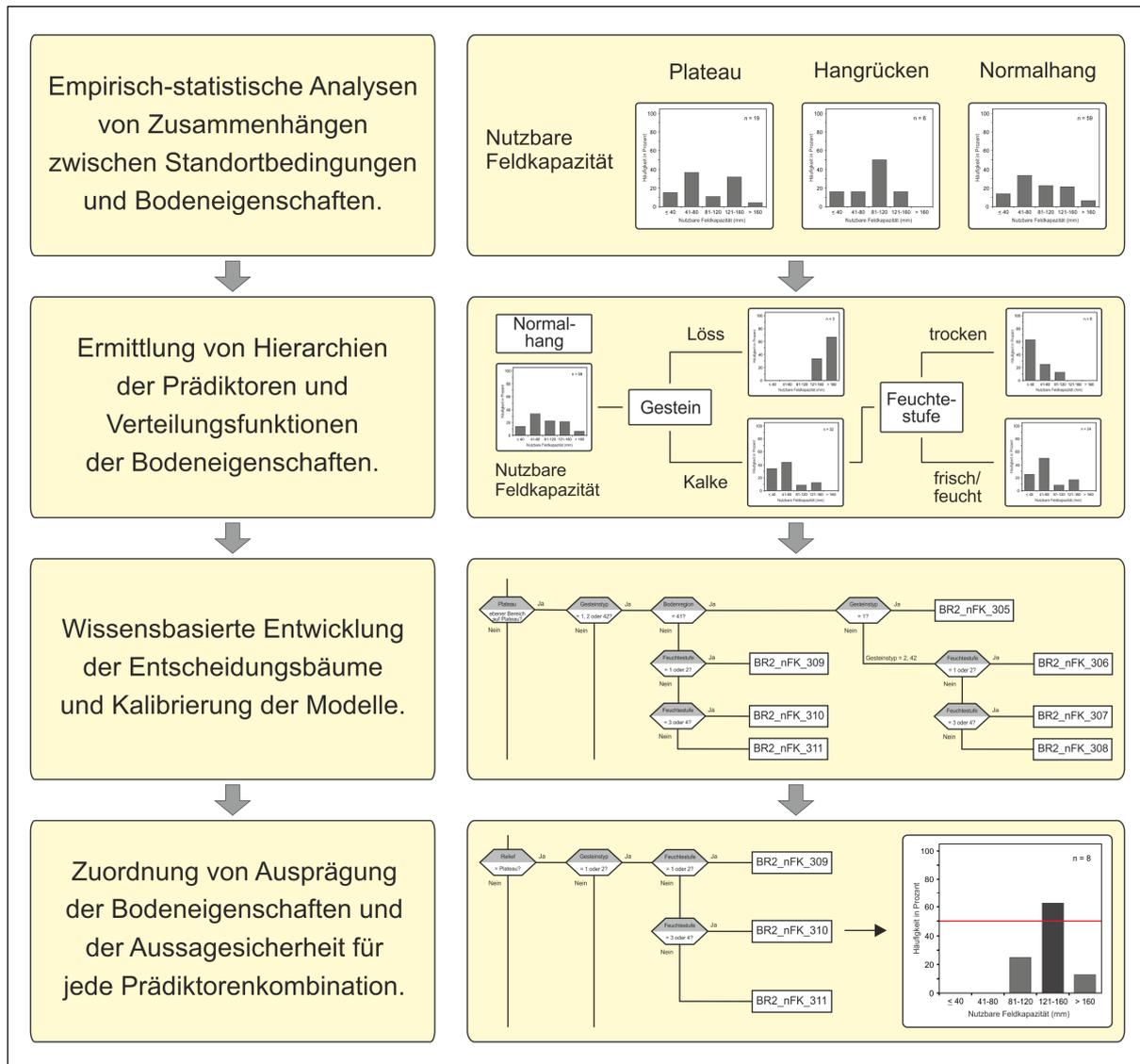


Abb. 5 Der Weg zu einem entscheidungsbasierten Vorhersagemodell.

In dieser Arbeit werden die identifizierten Zusammenhänge und Verteilungsfunktionen in Form von Unterteilungsregeln für die Prädiktoren ausgedrückt. Auf diesen Algorithmen basiert schließlich die Konstruktion eines regelbasierten Vorhersagemodells. Dieses Klassifizierungsmodell fasst Standortfaktoren zu Prädiktorenkombinationen zusammen, denen auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Wissensakquisition eine bestimmte Ausprägung der Wasserspeicherfähigkeit flächenbezogen zugeordnet werden kann.

Im ersten Schritt der Modellentwicklung dienen die Ergebnisse der Wissensakquisition dazu, Standortfaktoren auszuweisen, die als Prädiktoren Rückschlüsse auf die Ausprägung der Wasserspeicherfähigkeit zulassen. Diese Standortfaktoren werden schrittweise miteinander kombiniert, um daraus eine Hierarchie der Prädiktoren zu ermitteln. Die hierarchische Ordnung orientiert sich an der Bedeutung der einzelnen Prädiktoren als Vorhersagegrößen für die Ausprägung des Wasserspeichervermögens. Sie dient einer effizienten Strukturierung der Modelle für die räumlich differenzierte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit. Die ermittelte Prädiktorenhierarchie und die Grundstruktur der Prognosemodelle werden als wichtige Teilergebnisse dieser Arbeit in Kap. 5.2 ausführlich erläutert. Auf der hierarchischen

Ordnung gründet schließlich der Aufbau eines weit verästelten binären Entscheidungsbaumes. Die Modellstruktur entspricht dabei grundsätzlich den *Classification and Regression Trees* (CART) (BREIMAN ET AL. 1984, BERK 2008a). Aufgrund der vielfältigen naturräumlichen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes müssen für die einzelnen Bodenregionen Lösshügelland, Jura und Talböden individuelle Entscheidungsbäume entwickelt und anschließend kalibriert werden. Die Kalibrierung der Entscheidungsbäume dient zum Einen dem Beheben von redundanten oder fehlenden Unterteilungsregeln, so dass (a) jede Standortsituation von den regelbasierten Prognosemodellen erfasst und (b) jeder Prädiktorenkombination eine eindeutige Modellposition zugewiesen wird. Zum Anderen wird geprüft, ob einzelne Verästelungen oder Endknoten der Entscheidungsbäume zusammengefasst werden können, ohne dass sich dadurch ein Informationsverlust für die räumlich differenzierte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit ergibt. So wird die Effizienz der Modelle für die GIS-technische Modellumsetzung optimiert und die Übersichtlichkeit der Entscheidungsbäume erhöht.

Im Anschluss an die Modellkalibrierung werden den Endknoten der Entscheidungsbäume die endgültigen Modellaussagen zur Ausprägung der Wasserspeicherfähigkeit zugewiesen. Eine häufigkeitsstatistisch begründete Aussage ist für eine Prädiktorenkombination an einem Endknoten nur dann möglich, wenn bei genügend großer Stichprobe das Häufigkeitsmaximum einer FK/nFK-Klasse die 50 %-Grenze überschreitet. Diese Klasse wird dann der Prädiktorenkombination als Prognose zugewiesen. Aus der Häufigkeit benachbarter Klassen wird bei einseitiger Verteilung eine Tendenz zu höherer oder niedrigerer FK/nFK abgeleitet und diese als sekundäre Ausprägung ausgewiesen. Zudem umfasst die Prognose eine Angabe zur Aussagesicherheit, die ebenfalls auf der Häufigkeitsverteilung der Teilstichprobe am jeweiligen Endknoten basiert. Sie entspricht dem relativen Anteil der prognostizierten FK/nFK-Klasse an der Häufigkeitsverteilung und liefert damit eine direkte Information zur Güte der Modellaussage.

Ist aus den in Kap. 2.3.1 genannten Gründen für eine Prädiktorenkombination keine häufigkeitsstatistische Aussage zur Wasserspeicherfähigkeit möglich (z.B. Stichprobe zu klein), dann wird diese bei ausreichendem Erfahrungswissen durch eine empirisch-begründete Einstufung ersetzt (eine ausführliche Erläuterung erfolgt in Kap. 5.2). Bei dieser rein wissensbasierten Prognose existiert keine verteilungsstatistische Basis. Die Angabe der Aussagesicherheit beruht auf einer rein empirischen Einstufung, die sich bei kleinen Stichproben auf die Beurteilung der Häufigkeitsaussage, auf die Bewertung einzelner Bodenprofile und auf umfangreiche Geländeerfahrung stützt. An einigen Endknoten der Entscheidungsbäume liegen keine Wasserspeicherfähigkeitswerte für ein Bodenprofil vor. Für diese Prädiktorenkombinationen erfolgt eine Abschätzung der notwendigen Informationen zum Wasserspeichervermögen mit Hilfe der in Kap 2.2.3 beschriebenen Pedotransferfunktion. Die Aussagesicherheit dieser aus prognostizierten Gründigkeits- und Skeletthaltklassen abgeschätzten Wasserspeicherfähigkeitswerte unterliegt informationalen Unsicherheiten (FRIEDRICH 2001) und ist grundsätzlich eingeschränkt. Die wissensbasierte Modellierung schließt mit der Ausweisung der Prädiktorenkombinationen ab, für die aus den in Kap. 2.3.1 genannten Gründen keine Aussage zur Wasserspeicherfähigkeit möglich ist.

2.4 Random Forest

Random Forest (RF) ist eine Weiterentwicklung der CART (BREIMAN ET AL. 1984). Bei dem von BREIMAN (2001) veröffentlichten Algorithmus handelt es sich um ein mathematisch-statistisches Klassifizierungs- und Regressionsmodell in Form eines Ensembles einzelner, binärer und voneinander unabhängiger Entscheidungsbäume. Einen vereinfachten Überblick über die Erstellung eines RF und die Prognose einer Zielgröße gibt Abb. 6.

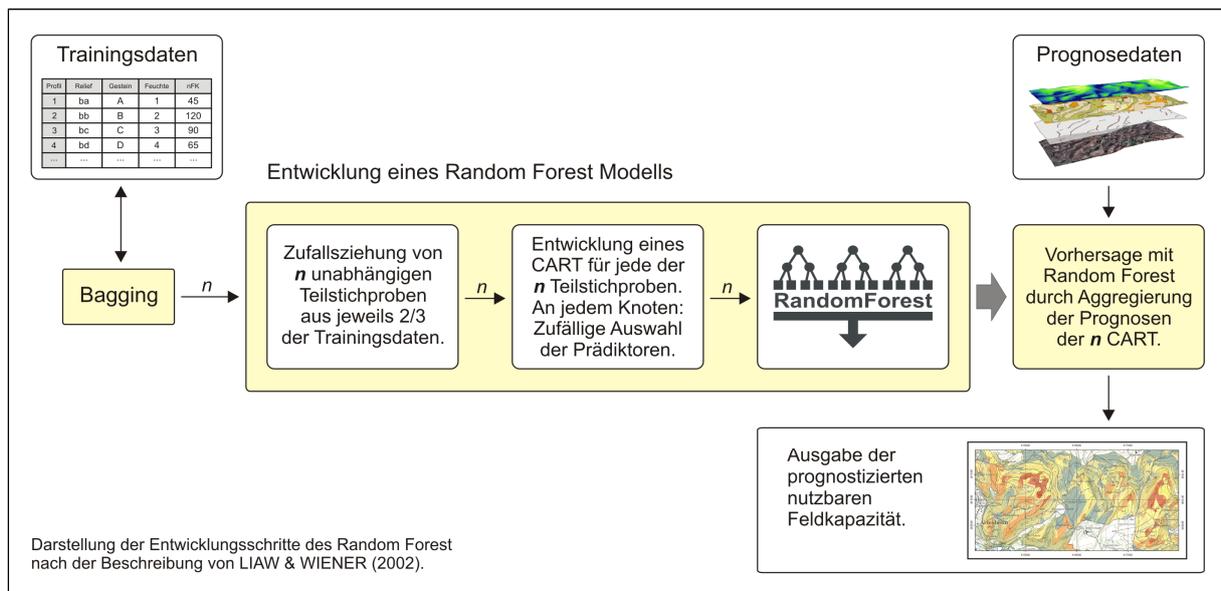


Abb. 6 Vereinfachtes Schema zum Ablauf der Modellierung mit Random Forest.

Jeder Entscheidungsbaum des Ensembles wird bei RF mit dem CART-Verfahren (BREIMAN ET AL. 1984) aus einer zufällig gezogenen Teilstichprobe der Trainingsdaten (Bodenprofil-daten) entwickelt. Diese Teilstichproben sind voneinander unabhängig und umfassen jeweils zwei Drittel der Trainingsdaten. Dieses Verfahren des *simple random sampling with replacement* (zufälliges Ziehen mit Zurücklegen) der Stichprobendaten wird als *bagging* (**Bootstrap Aggregating**) bezeichnet (BREIMAN 1996). Mittels *bagging* kann so theoretisch eine unendliche Menge von Datensätzen aus einem begrenzten Stichprobenumfang erzeugt werden. Dies ermöglicht die Generierung einer beliebig großen Zahl von Entscheidungsbäumen je RF-Ensemble.

Das übrige nicht gezogene Drittel der Trainingsdaten nennt man *out of bag*. Diese *out of bag* Fälle dienen zur unabhängigen Validierung und Fehlereinschätzung des Ensembles (*oob error estimate*) (BREIMAN & CUTLER 2007, BERK 2008b). Diese interne Prüfung der RF-Modelle sowie verschiedene Kalibrierungsmöglichkeiten werden in Kap. 6 beschrieben. Darüber hinaus wird bei RF die Konstruktion der Bäume gegenüber dem CART-Verfahren um eine Modifizierung des *bagging* ergänzt. Für die Erstellung des besten *Splits* (Unterteilungsregel) an einem Knoten des Baumes werden nicht sämtliche Vorhersagegrößen, sondern nur eine zufällig selektierte Teilmenge der Prädiktoren verwendet (LIAW & WIENER 2002). Somit wird jeder Baum aus einer zufällig gezogenen Teilstichprobe und an jedem Knoten aus einer zufälligen Auswahl der Prädiktoren entwickelt (BERK 2008b).

Insgesamt generiert der Algorithmus große Entscheidungsbäume, die nicht gestutzt werden müssen. Mit diesen neuen Zufallskomponenten und durch die Größe der Bäume wird RF insgesamt stabiler. Das Problem möglicher Autokorrelationen sowie der systematischen Fehler (*bias*) werden reduziert (BENITO GARZÓN ET AL. 2006, BERK 2008b). Damit erhöht sich die Genauigkeit und Robustheit dieser Ensemble Methode für die Klassifikation.

Für die Prognose mit RF durchläuft schließlich jede Rasterzelle aus dem Untersuchungsgebiet mit ihren Informationen zu den Prädiktoren alle Entscheidungsbäume des Random Forest und erhält als Prognose denjenigen Wert, welcher vom Ensemble auf Grundlage der erlernten Klassifizierungsregeln am häufigsten ausgewiesen wird. Die Prognosen der einzelnen Bäume werden dementsprechend über Mehrheitsentscheidungen vereinigt. Dies erfolgt anhand des Modus bei Klassifikation (nominales und ordinales Skalenniveau) oder über den Mittelwert bei Regression (metrisches Skalenniveau). Durch diese Mehrheitsentscheidungen der Klassifizierer kann die Instabilität der Prognose substantiell reduziert werden (BERK 2008b). Die Verlässlichkeit und Stabilität der Vorhersage eines RF ist damit deutlich höher als die eines einzelnen CART. Neben der Prognose weist RF für jede Rasterzelle auch eine Abschätzung zur Wahrscheinlichkeit der Vorhersage aus. Diese *class probability estimate* (CPE) entspricht dem prozentualen Anteil der Entscheidungsbäume des RF, welche diejenige Merkmalsklasse ausgewiesen haben, die vom Ensemble als Prognose für die Rasterzelle ausgewiesen wurde.

Eine umfassende mathematische Erläuterung des Algorithmus kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Für exakte mathematische Definitionen und Berechnungsmethoden sei auf die Veröffentlichungen von BREIMAN (2001) und BREIMAN & CUTLER (2007) sowie auf die ausführlichen Erläuterungen von BERK (2008b) verwiesen.

2.5 Technische Modellumsetzung

Die umfangreichen häufigkeitsstatistischen Analysen und sämtliche regressionsstatistische Auswertungen zur wissensbasierten Modellentwicklung erfolgen mit SPSS Statistics (IBM). Für die teilautomatisierten Prognosemodelle wird der Algorithmus *Random Forest Version 4.6-6* verwendet. Er ist in die Software *R Version 2.14.1* (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2011) implementiert. RF steht über den CRAN-Server (<http://cran.r-project.org>) als Paket *randomForest* frei zur Verfügung.

Um die digitalen Prognosekarten des Wasserspeichervermögens erstellen zu können, müssen die Modelle an GIS gekoppelt werden. Diese technische Modellumsetzung erfolgt nach dem Verfahren von MOSIMANN ET AL. (2011). Die Abb. 7 gibt darüber einen schematischen Überblick und nennt die jeweils verwendeten Softwarepakete. Dabei erfolgt die Implementierung der Modelle in GIS über die Kopplung von ArcGIS 9.3 (ESRI) und MS Access 2007 auf der Grundlage von *Personal Geodatabases (PGDB)*. Zentral integrierte Datenbanken dienen zur Verwaltung der Stichproben- und Geodaten, zum Datentransfer zwischen den Statistikprogrammen und GIS, für die skriptbasierte Modellumsetzung und zur Durchführung von Prüfroutinen für die Modellprognosen.

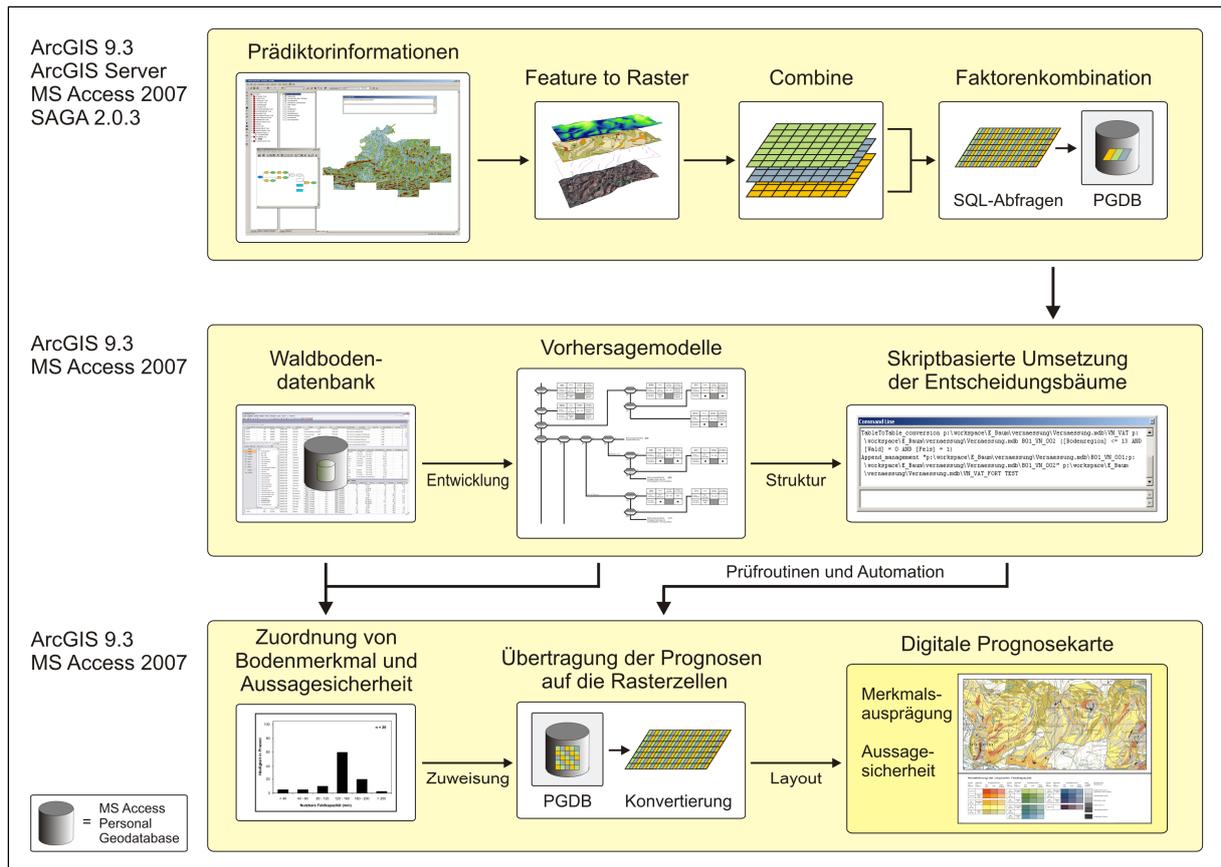


Abb. 7 Schema der technischen Modellumsetzung und GIS-Kopplung.

Um die flächendeckenden Prognosen ausweisen zu können, werden zunächst alle hierfür benötigten Informationen (Prädiktoren) in ArcGIS zu einem Rasterdatensatz kombiniert. Die einzelnen Prädiktorenkombinationen werden mit einer eindeutigen Kodierung versehen und sämtliche Informationen als *Value Attribute Table* (VAT) in eine PGDB exportiert. Es folgt die Übersetzung der Klassifizierungsregeln der wissensbasierten Entscheidungs-bäume in SQL-Kommandozeilen. Die regelbasierten Modelle werden unter ArcGIS skriptbasiert auf die Eingangsdaten in der PGDB angewendet. Jede Prädiktorenkombination im VAT erhält eine eindeutige Modellposition und die Prognose der Wasserspeicherfähigkeit ist somit übertragbar. Als *Data Frames* in R importiert, erfolgt auf Basis der identischen Eingangsdaten die automatisierte Prognose mit den zuvor entwickelten Random Forest Modellen. Im Anschluss erfassen Prüfroutinen unter MS Access 2007, ob jeder Eintrag im VAT eindeutig mit einer Prognose belegt ist. Bei redundanter oder fehlender Belegung erfolgen Fehlermeldungen. Die kontrollierten Prognoseergebnisse werden dann über die eindeutige Kodierung an den Rasterdatensatz gekoppelt und in ArcGIS integriert. Die technische Modellumsetzung schließt mit einer umfangreichen kartographischen Aufbereitung der Ergebnisse (u.a. Generalisierung) unter ArcGIS ab.

Das Verfahren der skriptbasierten Modellumsetzung auf der Basis von PGDB ist transparent und zu jeder Zeit kontrollierbar. Eine Überarbeitung der SQL-Kommandozeilen ist bei Anpassungen der Prognosemodelle schnell möglich. Ein weiterer Vorteil ist der geringe Rechenaufwand für die Modellprognose durch die Zusammenfassung der Prädiktorinformationen in einer VAT unter MS Access. Ein Nachteil der technischen Modellumsetzung

besteht darin, dass die notwendigen Konvertierungsschritte für den Datentransfer zu wiederholen sind, sobald die Anpassung einer der Prädiktorinformationen nötig ist. Der skriptbasierte Zugriff von ArcGIS auf die Eingangsdaten in MS Access ist eine weitere Schwäche des Verfahrens. Zukünftig wäre hier eine vollständige Modellumsetzung innerhalb einer Softwareumgebung erstrebenswert. Denkbar ist eine Programmierung der Prognosemodelle als C++-basierte SAGA-Module. Konvertierungen der Geodaten in Datenbanktabellen und Datentransfers zwischen verschiedenen Softwareumgebungen (ArcGIS und MS Access) würden hierdurch überflüssig. Diese Vorgehensweise reduziert potenzielle Fehlerquellen und steigert die Effizienz der technischen Modellumsetzung.

3 Geomorphographische Reliefgliederung für die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften

Die digitale Reliefgliederung ist eine elementare Voraussetzung für die modellgestützte räumliche Vorhersage von Bodeneigenschaften und des standörtlichen Wasserhaushalts. Dieses Kapitel stellt eine Reliefanalyse vor, die geomorphometrische und geomorphographische Reliefparameter berechnet und diese zu komplexen Reliefformtypen kombiniert. Die Modellierung stützt sich dabei auf detaillierte Geländekenntnisse zur Gestalt und den Übergängen der Reliefformen und auf Erfahrungen aus umfangreichen standörtlichen Waldbodenaufnahmen. Dies ermöglicht die Ausweisung von Grenzkriterien für die Modellierung der Reliefparameter und damit eine regionspezifische Anpassung der Reliefformtypen. Zudem handelt es sich um eine Reliefgliederung, die gezielt auf die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften mit faktorenbasierten Modellen ausgerichtet ist. Die folgende Darstellung entspricht in weiten Teilen der Veröffentlichung von HERBST ET AL. (2012).

3.1 Grundgedanken und Zielsetzungen

Für die Entwicklung eines Reliefgliederungsverfahrens mit dem Ziel der Prognose von Waldbodeneigenschaften sind folgende Probleme und Aufgabenstellungen maßgebend:

- Aus den Erfahrungen umfangreicher Bodenprofilaufnahmen und durch detaillierte Geländekenntnisse sind morphographische Formtypen bekannt, die die räumliche Ausprägung der Bodeneigenschaften im Untersuchungsgebiet maßgeblich beeinflussen. Diese Formtypen müssen durch die Reliefgliederung abgebildet werden.
- Teilautomatisierte Reliefgliederungsverfahren mit vorab festgelegten Klassifizierungskriterien (PENNOCK ET AL. 1987, REUTER ET AL. 2006), sind für die oben angeführte Zielsetzung zu ungenau. Es müssen flexible Verfahren implementiert werden, deren Parametrisierung die Integration und Abstimmung von Schwellenwerten erlaubt (KLINGEISEN ET AL. 2008) und damit die Anpassung an das regional landschaftstypische Formeninventar ermöglicht (BOCK ET AL. 2007).
- Automatisierte Reliefanalyseverfahren mit statistischen Methoden (z.B. Clusteranalysen) gliedern das Relief anhand von Homogenitätskriterien der morphometrischen Reliefattribute (BURROUGH ET AL. 2000, MACMILLAN ET AL. 2000, ARRELL ET AL. 2007). Die geomorphologische Reliefklassifikation steht im Vordergrund. Der Zusammenhang zwischen solchen klassifizierten Reliefeinheiten und den Bodeneigenschaften ist aber häufig begrenzt (PARK ET AL. 2001). Es wird eine Reliefgliederung benötigt, die sich strikt an der modellgestützten Ableitung von Bodeneigenschaften orientiert.
- Die angewandten Methoden sollen transparent und nachvollziehbar sein sowie leicht interpretierbare Ergebnisse liefern. Keine automatisierten *black-box* Verfahren.
- Die modellierten Reliefeinheiten müssen mit weiteren flächendeckend vorliegenden Prädiktoren in entscheidungsbasierten Vorhersagemodellen zur Prognose von Bodeneigenschaften kombiniert werden (MERTENS ET AL. 2002).

Hierauf basiert die Entwicklung eines Reliefgliederungsansatzes, der auf der Kombination und Verknüpfung der Ergebnisse etablierter Reliefanalyseverfahren basiert (u.a. ZEVENBERGEN & THORNE 1987, BÖHNER & KÖTHE 2003, CONRAD 2006). Geomorphometrische und geomorphographische Reliefparameter sowie hydrologische Kennwerte werden individuell formelbasiert zu komplexen Reliefparametern kombiniert (BOCK ET AL. 2007). Das Verfahren stützt sich auf detaillierte Geländekenntnisse und wissensbasierte Schwellenwerte. Diese Vorgehensweise soll die Ausweisung regional angepasster komplexer geomorphographischer Reliefparameter ermöglichen, welche Bereiche mit jeweils möglichst homogenem pedogenetischem Prozessgeschehen repräsentieren (PARK ET AL. 2001, BOCK ET AL. 2007). Die Reliefgliederung wird somit spezifisch auf die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften im Untersuchungsgebiet ausgerichtet und soll die räumliche und hierarchische Grundstruktur für die Entwicklung der Prognosemodelle liefern.

3.2 Reliefmodellierung

3.2.1 Konzeption der Reliefgliederung

Grundlage der Reliefanalyse ist das digitale DGM von SWISSTOPO, das als interpoliertes Rastergittermodell in einer Auflösung von 2 m flächendeckend vorliegt. Für die Vorhersage von Bodeneigenschaften ist es elementar, dass die Reliefgliederung auf das jeweils landschaftstypische Formeninventar der heterogen ausgestatteten Landschaftsräume des Untersuchungsgebietes angepasst wird. Dementsprechend erfolgt eine differenzierte Ausweisung von Schwellenwerten und Grenzkriterien (Tab. 5) für die Klassifikation der morphometrischen Reliefattribute und die anschließende Aggregation zu Reliefformtypen.

Die Schwellenwerte basieren zum einen auf Expertenwissen in Form detaillierter Geländekenntnisse und Kartiererfahrungen in der Region. Zum anderen stehen rund 450 Waldbodenprofile zur Verfügung (Kap. 2.2.1). Mit diesen Punktinformationen zu den Waldböden können lagebezogene Zusammenhänge zwischen den modellierten Reliefeinheiten und den Bodeneigenschaften empirisch-statistisch überprüft und Grenzkriterien für die Reliefeinheiten angepasst werden (Abb. 8).

Diese individuelle komplexe Reliefgliederung wird mit einem iterativen Verfahren in mehreren Schritten durchgeführt:

1. Berechnung kontinuierlich-variierender geomorphometrischer Reliefparameter und prozessorientierter hydrologischer Kennwerte.
2. Regionsspezifische Ableitung linearer und flächenhafter Reliefparameter aus den geomorphometrischen Parametern und hydrologischen Kennwerten.
3. Kombination und Klassifikation der geomorphometrischen Reliefparameter zu diskreten geomorphographischen Reliefeinheiten.
4. Empirisch-statistische Ermittlung kombiniert mit Expertenwissen und explorativ-iterative Anpassung von Schwellenwerten unter Berücksichtigung der spezifischen pedologischen und geomorphologischen Prozessbedingungen in den Bodenregionen.
5. Ausweisung von diskreten Reliefeinheiten und -formtypen als Prädiktoren für die modellgestützte Vorhersage von Bodeneigenschaften.

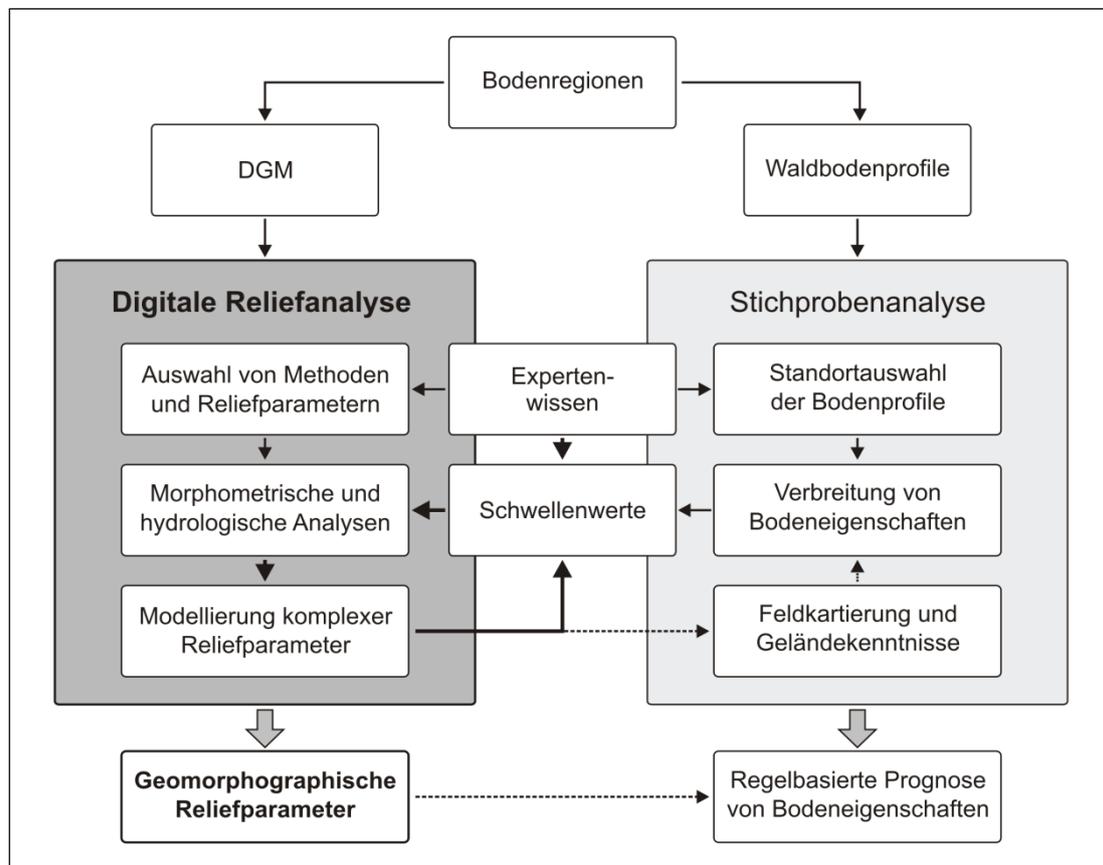


Abb. 8 Konzeptionelle Vorgehensweise der digitalen Reliefanalyse.

3.2.2 Modellierung der Reliefparameter

Als Grundlage der Reliefgliederung werden zunächst kontinuierlich-variierende geomorphometrische Reliefparameter nach ausgewählten Verfahren berechnet. Tab. 4 stellt die verwendeten Methoden zusammen. Die geomorphometrischen Reliefparameter werden zu diskreten geomorphographischen Reliefeinheiten kombiniert und klassifiziert. Die Einheiten werden dann in einer Detailgliederung in höher auflösende Reliefformtypen weiter differenziert. Tab. 5 zeigt anhand der zusammengestellten Schwellenwerte, welche geomorphometrischen Reliefeigenschaften zur Modellierung der verschiedenen Reliefeinheiten und -formtypen verwendet wurden und welche Abgrenzungs- und Klassifikationskriterien hierfür zugrunde liegen. Beispiele von Schwellenwerten werden im Kap. 3.3 diskutiert.

Reliefparameter	Anmerkungen	Referenzen
Elevation	Absolute Höhenwerte des DEM in m. ü. NN.	SWISSTOPO 2005
Slope	Hangneigung in Grad.	BURROUGH & McDONELL 1998
Profile curvature	Wölbung der Oberfläche (m^{-1}) in Richtung der Hangneigung.	ZEVENBERGEN & THORNE 1987
Plan curvature	Wölbung der Oberfläche (m^{-1}) quer zur Gefällrichtung.	ZEVENBERGEN & THORNE 1987
Convergence Index	Abweichungen der Expositionswerte aller Nachbarzellen von der Richtung zur zentralen Rasterzelle (9 Zellen Matrix).	KÖTHE & LEHMEIER 1996
Topographic Position Index	Rasterspezifische Berechnung der Differenz zur mittleren Höhe einer definierbaren Nachbarschaft (Focal Function).	WEISS 2001
Flow Direction	<i>Deterministic 8 (D8)</i> Abflussalgorithmus.	JENSON & DOMINGUE 1988
Flow Accumulation	Zuordnung der rasterspezifischen Einzugsgebiete.	O'CALLAGHAN & MARK 1984
Channel Network	Identifikation von Gerinnenetzen bzw. von morphologischen Tiefenlinien auf Basis der <i>Flow Accumulation</i> .	TARBOTON ET AL. 1991
Vertical Distance to Channel Network	Rasterspezifische Höhe über dem Gerinnenetz (in m).	CONRAD 2002, BÖHNER & KÖTHE 2003
Flow Path Length	Maximale Fließweglänge (in m), die der Oberflächenabfluss bis zu jeder Rasterzelle zurücklegt.	CONRAD 2006

Tab. 4 Liste der verwendeten geomorphometrischen Reliefparameter.

3.2.3 Überprüfung der Modellierungsergebnisse

Die Modellierungsergebnisse wurden mehrfach durch Geländebegehungen in verschiedenen Bereichen des Untersuchungsgebietes vor Ort überprüft. Besonders die modellierten Steilhänge, Scheitelbereiche, Hangkanten und konvex geformten Hangbereiche zeigen zumeist eine gute Übereinstimmung bei der Abbildung der örtlichen Formtypen. Die Ergebniskarten weisen zu häufig kleine Scheitelbereiche und konvex geformte Hangbereiche aus. Deshalb bedarf es einer Mindestflächengröße für die Filterung relevanter Scheitelbereiche und konvexer Hangformen. Die Breite der Hangkantenbereiche konnte als realistische Anpassung auf 20 m festgesetzt werden.

Erkenntnisse aus den Geländebegehungen dienen der Anpassung der Ergebniskarten. Im GIS automatisierte Korrekturen (z.B. Generalisierung von Grenzen) sind hierbei nur teilweise anwendbar. Die Reliefmodellierung führt beispielsweise Hangkanten häufig zu weit von oben in die Hänge hinein. Tiefenlinien werden in verschiedenen Fällen in den Hängen zu hoch hinaufgeführt. Geländestufen und Artefakte im Höhenmodell sind für die angewandten Algorithmen nur schwer interpretierbar. Die weitere Anpassung von Schwellenwerten (z.B. für die *flow accumulation* bei den Tiefenlinien) führt deshalb zu keiner wesentlichen Verbesserung der Ergebnisse. Auf Basis lokaler Geländekenntnisse mussten deshalb häufig manuelle Anpassungen bei den Hangkanten und Tiefenlinien durchgeführt werden. Eine valide Reliefmodellierung verlangt die Überprüfung auf der Grundlage von Geländebegehungen und langjährigen detaillierten Geländekenntnissen. Der Zeitaufwand für die Durchführung der manuellen Korrekturen und der abschließenden digitalen Umsetzung betrug dabei mindestens ein Viertel des Zeitaufwandes für die GIS-gestützte Reliefgliederung.

Relief-einheiten der Haupt-gliederung	Beschreibung	Hang-neigung (Grad)	Vertikal-wölbung (m ⁻¹)	Horizontal-wölbung (m ⁻¹)	Conver-gence Index	Topo-graphic Position Index	Flow Accu-mulation	Vertical Distance Channel Network	Minimale Flächen-größe (m ²)	Maximale Breite (m)	Maximale Horizontal-distanz (m)	Such-radialen für Mittel-wertbe-rechnung (m)	Parameter durch Mittelwerte geglättet
Hangkanten-bereiche	Vertikal konvexe Hang-unstetigkeiten am Rand von Juratafeln, obere Tal-ränder, Terrassenkanten, Hangstufen.	≤ - 0,5						> 5		20		30	Vertikal-wölbung
Steilhänge	Stelle geschlossene Hangbereiche, zumeist Oberhang.	> 32			< 20			> 5	800			16	Neigung
Scheitel	Sattel (Antiklinale), flache und steile Scheitel im Hang und auf Vollformen sowie Hangrücken, konvexe Wölbungen auf den Plateaus.	> 13	> - 0,5		≥ 20			> 5	3000			40	Integriert in Con.-Index
		≤ 13	> - 0,5		≥ 20			> 5	4000 / 10000			20	Integriert in Con.-Index
					≥ 20			> 5	4000			20	Integriert in Con.-Index
					≥ 20			> 5	4000			20	Integriert in Con.-Index
Plateaus	Ebene	≤ 4			Löss: < 10 Jura: < 20	> 0,8		> 2,5	2500			20 / 350	Neigung / Integriert in TPI
	Plateaubereiche	4 - 8			Löss: < 10 Jura: < 20	> 0,8		> 2,5	50000 (Plateaus gesamt)			20 / 350	Neigung / Integriert in TPI
Hänge	Konvex geformte Hangbereiche	> - 0,5	≥ 0,3		Löss: < 10 Jura: < 20	< 0,8		> 5	1000 / 2100			20	Absolute Höhe
	Flachhänge	≤ 5	> - 0,5	< 0,3	Löss: < 10 Jura: < 20	< 0,8		> 5	2000			20	Neigung
	Normalhänge	5 - 32	> - 0,5	< 0,3	Löss: < 10 Jura: < 20	< 0,8		> 5				20	Neigung
Tiefen-bereiche	Muldenbereiche auf Plateaus	Löss: ≤ 10 Jura: ≤ 15					> 40000	≤ 2,5	1000	60	100 (zur TL)	20	Neigung
	Steile Tiefenlinie (TL), konkave Hangbereiche	Löss: > 10 Jura: > 15					> 40000	≤ 5	1000	45	100 (zur TL)	20	Neigung
	Muldentäler und Talböden	Löss: ≤ 10 Jura: ≤ 15					> 40000	≤ 2,5	1000	45 (nicht f. Talböden)	100 (nicht f. Talböden)	20	Neigung

Tab. 5 Modellerte Reliefeinheiten und -formtypen mit Abgrenzungskriterien für die grundlegenden geomorphometrischen Relieffparameter. Variierende Schwellenwerte für die Bodenregionen Löss und Jura werden getrennt angegeben. Weitere Schwellenwerte und Bedingungen für ergänzende Hilfsgrößen und die Durchführung umfangreicherer GIS-gestützter Modellierungsschritte sind nicht Bestandteil dieser Aufstellung.

3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.1 Hierarchie und Abgrenzung der Reliefformen für die Bodenvorhersage

Das Ergebnis der Reliefmodellierung ist eine zweistufige hierarchische Reliefgliederung (Abb. 9). Mit dieser ordnenden Gliederung (DIKAU & SCHMIDT 1999) wird das Relief im Untersuchungsgebiet in neunzehn diskrete geomorphographische Reliefeinheiten und -formtypen differenziert.

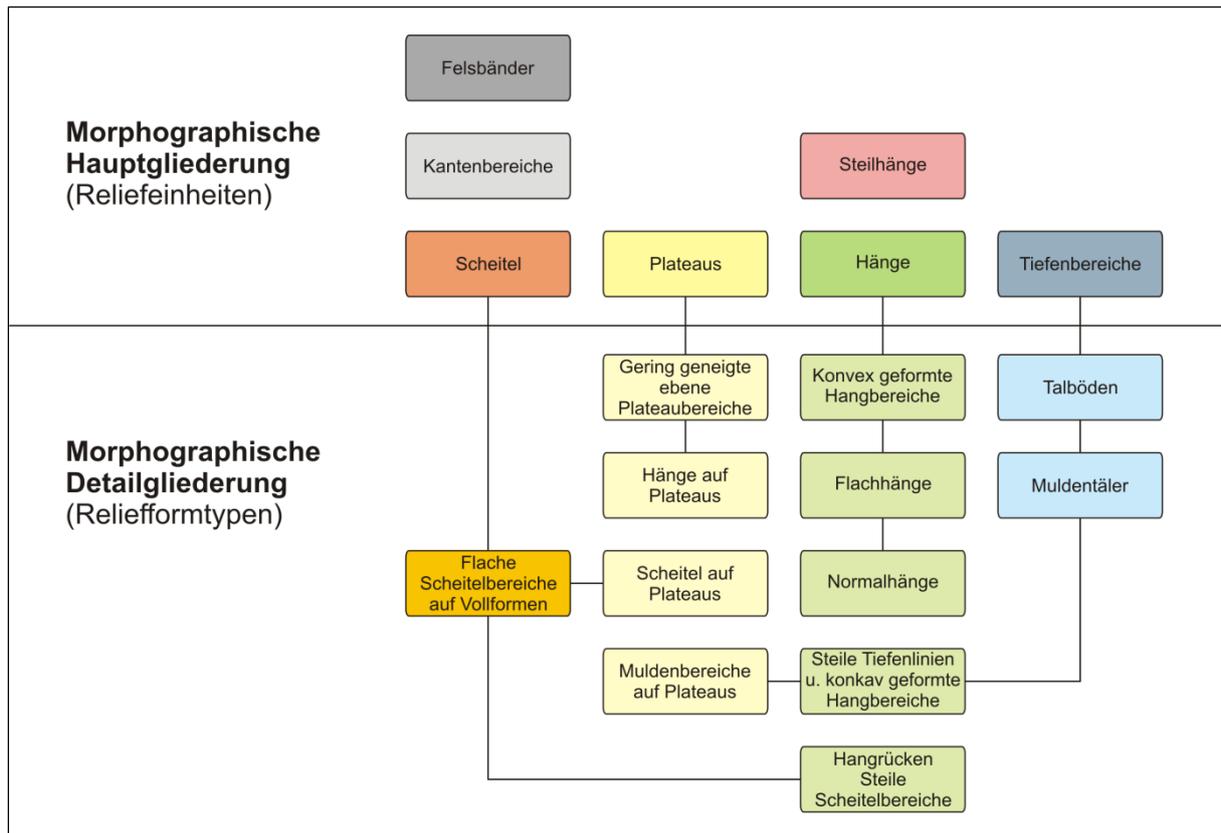


Abb. 9 Reliefeinheiten und -formtypen der zweistufigen hierarchischen morphographischen Haupt- und Detailgliederung im Jura.

In Tab. 5 werden die wichtigsten Schwellenwerte für die verschiedenen morphometrischen Reliefparameter zur Abgrenzung der Reliefformen und -typen angegeben. Diese basieren auf einer schrittweisen Annäherung der optimalen Abgrenzung der einzelnen morphographischen Einheiten auf Basis einer empirisch-statistischen Untersuchung der lagebezogenen Zusammenhänge zwischen den modellierten Reliefeinheiten und den Bodeneigenschaften sowie auf Expertenwissen aus der Feldkartierung. Da sich das Untersuchungsgebiet im Schnittpunkt dreier Hauptlandschaftstypen befindet (Kap. 1.3), mussten für einige morphometrische Reliefattribute differenzierte Schwellenwerte ermittelt werden. So liegt beispielsweise im Lösshügelland der Schwellenwert für den *Convergence Index* bei ≥ 10 (-), um Reliefformen mit deutlich divergenten Abflussbedingungen (Divergenzbereiche) in einer räumlich plausiblen Ausdehnung ausweisen zu können. Im Jura können hingegen Sattel, flache Scheitel auf Vollformen oder Hangrücken nur mit einem Schwellenwert

von ≥ 20 (-) korrekt abgebildet werden. Regional angepasste Reliefeinheiten des Mesoreliefs (z.B. Plateaus, Scheitelbereiche, Tiefenbereiche) können mit dieser Vorgehensweise modelliert werden. Die Einheiten repräsentieren Bereiche mit einem relativ homogenen pedogenetischen Prozessgeschehen und sind damit für die Ausbildung und Verbreitung der Bodeneigenschaften maßgeblich von Bedeutung. Diese morphographische Hauptgliederung liefert damit die räumliche und hierarchische Grundstruktur für die Entwicklung der entscheidungsbasierten Prognosemodelle.

Für eine detaillierte Erfassung des Einflusses der Reliefformen auf die Ausbildung der Bodeneigenschaften ist die räumliche Auflösung der Hauptgliederung noch zu gering. Deshalb werden die Reliefeinheiten in einer höher aufgelösten Detailgliederung in Relief-formtypen weiter untergliedert. So wird z.B. die Reliefeinheit Plateau, mit der Detailgliederung in die Reliefformtypen ebene Plateaubereiche sowie Hänge, Scheitel und Muldenbereiche auf Plateaus weiter differenziert. Damit können sowohl die übergeordnete Bedeutung des Mesoreliefs für die räumliche Verbreitung der Bodeneigenschaften, als auch die lokal kleinräumig variierenden Zusammenhänge zwischen den Reliefstrukturen und den Merkmalsausprägungen der Waldböden berücksichtigt werden.

3.3.2 Morphographische Reliefgliederung der unterschiedlichen Landschaftstypen

Abb. 10 zeigt Ausschnitte der Reliefgliederung aus dem Tafel- und Faltenjura. Die Reliefeinheiten der morphographischen Hauptgliederung werden in den unteren Kartenausschnitten in die Reliefformtypen der Detailgliederung weiter differenziert. Die modellierten Reliefeinheiten geben die dominierenden Reliefstrukturen gut wieder. Dies gilt z.B. für die von steilwandigen Muldentälern unterbrochenen Plateaus (orangefarben) in der Schichtstufenlandschaft des Tafeljura (Ausschnitt 1) und den Wechsel von z.T. kurzen länglichen Scheitelbereichen auf den Kuppen (dunkel-grünfarben) mit dazwischen liegenden Tiefenbereichen (blau) in der schuppenbauartigen Überschiebungszone am Rand des Faltenjura (Ausschnitt 2). Der hellgelbe Farbton in beiden Ausschnitten entspricht den zunächst nicht weiter untergliederten Hangbereichen, die bezüglich Hangneigung und Kleinformung (konvex / konkave Wölbung) unterschiedlich heterogen sind.

Die weitere Untergliederung der Reliefhaupteinheiten in die Reliefformtypen, stellt die Abb. 9 in den mittleren und unteren Ausschnitten dar. Hier ist v.a. eine Differenzierung der Plateaus und Hangbereiche erkennbar. Die Plateaus werden anhand der geglätteten Neigung in ebene und leicht geneigte Bereiche unterteilt. Diese neigungsbasierte Plateaudifferenzierung dient u.a. zur Annäherung an die Substratverbreitungsgrenzen von Decklehmen und zur Abgrenzung von mächtigen Böden mit Deckschichten gegenüber eher flachgründigen Böden (v.a. am stärker geneigten Rand der Tafeln im Übergang zum Hang). Darüber hinaus dienen die modellierten Scheitel- und Muldenbereiche auf den Plateaus für eine weitere Differenzierung der Tafeljurahochflächen.

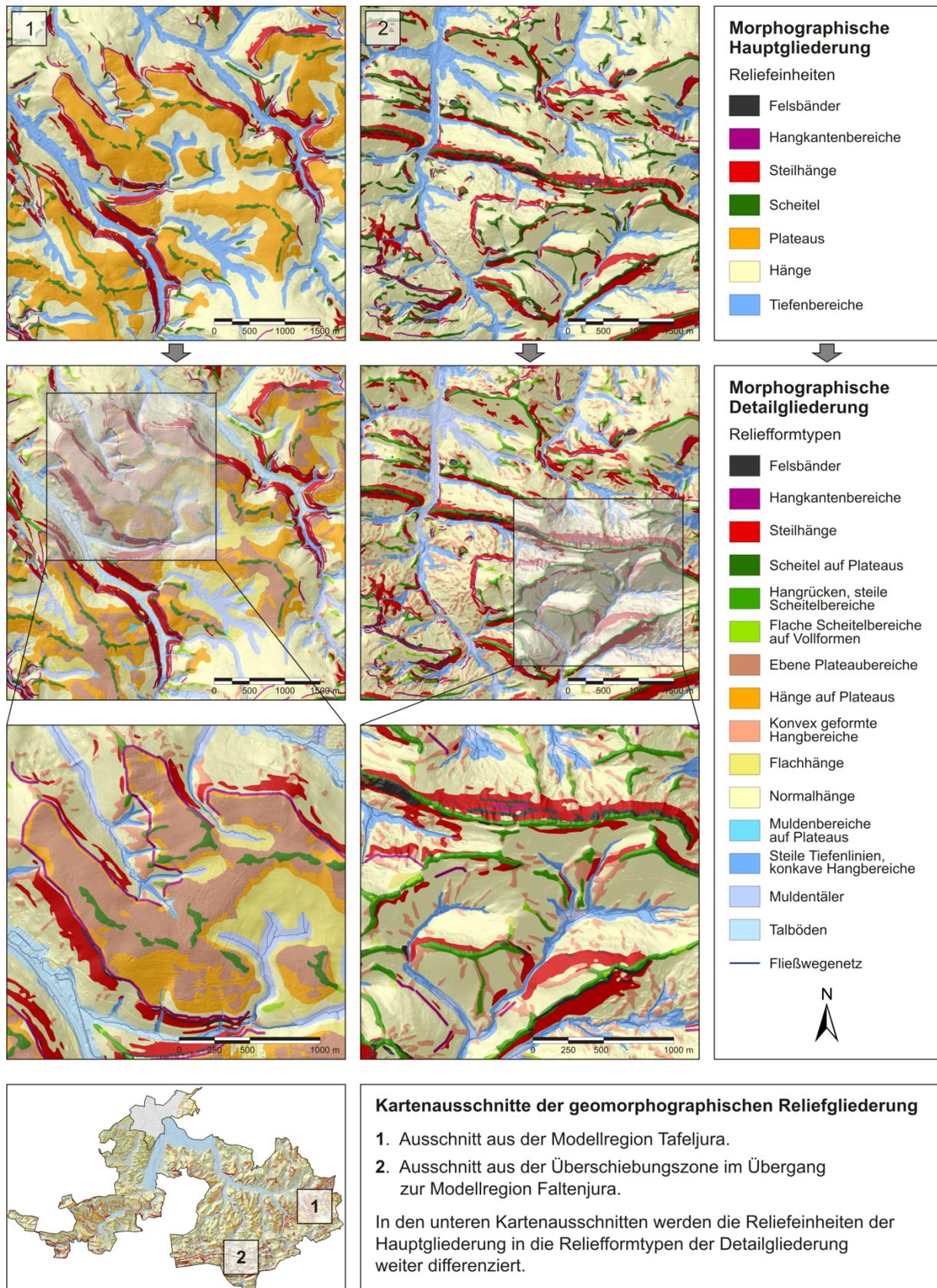


Abb. 10 Ausschnitte der morphographischen Reliefgliederung aus der Modellregion Jura.

Die Hänge auf Plateaus umsäumen in den meisten Fällen die ebenen Plateaubereiche und bilden den Übergang zu den Hangkantenbereichen (violett) und Steilhängen (rot). Dort wo die ebenen Plateaubereiche fast unmittelbar an die Hangkantenbereiche angrenzen, treten häufig markante Geländekanten mit Felsbändern (schwarz) in Erscheinung. Bei der Betrachtung der Hänge, sind konvex geformte Hangbereiche in beiden Ausschnitten festzustellen, Flachhangbereiche v.a. am Rand der südlich abfallenden Juratafeln. In der Schuppenbauzone des Faltenjura gibt es hingegen fast keine Flachhangbereiche mit mittleren Neigungen < 5 Grad. Hier werden häufiger schmale, steile Tiefenlinien und konkave Hangbereiche ausgewiesen. Auch lässt sich hier deutlicher zwischen steilen Scheitelbeichen (dunkelgrün) und flachen Scheiteln auf Vollformen (hellgrün) unterscheiden. Für die Bodenvorhersage ist diese Differenzierung relevant, denn sie erlaubt die wissensbasierte Näherung an den kleinräumigen Wechsel von alten Kalksteinverwitterungsschichten sowie Lössschleiern (flache Scheitel) und anstehendem Gestein (steile Scheitel).

Das hochauflösende DGM ermöglicht grundsätzlich eine detaillierte Reliefgliederung (SCULL ET AL. 2003, BEHRENS ET AL. 2010). Bei der Reliefmodellierung sind aber eine Reihe von Problemen aufgetreten, die die Durchführung manueller Korrekturen z.T. unverzichtbar gemacht haben. Trotz der Abstimmung und Anpassung der zahlreichen Schwellenwerte werden immer auch nicht korrekt abgegrenzte, irrelevante oder falsche Fälle von Reliefformtypen modelliert.

Besonders häufige Abweichungen von der Realität:

- Scheitelbereiche werden tendenziell zu häufig ausgewiesen, v.a. in flacheren Hangbereichen kommt es zu Überlappungen mit konvexen Hangstrukturen.
- Trotz markanter Plateauränder grenzen die Plateauflächen z.T. nicht bündig an die Hangkantenbereiche. Kleine bänderartige Areale werden dadurch fälschlicherweise als zwischenliegende Hangbereiche ausgewiesen.
- Hangkanten, die zergliedert sind, zu weit in die Hänge oder auf die Plateauflächen ragen oder sich mit Scheiteln auf Vollformen (Kämmen) überschneiden.
- Mehrfach verzweigte Gerinnenetze im Bereich breiter Talböden durch Fehler im DGM.
- Tiefenlinien führen in einigen Fällen aus den Muldentälern zu weit die Hänge hinauf oder werden in anderen Fällen zu früh abgebrochen.
- Tiefenbereiche, welche die Hangfüße flächenhaft überlaufen.

Anpassungen der Schwellenwerte bringen hier nur bedingt Verbesserungen. So kann beispielsweise der Ansatz einer Tiefenlinie im Hang nicht in allen Fällen allein über einen konstanten Schwellenwert für die *Flow Accumulation* (hier 40.000 m²) den lokalen Umständen entsprechend abgebildet werden. In den Hangbereichen weisen die Normalhänge trotz der Differenzierung von konvex und konkav geformten Hangbereichen, Hangrücken und Flachhängen, einen hohen Flächenanteil auf. Eine weitere Differenzierung dieser Hangbereiche ist für die Vorhersage von Bodeneigenschaften erstrebenswert. Die Variation von Schwellenwerten für die kleinräumige Differenzierung der Hangbereiche in konvexe und

konkave Einheiten lieferte bisher aber keine befriedigenden Ergebnisse. Die weitere Prüfung einer Segmentierung der Normalhänge durch die Kombination von Neigungs- und Wölbungskriterien bleibt daher als zukünftige Aufgabe bestehen. Vor allem eine Verbesserung der Vertikalgliederung der Hänge anhand von Diskontinuitäten sollte dabei angestrebt werden (KÖTHE & LEHMEIER 1996, MACMILLAN & SHARY 2009).

Insgesamt ermöglichen die Berechnungen etablierter morphometrischer Reliefparameter und ihre individuelle Kombination zu neu abgebildeten Reliefformtypen (z.B. Hangkantenbereiche, steile Tiefenlinien) eine gute und differenzierte Wiedergabe der wichtigsten Reliefstrukturen in den unterschiedlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes. Die Abgrenzung der Reliefformtypen und ihre Hierarchisierung orientieren sich dabei an ihrer Wirkung auf die Bodenentwicklung. Dies ist eine elementare Grundlage für die räumlich differenzierte Vorhersage von Bodeneigenschaften (GEITNER ET AL. 2011). In dieser Vorgehensweise liegt der wesentliche Unterschied zu Reliefgliederungsverfahren mit vorgegebenen Relief-einheiten und Schwellenwerten für morphometrische Reliefattribute (PENNOCK ET AL. 1987, REUTER ET AL. 2006) oder zu automatischen Klassifizierungsansätzen wie *fuzzy sets* (BURROUGH ET AL. 2000, ARRELL ET AL. 2007), *Neuronalen Netzen* (EHSANI & QUIEL 2008) und *image analysis* (DRAGUT & BLASCHKE 2006). Alle diese Ansätze haben keinen primären Bezug zum Zusammenhang zwischen Relief- und Bodeneigenschaften.

3.3.3 Quantitative Zusammenhänge zwischen modellierten Reliefformtypen und Bodeneigenschaften

Abb. 11 zeigt Mediane und Streuungen der Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt und von nFK und FK für die einzelnen Reliefformtypen der Detailgliederung. Tab. 6 stellt die zugehörigen statistischen Kennwerte zusammen. Grundlage der Auswertungen ist eine Stichprobe von rund 300 Waldbodenprofilen, die innerhalb der gegliederten Reliefbereiche in der Modellregion Jura liegen. Für die Wasserspeicherfähigkeitswerte ist der Stichprobendatensatz auf rund 100 belastbare Fälle beschränkt.

3.3.3.1 Gründigkeit

Die Mächtigkeit des durchwurzelbaren Bodens (physiologische Gründigkeit) zeigt im direkten Umfeld der Felsbänder, auf flachen Scheitelbereichen und in konvex geformten Hangbereichen eher niedrige Werte ($\bar{x} < 45$ cm). In den Steilhängen und Muldentälern herrschen tiefgründigere Böden ($\bar{x} > 75$ cm) vor. Die Reliefformtypen erklären also die grundlegende Differenzierung der Gründigkeiten. Im Bereich der Felsbänder und auf flachen Scheiteln ergeben sich geringe, in den Hangkantenbereichen, auf den Plateaubereichen, in den Normalhängen und Muldentälern hingegen starke Streuungen der Stichprobe.

Für die insgesamt relativ hohe Streuung der Werte gibt es mehrere Ursachen. Inselartige Decklehme und risszeitliche Grundmoränenreste haben auf den Plateaus für den Jura z.T. ungewöhnlich tiefgründige Böden entstehen lassen. Deren Verbreitungsgrenzen können allein durch die Plateaudifferenzierung nur unzureichend wiedergeben werden.

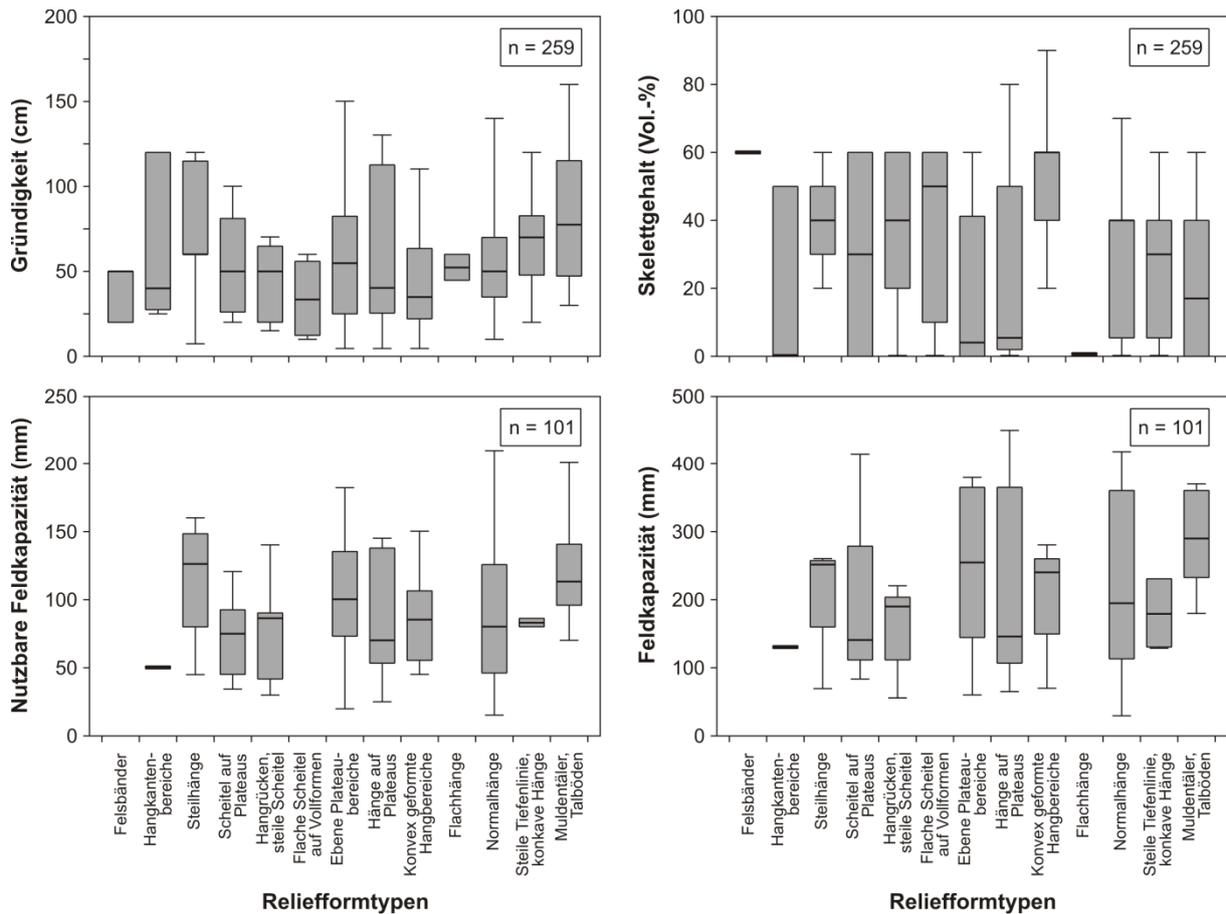


Abb. 11 Boxplots der Bodeneigenschaften für die Reliefformtypen der Detailgliederung in der Modellregion Jura. Lage- und Streuungsparameter s. Tab. 6. Ausreißer- und Extremwerte werden nicht dargestellt.

Im Bereich der Normalhänge führen v.a. ein differenziertes Kleinrelief (z.B. durch Bergsturzmaterial, Hohlformen bei Kalklösung), die Flachgründigkeit kleiner Kuppen und Rücken und ein kleinräumiger Wechsel von Hangschutten und -lehmen zu starken Schwankungen der Gründigkeitswerte.

3.3.3.2 Skelettgehalt

Der mittlere Volumenanteil der Steine im Hauptwurzelraum ist mit rund 20 Vol.-% auf den Plateaus, in den Hangkantenbereichen und den Muldentälern am geringsten. Die Werte der Mediane liegen v.a. auf den Plateaus noch deutlich darunter (< 10 Vol.-%). Sehr skelettreiche Böden mit mittleren Skelettgehalten von $\bar{x} > 40$ % finden sich v.a. in den konvex geformten Hangbereichen und im direkten Umfeld der Feldbänder. Insgesamt ist die Ausprägung der Skelettgehalte innerhalb der einzelnen Reliefformtypen aber sehr heterogen. Mit Ausnahme der Felsbänder, Steilhänge und den konvex geformten Hangbereichen erstreckt sich der Bereich des Skelettgehaltes, in dem sich 50 % der jeweiligen Teilstichproben befinden, meistens über rund 40 Vol.-%.

Während die geringen mittleren Skelettgehalte auf den Plateaus durch die dort vorkommenden z.T. skelettfreien Decklehme und Lössschleier und die hohen Skelettgehalte in konvexen Hangbereichen nachvollziehbar sind, weist die Stichprobe im Bereich der Hangkanten einen auffallend geringen mittleren Steinanteil auf.

Reliefformtypen der Detailgliederung	Gründigkeit (cm)			Skelettgehalt (Vol.-%)			Nutzbare Feldkapazität (mm)			Feldkapazität (mm)		
	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
Felsbänder	3	40,0	17,3	3	60,0	0	0	-	-	0	-	-
Hangkantenbereiche	5	67,0	48,7	5	20,0	28,3	1	50,0	-	1	130,0	-
Steilhänge	9	76,4	36,9	9	40,0	14,1	4	114,0	49,5	4	208,8	92,6
Scheitel auf Plateaus	6	53,8	29,9	6	30,0	32,9	4	68,3	36,7	4	195,3	148,9
Hangrücken, steile Scheitelbereiche	11	50,9	34,7	11	40,5	22,8	6	79,0	39,6	6	161,7	64,7
Flache Scheitelbe- reiche auf Vollformen	4	34,3	22,5	4	40,0	28,3	0	-	-	0	-	-
Ebene Plateau- bereiche	17	58,8	40,2	17	21,4	24,6	8	102,1	50,1	8	246,3	122,6
Hänge auf Plateaus	13	62,0	44,8	13	23,1	27,7	11	86,3	45,3	11	219,8	144,2
Konvex geformte Hangbereiche	14	44,6	29,7	14	52,0	17,0	5	88,2	42,2	5	200,0	88,0
Flachhänge	2	52,5	-	2	0	-	0	-	-	0	-	-
Normalhänge	145	55,5	29,3	145	29,0	22,7	54	91,1	51,8	54	221,3	125,7
Steile Tiefenlinien, konkave Hangbereiche	18	66,4	26,9	18	27,5	19,5	2	82,5	-	2	180	-
Muldentäler und Talböden	12	81,7	39,6	12	21,3	21,7	6	122,2	45,4	6	287,2	80,8

Tab. 6 Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) der Bodeneigenschaften Gründigkeit, Skelettgehalt und Wasserspeichervermögen für die Reliefformtypen der Detailgliederung in der Modellregion Jura.

Ein Grund hierfür ist die lokale Akkumulation von Lehm an den Plateaurändern. Die starke Streuung der Werte, v.a. bei den Scheiteln, lässt sich wie bei der Gründigkeit auf den kleinräumigen Wechsel von unterschiedlich skelettreichen Substraten wie Hangschutte und -lehme zurückführen. Auf den Scheiteln befinden sich zudem unterschiedlich mächtige Residuen der Kalkverwitterung, Lössschleier und ein kleinräumiger Wechsel von Gestein und Verwitterungsschichten. In den unteren Hangbereichen und Tiefenlinien sind kleinräumig wechselnde Schuttlieferungen von den Seitenhängen sowie die Verfüllung mit unterschiedlich skeletthaltigen Gehängelehmen als Ursache zu nennen.

3.3.3.3 Wasserspeichervermögen

Das Wasserspeichervermögen der Waldböden bis 1 m Tiefe weist im Bereich der Hangkanten, Hangrücken und steilen Scheitelbereiche eher geringere Werte ($\bar{x} < 80$ mm nFK; $\bar{x} < 160$ mm FK) auf. Höhere Werte herrschen auf den ebenen Plateaubereichen, in Steilhängen sowie in den Muldentälern und Talböden vor ($\bar{x} > 100$ mm nFK; $\bar{x} > 240$ mm FK). Die Reliefformtypen lassen damit eine grundlegende und, abgesehen von den Steilhängen, auch nachvollziehbare Differenzierung der Wasserspeicherfähigkeit erkennen. Die Standardabweichung der nFK-Werte liegt im Bereich von etwa 45 mm. Mit rund 50 mm ist sie hier auf

ebenen Plateaubereichen und in den Normalhängen am höchsten, wohingegen bei der FK die größte Streuung bei den Scheiteln und Hängen auf Plateaus vorliegt. Auch ist für die FK insgesamt eine höhere Streuung der Stichprobenwerte v.a. bei den Plateaubereichen und den Normalhängen festzustellen. Die größere Streuung der nFK-Werte auf den Plateaus und in den Normalhängen ist ein Resultat des sehr breiten Spektrums der Wasserspeicherkapazität der Waldböden im Untersuchungsgebiet. Die Speicherkapazität der Waldböden hängt primär von der Gründigkeit und dem Skelettgehalt ab (MOSIMANN 2011). Deren Ausprägungen variieren im Bereich von Scheiteln, Plateaus und Normalhängen stark. Dies gilt besonders für den Skelettgehalt. Ein wichtiger Grund hierfür sind z.B. die auf den Plateaus inselartig verbreiteten Decklehme, die zu einem kleinräumigen Wechsel von tiefgründigen Böden und flachgründigen Böden auf Kalk führen können. Folglich muss auch das hiervon abhängige standörtliche Wasserspeichervermögen in denselben Reliefbereichen stark variieren.

Die morphographischen Formtypen Steilhänge, konvex geformte Hangbereiche, steile Tiefenlinien, konkave Hangbereiche und der Einflussbereich von Felsbändern zeigen deutliche Zusammenhänge zur Ausprägung mehrerer Bodeneigenschaften. Bei Plateau-, Scheitelbereichen und Muldentälern sind Zusammenhänge mit einzelnen Bodeneigenschaften festzustellen. Die Formtypen Hangkantenbereiche und Normalhänge reichen alleine für die Erklärung von Bodeneigenschaften nicht aus. Hier ergeben sich aus nachvollziehbaren Gründen große Streuungen. Dennoch ist der Stellenwert der Reliefformtypen für die Prognose der Bodeneigenschaften in den Vorhersagemodellen hoch.

3.3.4 Gegenüberstellung von morphographischer Detailgliederung und modellgestützten Prognosen von Bodeneigenschaften

Die Bedeutung der Reliefformtypen für die Prognose der Bodeneigenschaften belegen vier Kartenausschnitte aus dem östlichen Tafeljura in den Abb. 12 und 13. Die Reliefformtypen zeichnen sich in der Prognose der Bodeneigenschaften der Waldböden in unterschiedlichem Maße ab. Auf den großflächigen Plateaubereichen werden Gründigkeiten von 20 - 60 cm als primäre Ausprägung und < 20 cm als sekundäre Ausprägung prognostiziert (gelbgrün) (Abb. 12). Die angrenzenden Steilhänge sind deutlich erkennbar (bräunlich). Hier steht der primären Ausprägung von 20 - 60 cm als sekundäre Ausprägung 60 - 100 cm gegenüber. Für die konvex geformten Hangbereiche weist das wissenschaftliche Modell hingegen eine Gründigkeit von < 20 cm als primäre Ausprägung aus (gelblich). Auch die steilen Tiefenlinien, konkaven Hangbereiche und die Muldentäler zeichnen sich durch Prognosen von 20 - 60 cm (braun) und z.T. von 60 - 100 cm (orange) in den Hangbereichen der Gründigkeitskarte deutlich ab.

Die Skelettgehalte weisen auf den ebenen Plateaubereichen Werte von überwiegend 30 - 50 Vol.-% als primäre Ausprägung auf (bräunlich) (Abb. 13). In Richtung des vorderen Plateaurandes kommt mit > 50 Vol.-% eine sekundäre Ausprägung (hellbraun) hinzu. Die Scheitel auf Plateaus zeichnen sich durch höhere Skelettgehalte (> 50 Vol.-%) deutlich hiervon ab (gelblich). Die geneigten Plateaubereiche sind aufgrund der großen Heterogenität nicht mit einer Aussage belegbar (hellgrau).

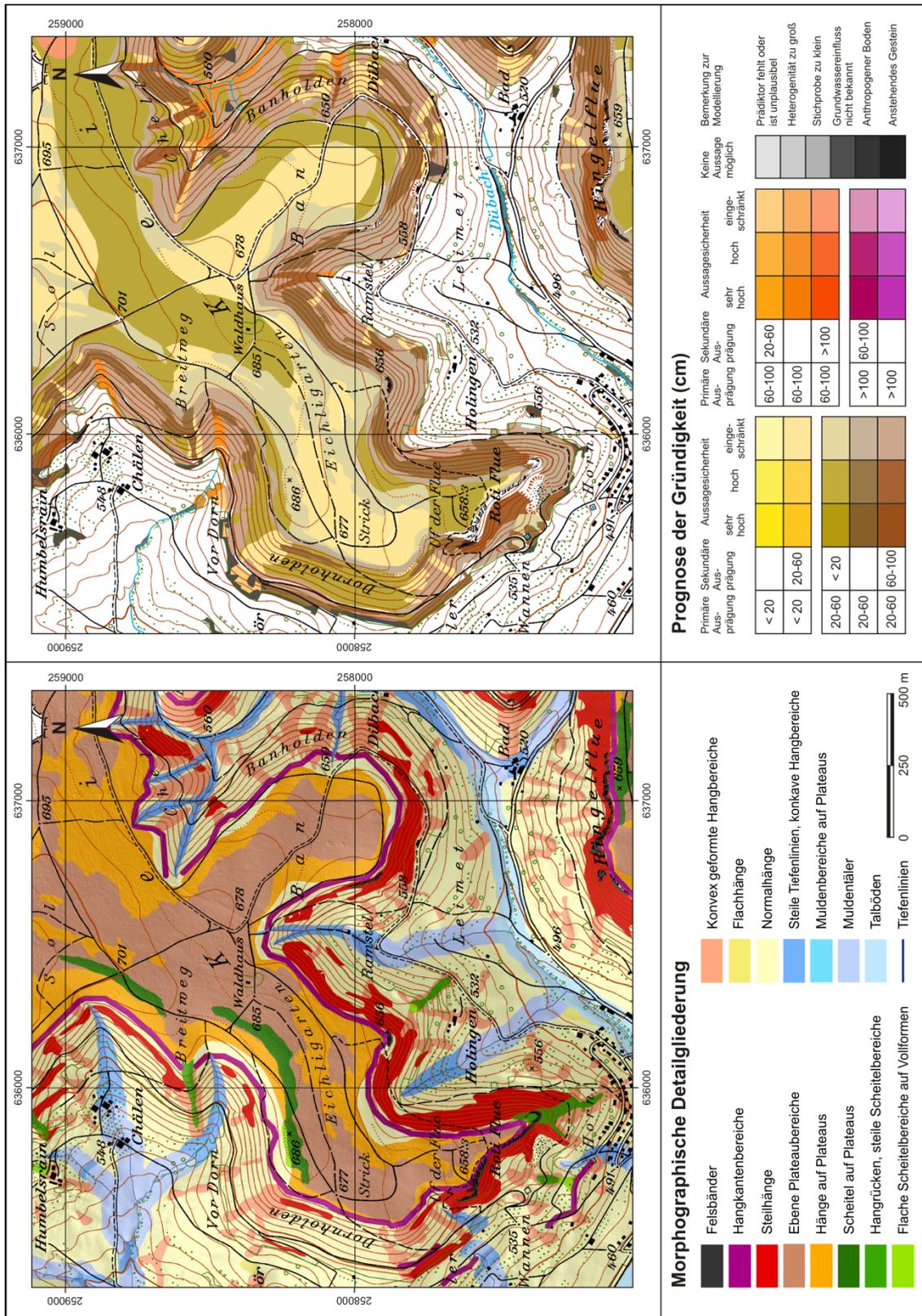


Abb. 12 Gegenüberstellung von morphographischer Detailgliederung und wissenschaftlicher Modellprognose der Gründigkeit für einen Kartenausschnitt im östlichen Tafeljura. Topographische Grundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1068 (Sissach) (SWISSTOPO).

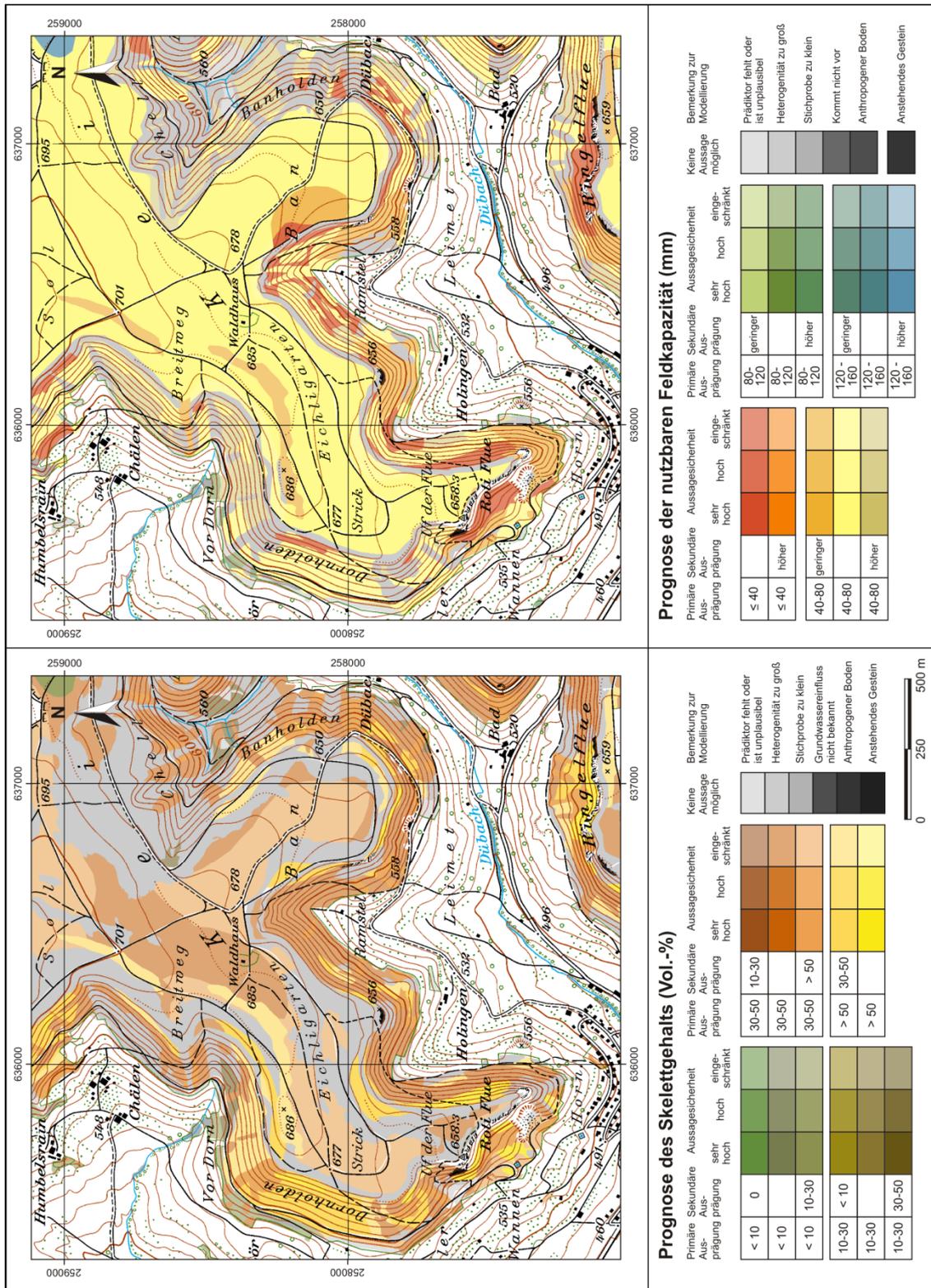


Abb. 13 Gegenüberstellung der wissenschaftlichen Modellprognosen von Skeletthalt und nutzbarer Feldkapazität für einen Kartenausschnitt im östlichen Tafeljura. Topographische Grundlage: Landkarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1068 (Sissach) (SWISSTOPO).

In den Hangbereichen sind die konvex geformten Hänge und die Steilhänge mit der primären Ausprägung von 30 - 50 Vol.-% (bräunlich), deutlich von den Normalhangbereichen mit variierenden Skelettgehaltsprognosen (gering bis hoch) abgrenzbar.

Die Prognose der nFK beträgt auf den Plateaus großflächig 40 - 80 mm als primäre Ausprägung (hellgelb). In Übereinstimmung zu den Skelettgehaltsprognosen wird auf den Plateauscheiteln eine geringere nFK als sekundäre Ausprägung prognostiziert (beige). Der Übergang zu den Hängen wird deutlich durch die nicht prognostizierbaren Hangkantenbereiche markiert (hellgrau). Hier ist die Heterogenität der Stichprobe für eine Aussage zu groß. Die oberen Steilhangbereiche und die steileren Normalhänge bilden mit der Prognose < 40 mm nFK (hellrot) einen deutlichen Kontrast zu den übrigen Normalhängen. Diese weisen eine primäre Ausprägung der nFK von 40 - 80 mm (hellgelb) auf. Die sekundäre Ausprägung variiert hier zwischen höheren (gelbgrün) oder geringeren (beige) Speichereigenschaften. Aufgrund ihrer Heterogenität ist für die konvex geformten Hangbereiche und die steilen Tiefenlinien keine belastbare Aussage zur Wasserspeichereigenschaft möglich. Diese beiden Reliefformtypen zeichnen sich deshalb vor allem im östlichen Teil des Kartenausschnitts als gräuliche Bereiche in den Hängen ab.

Entgegen den Erfahrungen von DEUMLICH ET AL. (2010) zeigen die Ergebnisse im vorliegenden Fall aber auch, dass nur auf Grundlage der modellierten Reliefeinheiten und -formtypen im Jura keine belastbare modellgestützte Prognose der Bodeneigenschaften oder -typen erfolgen kann. Neben den vielfältigen Wechselbeziehungen und Einflüssen der bodenbildenden Faktoren und deren räumlicher Variabilität (MCBRATNEY ET AL. 2003), liegt die Ursache v.a. in den vielfältigen und häufig kleinräumig wechselnden anstehenden Gesteinen und Deckschichten. Sie prägen die Ausbildung der Bodeneigenschaften im Untersuchungsgebiet stark. Dabei kann die Substratverbreitung besonders innerhalb der großflächigen Reliefformtypen stark variieren und bedingt somit deutliche Unterschiede der bodenphysikalischen und -chemischen Merkmalsausprägungen. Dies deckt sich u.a. mit den Ausführungen von WALTHER ET AL. (2004), die auf die große Vielfalt des Bodenbildungsfaktors Ausgangsgestein bzw. der Ausgangssubstrate in der Region hinweisen.

3.4 Fazit und Schlussfolgerungen

Die entwickelte morphographische Reliefgliederung ist auf die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften abgestimmt und kann die notwendigen räumlichen und hierarchischen Grundstrukturen für die Entwicklung der detaillierten Prognosemodelle liefern. Die hierarchische Gliederung des Reliefs basiert auf etablierten Algorithmen zur Ableitung morphometrischer Reliefattribute (ZEVENBERGEN & THORNE 1987, JENSON & DOMINGUE 1988), die schließlich mit einfachen Verfahren zu komplexen geomorphographischen Reliefformen kombiniert werden.

Deren Parametrisierung ermöglicht die flexible Integration von Schwellenwerten und damit auch die Anpassung an das landschaftstypische Formeninventar (BOCK ET AL. 2007). Damit sind die Nachvollziehbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Modellierung sowie die Übertragung auf andere Untersuchungsgebiete grundsätzlich möglich. Dies gilt insbesondere

für die Reliefformtypen der Plateaus, Steilhänge, konvex geformte Hangbereiche und Flachhänge. Hier ist eine teilautomatisierte und dennoch transparente Modellumsetzung möglich. Hingegen sind bei den Scheitelbereichen, Hangkantenbereichen und Tiefenlinien nicht automatisierbare Korrekturen notwendig. Trotz der Abstimmung von Schwellenwerten für die einzelnen Reliefparameter, werden nicht relevante oder falsche Fälle dieser Reliefformtypen modelliert. Damit hat sich gezeigt, dass eine valide Reliefmodellierung detaillierte Geländekenntnisse des modellierten Raumes verlangt. Geländebegehungen zur Überprüfung von Modellierungsergebnissen und die teilweise Durchführung manueller Korrekturen sind unerlässlich. Der Zeitaufwand für manuelle Anpassungen betrug mindestens ein Viertel des Zeitaufwandes für die GIS-gestützte Reliefgliederung.

Mit der zweistufigen hierarchischen Reliefgliederung erfolgt zunächst die Ausweisung geomorphographischer Reliefeinheiten. Diese bilden die landschaftstypischen Formen des Mesoreliefs ab. In einer höher aufgelösten Detailgliederung werden die Reliefeinheiten in Reliefformtypen weiter differenziert. Damit kann sowohl die räumliche Strukturierung des Meso- und Mikroreliefs, als auch die skalenabhängige Variation des Zusammenhanges zwischen den Reliefstrukturen und den Bodeneigenschaften beachtet werden (DENG 2007, BEHRENS ET AL. 2010).

Die Kombination der empirisch-statistischen Ermittlung von Schwellenwerten für die Abgrenzung der Reliefeinheiten mit lokalem Expertenwissen, ermöglicht die Abbildung von Reliefformen, welche einen Zusammenhang mit der Verbreitungssystematik der Waldböden im Untersuchungsgebiet aufweisen (v.a. Steilhänge, Plateaubereiche, konvexe Hangbereiche, Muldentäler). Mit dieser Vorgehensweise erfolgt eine Reliefgliederung, die im Vergleich zu automatischen Klassifizierungsverfahren (DRAGUT & BLASCHKE 2006, ARRELL ET AL. 2007, EHSANI & QUIEL 2008) einen stärkeren Bezug zu den Bodeneigenschaften aufweist. Die modellierten Normalhänge weisen dagegen als Relieftyp nahezu keine charakteristischen Bodeneigenschaften auf. Hier besteht noch die Herausforderung, eine differenzierter auflösende Segmentierung der Hänge anhand von Neigungs- oder Wölbungskriterien (KÖTHE & LEHMEIER 1996, MACMILLAN & SHARY 2009) zu finden.

Die komplexe Reliefgliederung ermöglicht die modellgestützte Generierung digitaler Bodenkarten, mit denen für die gesamte Waldfläche des Kantons Basel-Landschaft (rund 204 km²) wichtige Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit der Waldböden und der sie bestimmenden Bodeneigenschaften bereitgestellt werden können.

4 Stichprobendaten und Prädiktoren für die Prognose der Wasserspeicherfähigkeit

Die Regionalisierung der standörtlichen Informationen zum Wasserspeichervermögen erfolgt mit einem faktorenbasierten Ansatz. Die hierfür angewandten entscheidungsbasierten Modelle benötigen Punktinformationen zur nFK und FK und flächendeckende Informationen zu den Faktoren der Bodenentwicklung, die als mögliche Prädiktoren dienen. Die Zusammensetzung und Belastbarkeit der Basisdaten sowie die räumliche Auflösung und Qualität der Prädiktoren beeinflussen die Genauigkeit der Prognosen unabhängig vom Modellansatz stark. Deshalb erfolgen in diesem Kapitel grundlegende Erläuterungen zum Stichprobendatensatz und zu den bedeutendsten Prädiktoren in der Modellentwicklung.

4.1 Speicherfähigkeitswerte der Waldbodenprofile

Die standörtlichen Informationen der Waldbodenprofile sind der Ausgangspunkt der Modellentwicklung. Sie beinhalten Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit und zu den Standortbedingungen an einzelnen über die Region verteilten Positionen. Um die erwarteten Zusammenhänge zwischen der Speicherfähigkeit und den Faktoren der Bodenbildung (Relief, Gestein, Vegetation, usw.) ermitteln zu können, wird der Basisdatensatz vorab grundlegend ausgewertet und beurteilt. Abb. 14 und 15 zeigen Häufigkeitsverteilungen der insgesamt 129 Stichproben aus dem Untersuchungsgebiet. Die Daten sind nach den Werten der nFK und FK in 20 mm- bzw. 40 mm-Klassen eingestuft. Der untere Abschnitt zeigt die Klassifizierung der Werte für die Modellierung.

Die Verteilung der Stichprobenwerte ist in beiden Fällen bimodal und heterogen. Die Klassen mit den relativen Maxima (60 - 80 mm u. 120 - 140 mm) liegen bei der nFK im mittleren Spektrum relativ nah beieinander. Bei der FK liegt hingegen ein Maximum der Verteilung bei 80 - 120 mm. Das andere Häufigkeitsmaximum weist die Klasse 360 - 400 mm auf. Damit ist die Spannweite der Wasserspeicherfähigkeit mit > 250 mm bei der nFK und sogar > 400 mm bei der FK sehr hoch. Es gibt Standorte, bei denen das Wasserspeichervermögen bis 15-mal höher ist als bei den flachgründigsten Böden mit sehr geringer nFK. Bei den tiefgründigen Böden handelt es sich vor allem um Waldstandorte auf Lössen und Decklehmen, in selteneren Fällen auch auf Tonmergeln und feinmaterialreichen Hanglehmen. Das Spektrum der Wasserspeicherfähigkeit ist im Untersuchungsgebiet also sehr groß.

Die Stichprobe wird mit dem *Kolmogoroff-Smirnoff-Test* (K-S-Test) in der Gesamtheit und getrennt nach Bodenregionen hinsichtlich der Normalverteilung der metrisch skalierten nFK- und FK-Werte geprüft. Die Normalverteilung einer Stichprobe ist Voraussetzung für viele Verfahren der Teststatistik. Bei den nFK-Werten bestätigt der K-S-Test eine Normalverteilung für die gesamte Stichprobe ($n = 129$). Für die FK fällt der K-S-Test hingegen negativ aus. Gründe hierfür sind neben der ungleich verteilten Lage der Profile in den drei unterschiedlichen Bodenregionen, die selektive Auswahl von Waldstandorten für die Bodenaufnahme zur gezielten Stichprobenergänzung sowie eine heterogene Häufigkeitsverteilung der Gesteinstypen und Reliefeinheiten im Stichprobendatensatz.

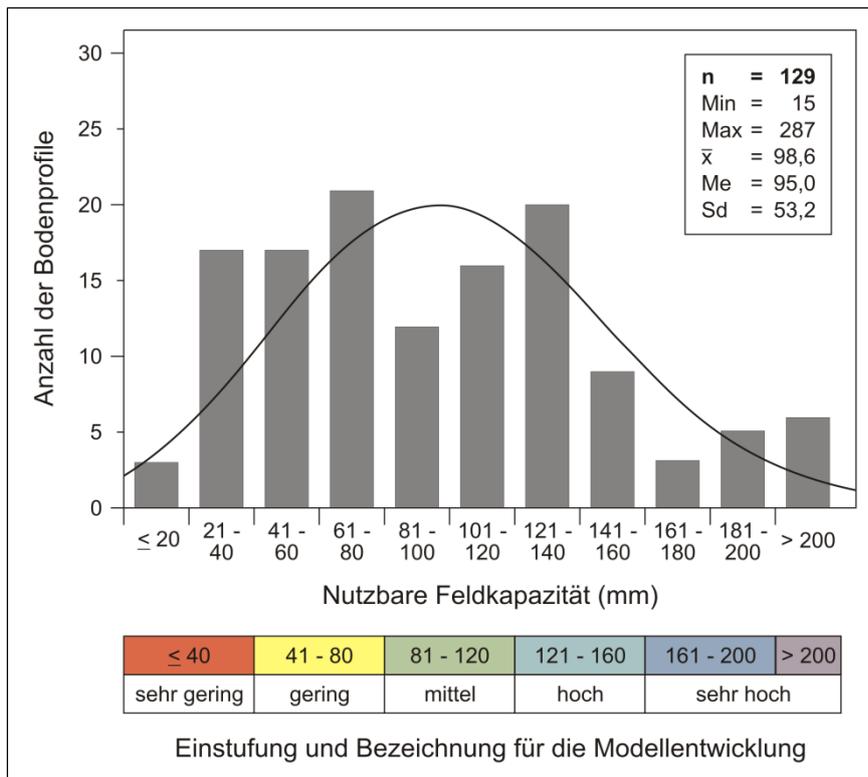


Abb. 14
Häufigkeitsverteilung der Stichprobe der nutzbaren Feldkapazität mit Normalverteilungskurve und Klassifikation für die Modellentwicklung.

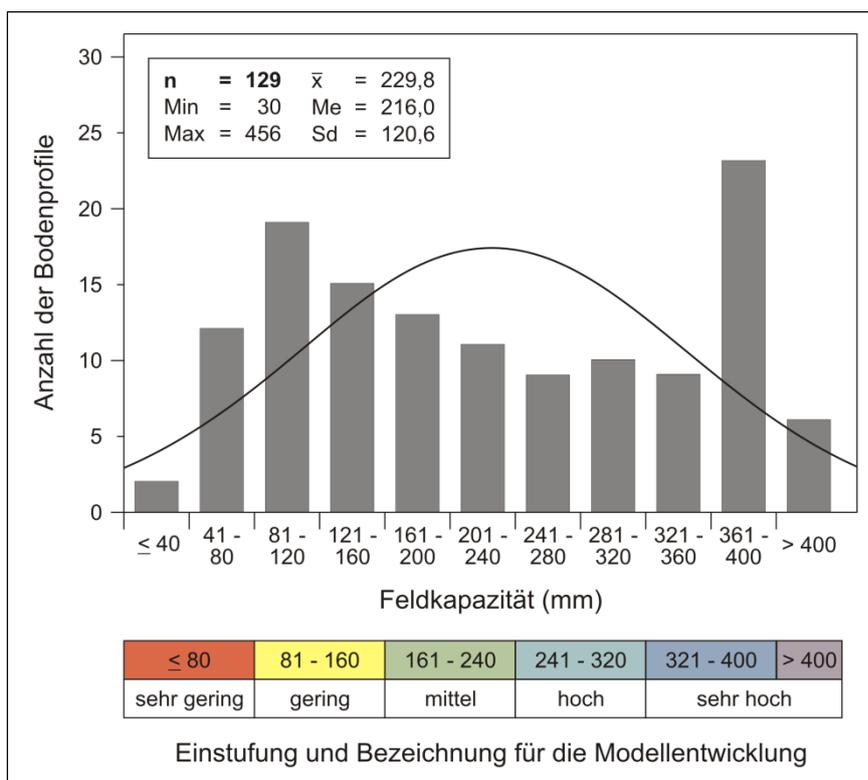


Abb. 15
Häufigkeitsverteilung der Stichprobe der Feldkapazität mit Normalverteilungskurve und Klassifikation für die Modellentwicklung.

Auch wegen der Stichprobenverteilung (andere Gründe siehe Kap. 1.3) werden die Modelle für jede Bodenregion einzeln entwickelt und kalibriert. In den einzelnen Bodenregionen ergibt der K-S-Test Normalverteilung der nFK- und FK-Werte. Abgesehen vom geringen Stichprobenumfang im Lösshügelland und bei den Talböden (Abb. 16, 17) ergeben sich damit keine Restriktionen für weiterführende statistische Auswertungen.

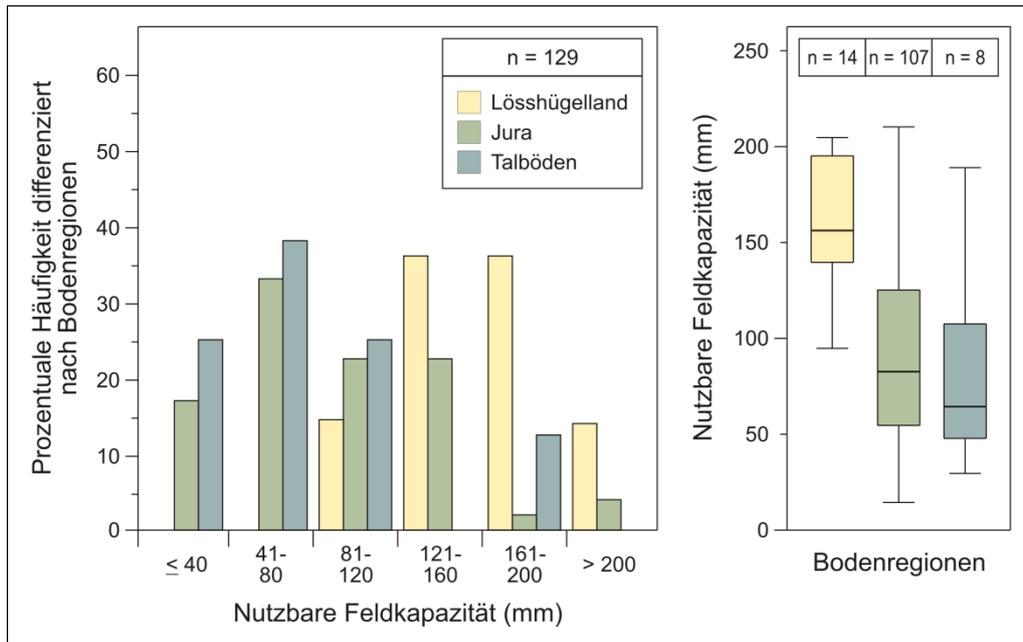


Abb. 16
Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Klassen der nutzbaren Feldkapazität in den drei Bodenregionen.

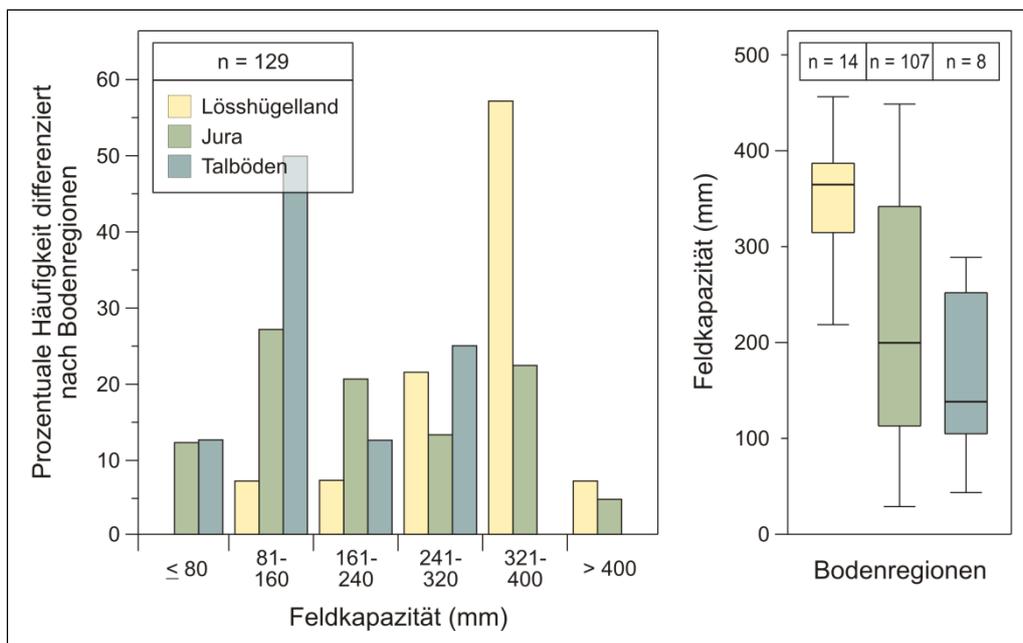


Abb. 17
Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Klassen der Feldkapazität in den drei Bodenregionen.

Abb. 16 und 17 zeigen deutliche und plausible Unterschiede der klassifizierten Häufigkeitsverteilungen und der Wertespektren des Wasserspeichervermögens in den drei Bodenregionen. Vor allem zwischen Lösshügelland und Jura sind die Unterschiede der Verteilungen von nFK und FK erwartungsgemäß prägnant. Rund 75 % der Stichprobe im tiefgründigen und skelettfreien Löss haben eine hohe nFK > 150 mm. Im Jura weisen über 50 % der Fälle eine nFK < 80 mm auf. Damit ist das Wasserspeichervermögen bei vielen Profilen eingeschränkt. Aufgrund der vielfältigen Substrattypen ist hier die Spannweite der Werte am höchsten (über 200 mm Unterschied der nFK).

Der vorliegende Stichprobensatz gibt die naturräumlich begründbaren Unterschiede (Kap. 1.3) in den Wertespektren des Wasserspeichervermögens für die drei Bodenregionen gut wieder. Dem ungeachtet ist die Stichprobe von 129 Profilinformatoren verteilt auf eine Waldfläche von rund 204 km² eine eingeschränkte Datenbasis für die modellgestützte Prognose von Bodeneigenschaften. Die geringe Datendichte und die ungleich verteilte Lage der Profile im Untersuchungsgebiet haben zur Folge, dass der Stichprobenumfang im Lösshügelland und den Talböden grundsätzlich zu gering ist, um ein Vorhersagemodell zu entwickeln, das ausschließlich auf häufigkeitsstatistischen Analysen gründet. Im Jura können die Profilstandorte aufgrund der naturräumlichen Vielfalt nicht alle Merkmalskombinationen der Standortfaktoren abdecken. Deshalb liegen nur für die weiter verbreiteten Standortbedingungen v.a. auf den Tafeljurahochflächen und in den Hangbereichen zwischen 5 - 32 Grad Neigung genügend große Stichproben als Grundlagen häufigkeitsstatistischer Analysen vor. Im Gegensatz dazu enthält der Stichprobensatz nur einige wenige Profilstandorte im Bereich der Scheitel, Hangkantenbereiche, Steilhänge und auf Flachhängen. Hinsichtlich der petrographischen Gesteinstypen und -gruppen (s. Kap. 4.2) sind es hauptsächlich die weit verbreiteten Kalk- und Kalkmergel (rund 50 % der Stichprobe) sowie die Tonmergel und Decklehme die in der Stichprobe häufig vertreten sind. Für Profilstandorte auf Schottern, tertiären Mergeln und Gehängeschutten gemäß geologischer Karte, liegen hingegen nur sehr kleine Stichproben vor. Diese heterogene Verteilung der Stichprobe in Bezug auf die Merkmalsausprägungen der Standortfaktoren hat zur Folge, dass für Prädiktorenkombinationen zum Teil nur kleine Teilstichproben oder nur einzelne Bodenprofile vorliegen.

Für die Entwicklung von Vorhersagemodellen der Wasserspeicherfähigkeit muss dieser Mangel an punktuellen Bodeninformationen für das Lösshügelland und die Talböden sowie für die Prädiktorenkombinationen mit kleinen oder fehlenden Teilstichproben im Jura kompensiert werden. Aus diesem Grund werden die häufigkeitsstatistischen Auswertungen der Bodeninformationen in dieser Arbeit um das Erfahrungswissen aus regionalen Feldaufnahmen, um bodenkundlich ableitbare Zusammenhänge und um aus anderen Untersuchungen oder Räumen fallweise übertragbare Erkenntnisse ergänzt (Kap. 5.2). Erst diese Kombination aus empirischer Daten- und Wissensbasis ermöglicht die empirisch-statistische Entwicklung entscheidungsbasierter Vorhersagemodelle für die Wasserspeicherfähigkeit.

Für die Modellierung werden die metrisch skalierten Werte des Wasserspeichervermögens gemäß Abb. 14 und 15 klassifiziert. Die Einstufung der nFK-Werte in 40 mm- und der FK-Werte in 80 mm-Klassen orientiert sich am Gesamtspektrum der Stichprobe, an der Klassifikation für Waldböden nach WALTHERT ET AL. (2004) und an der Einstufung nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Mit der Einstufung in fünf Klassen wird eine Auflösung gewählt, mit der die Aussagekraft für ökologische Fragestellungen gewährleistet ist. So können z.B. die sehr trockenen Standorte von den weniger trockengefährdeten Waldböden unter den gegebenen regionalen Klimabedingungen hinreichend genau differenziert werden (PAUL 2010, WESSELS 2012).

4.2 Gesteinstypen und -gruppen

Für die Bodenentwicklung ist neben dem Relief das Ausgangsgestein einer der wichtigsten standörtlichen Faktoren. Im Untersuchungsgebiet und den angrenzenden Gebieten weisen die geologischen Karten einschließlich des Quartärs über 70 stratigraphische Einheiten auf. Die Ausgangsgesteine für die Bodenbildung sind damit im Untersuchungsgebiet sehr vielfältig. Für die Bodenentwicklung ist aber nicht die Vielzahl der stratigraphischen Gesteinstypen entscheidend, sondern vielmehr die petrographische Zusammensetzung der Gesteine. In der Jura-Stratigraphie kommen die gleichen petrographischen Gesteinstypen in mehreren erdgeschichtlichen Abschnitten vor. Für die Prognose der Bodeneigenschaften wurden deshalb die stratigraphischen Einheiten von MOSIMANN ET AL. (2011) zu 16 für die Bodenbildung und die ökologischen Verhältnisse relevanten petrographischen Gesteinstypen und -gruppen zusammengefasst. Abb. 18 zeigt einen beispielhaften Kartenausschnitt der typisierten Gesteinstypen als Prädiktoren für die Modellprognosen aus dem Tafeljura.

Wie in Kap. 1.3 bereits erläutert, dominieren im Untersuchungsgebiet flächenmäßig Böden, die sich in Deckschichten quartären und besonders periglazialen Ursprungs entwickelt haben (Grundmoränenreste, Löss, Decklehme, Hangschutte und Hanglehme). Die Verbreitung der auf- und umgelagerten Deckschichten wird von den geologischen Karten aber nur unzureichend wiedergegeben. Zudem gilt es zu beachten, dass die geologischen Karten im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes im Maßstab 1 : 25.000 vorliegen, wohingegen die Informationen zur Geologie im östlichen Teil des Kanton BL (östlich Rechtswert 620000) derzeit nur im Maßstab 1 : 100.000 existieren. In Abhängigkeit von Maßstab und Kartierer weisen die geologischen Karten die Deckschichten nur bei größerer Mächtigkeit und/oder Flächenausdehnung, gar nicht oder nur in ihren allgemeinen Verbreitungstendenzen aus (v.a. im östl. Teil von Tafel- und Faltenjura). Während die Löss- und Grundmoränenreste in den geologischen Karten in der Tendenz gut abgebildet werden, wird die Verbreitung der Decklehme nur unzureichend wiedergegeben. Seit 2008 wurden deshalb die Grenzen der inselartig verbreiteten Decklehme für die Waldflächen im Tafeljura kartiert. In diesem Fall weicht das Substrat der Bodenbildung völlig von der Information in der geologischen Karte ab. Die auskartierten Decklehmareale werden in die digitale geologische Karte übertragen. Ein bedeutsamer Modellierungsfehler für die Bodeneigenschaften kann somit in diesem Bereich minimiert werden.

Eine weitere Unsicherheit für die Modellierung besteht in der unvollständigen und unsystematischen Abbildung der auf den Jurahängen verbreiteten Hangschutte und Hanglehme. Zum einen werden nur die mächtigeren Varianten dieser Deckschichten in ihren ungefähren Verbreitungsgrenzen dargestellt (z.B. im Übergangsbereich zwischen Tafel- und Faltenjura). Geringmächtigere Varianten fehlen hingegen häufig ganz. Zum anderen ist ihre petrographische Zusammensetzung im Spektrum von skelettreichen Hangschutten bis hin zu feinmaterialreichen Hanglehmen sehr heterogen (ein Beispiel hierfür ist die Substratsituation am *Schällenberg* bei Waldenburg, s. Kap. 5.3.2). Wegen des vielfach geschichteten Aufbaus und der unterschiedlichen Beimengungen von Steinen variieren die Lehm- und Steinanteile kleinräumig und häufig ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit (MOSIMANN ET AL. 2011).

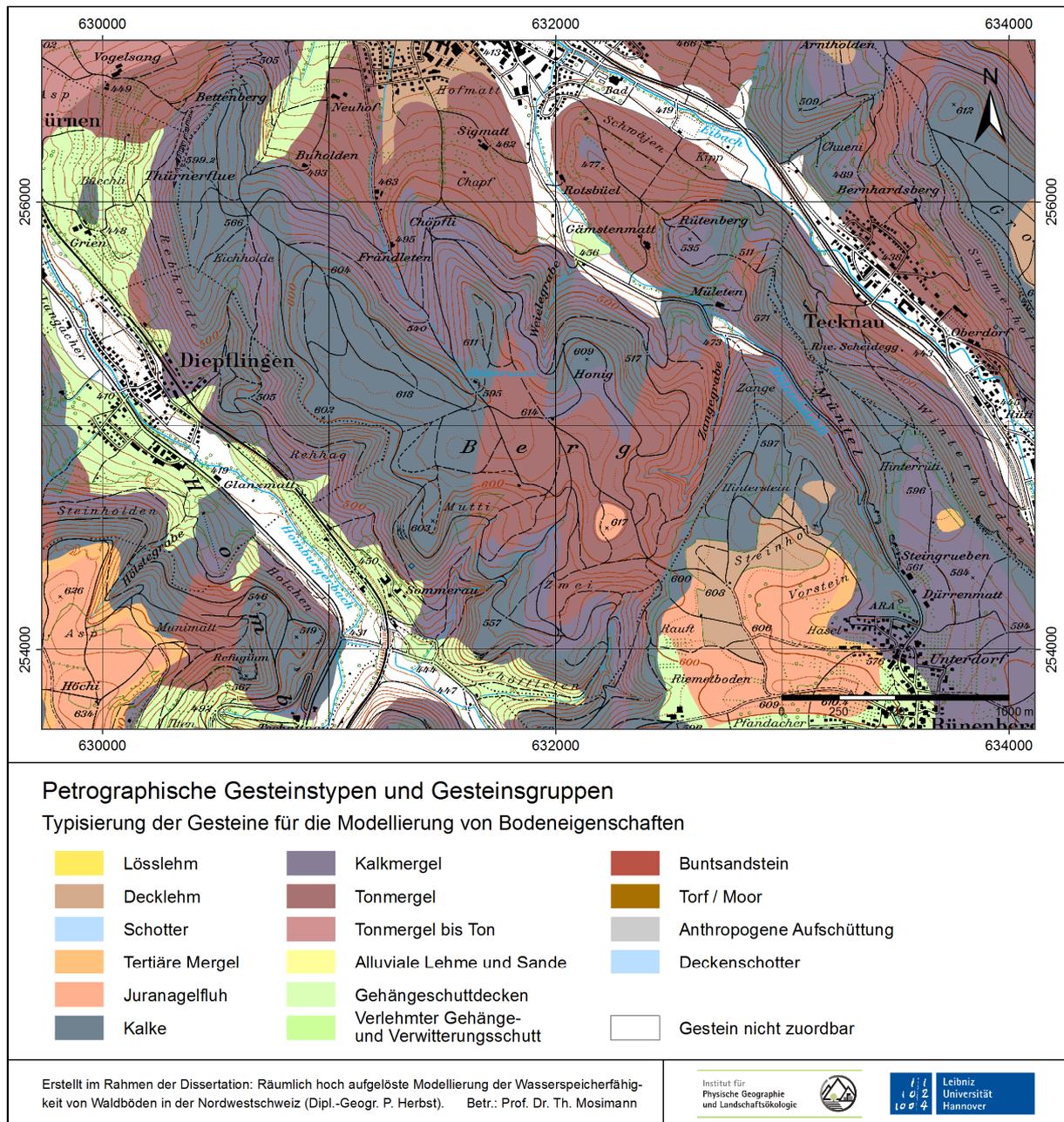


Abb. 18 Petrographische Gesteinstypen und -gruppen im Tafeljura zwischen Diepflingen und Tecknau. Topographische Kartengrundlage: LK 1:25.000 (Blätter 1068, 1088) (SWISSTOPO).

Damit lassen sich präzise Aussagen zu Mächtigkeit, Zusammensetzung und Verbreitungsgrenzen der Hangschutte und -lehme nur durch punkthafte Verifizierung erzielen. Aufgrund der unscharfen und unvollständigen Informationen in den geologischen Karten können die Verbreitung und Ausprägungen der Deckschichten bei der Modellierung nur begrenzt berücksichtigt werden. Restriktionen, die sich hierdurch insbesondere in den Jurahängen für die Prognostizierbarkeit der Wasserspeicherfähigkeit ergeben, werden den Ergebniskapiteln ausführlich dargestellt und diskutiert.

4.3 Pflanzenökologische Feuchte- und Reaktionsstufen

Die von BURNAND & HASSPACHER (1999) im Maßstab 1 : 5.000 kartierten pflanzensoziologischen Waldgesellschaften dienen als Vorhersagegrößen in den Prognosemodellen. Aus den Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften können die Bodenfeuchtesituation (Feuchtestufe) und der allgemeine Reaktionszustand (Reaktionsstufen basisch / neutral / sauer) abgeleitet werden. Hierfür wurden die Ökogramme nach BURNAND & HASSPACHER (1999) für jede der rund 120 kartierten Waldgesellschaften und Ausbildungen ausgewertet und die pflanzenökologischen Feuchte- und Reaktionsstufe von MOSIMANN ET AL. (2011) gemäß Tab. 7 klassifiziert. Übertragen auf die Vektordaten der Waldgesellschaften können die Feuchte- und Reaktionsstufen anschließend in das GIS und in die technische Modellumsetzung integriert werden.

Feuchtestufe		Reaktionsstufe	
Klasse	Einstufung	Klasse	Einstufung
1	sehr trocken	1	basisch
2	trocken	2	leicht basisch
3	frisch	3	mittel
4	feucht	4	leicht sauer
5	nass	5	sauer

Tab. 7
Einstufung der pflanzenökologischen Feuchte- und Reaktionsstufe.
Nach BURNAND & HASSPACHER (1999).

Bei der Bewertung der pflanzenökologischen Feuchte- und Reaktionsstufen als Eingangsgröße für die wissensbasierte Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit gibt es einige wichtige Aspekte zur Unschärfe dieser Informationen zu berücksichtigen. Während manche Pflanzenarten aus dem Zusammenwirken von Konkurrenz und Standortansprüchen nahezu überall wachsen, sind andere auf spezielle Standorte beschränkt (BURNAND & HASSPACHER 1999). Diese Arten sind gute Zeigerpflanzen für bestimmte Standortbedingungen. Hierzu zählen im Kanton BL nach BURNAND & HASSPACHER (1999) beispielsweise die Heidelbeerstaude (*Vaccinium myrtillus*), die regelmäßig saure Böden anzeigt oder die Weisse Segge (*Carex alba*), die nur auf trockenen Kalkböden vorkommt. Je nach Artenzusammensetzung fallen die Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften für die Bodenverhältnisse damit unterschiedlich deutlich aus. Entsprechend umfasst das Spektrum der Feuchte- und Reaktionsstufen in den Ökogrammen zum Teil mehr als eine Stufe (z.B. Feuchtestufe trocken bis frisch). Hinzu kommt, dass die Ausbildung und Verbreitung der Waldgesellschaften nicht nur von den Bodenverhältnissen, sondern von einer Reihe weiterer maßgeblicher Faktoren beeinflusst wird (z.B. Strahlungs- und Wärmeverhältnisse, Exposition, Neigung, Höhenlage). Die Faktorenkombinationen bedingen Verbreitungsgrenzen und Übergänge der Waldgesellschaften, die zumeist kontinuierlich verlaufen und das räumliche Verteilungsmuster der Bodenverhältnisse nur eingeschränkt wiedergeben (BURNAND & HASSPACHER 1999,

FRIEDRICH 2001). Während der vegetationskundlichen Standortkartierung werden die Waldgesellschaften räumlich voneinander abgegrenzt. Die Kartierung stützt sich dabei "auf waldwachstumsbestimmende Standortmerkmale, die nicht unbedingt mit bodensystemischen Kriterien übereinstimmen müssen" (FRIEDRICH 2001, S. 72). Neben den Feuchte- und Reaktionsstufen, die den Flächen über die Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften zugewiesen wurden, ist damit vom Vorkommen weiterer Varianten auszugehen.

Die Erläuterungen zeigen, dass die Informationen zu den pflanzenökologischen Feuchte- und Reaktionsstufen mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Waldgesellschaften sind dadurch in unterschiedlichem Maße als Vorhersagegrößen für Bodenverhältnisse geeignet. Dabei sind die Zeigereigenschaften derjenigen Waldgesellschaften für die Bodenverhältnisse aussagekräftiger, deren Pflanzensoziologie ein Indikator für Feuchte- und Reaktionsstufen in den Randbereichen der Ökogramme darstellt. Hierzu zählen sehr trocken / trocken und nass bei der Feuchtestufe, sowie basisch und leicht sauer / sauer bei der Reaktionsstufe. Dies zeigen die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen von MOSIMANN ET AL. (2011) und FRACEK & MOSIMANN (2012). Waldgesellschaften, wie die verschiedensten Buchenwälder, die unter sehr vielfältigen Standortbedingungen im Untersuchungsgebiet vorkommen, haben hingegen nur schwache Zeigereigenschaften für die Bodenverhältnisse. Die Feuchte- und Reaktionsstufen bewegen sich hier zumeist im mittleren Spektrum der Ökogramme. Aus diesem Grund müssen die pflanzenökologischen Feuchte- und Reaktionsstufen bei der wissensbasierten Modellentwicklung in verschiedensten Prädiktorenkombinationen getestet werden. Auf diese Weise sind Rückschlüsse möglich, ob die Feuchtestufen überhaupt eine räumlich differenzierte Prognose der Wasserversorgungssituation der Waldböden zulassen.

4.4 Physiologische Gründigkeit und Skelettgehalt der Böden

Das Wasserspeichervermögen der Böden hängt von der Bodenart, der Gründigkeit, dem Skelettgehalt und in geringerem Umfang auch von der Lagerungsdichte ab. Im Jura liegen fast alle Böden im Bereich der Lehme. Die Bodenarten der Lehme variieren im Tafel- und Faltenjura nicht sehr stark und damit auch nicht die Mittelporenanteile, in denen das ökologisch maßgebende pflanzenverfügbare Wasser gegen die Schwerkraft zurückgehalten wird (BLUME ET AL. 2002). Die Bodenart ist deshalb nicht der entscheidende Faktor der standörtlichen Differenzierung des Wasserspeichervermögens. Die Speicherfähigkeit hängt hier primär von der Gründigkeit und dem Skelettgehalt der Waldböden ab (MOSIMANN 2011). Unter der Gründigkeit wird die pflanzennutzbare Gründigkeit im Sinne des effektiven Wurzelraumes verstanden. Der Skelettgehalt beschreibt den Steingehalt der einzelnen Bodenhorizonte. Die Ermittlung der beiden Bodenmerkmale erfolgt für jedes Waldbodenprofil mit den in Kap. 2.2.2 beschriebenen kombinierten Feld- und Labormethoden.

Geringe Feinbodenvolumina schränken die Speicherkapazität der Waldböden erheblich ein. Bei gleichbleibender Mächtigkeit wird das Feinbodenvolumina um den Volumenanteil des Skelettgehalts reduziert (AD-HOC-AG BODEN 2005). Unabhängig von der Bodenart beeinflussen diese beiden Bodeneigenschaften das Wasserspeichervermögen damit erheblich. Abb. 19 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

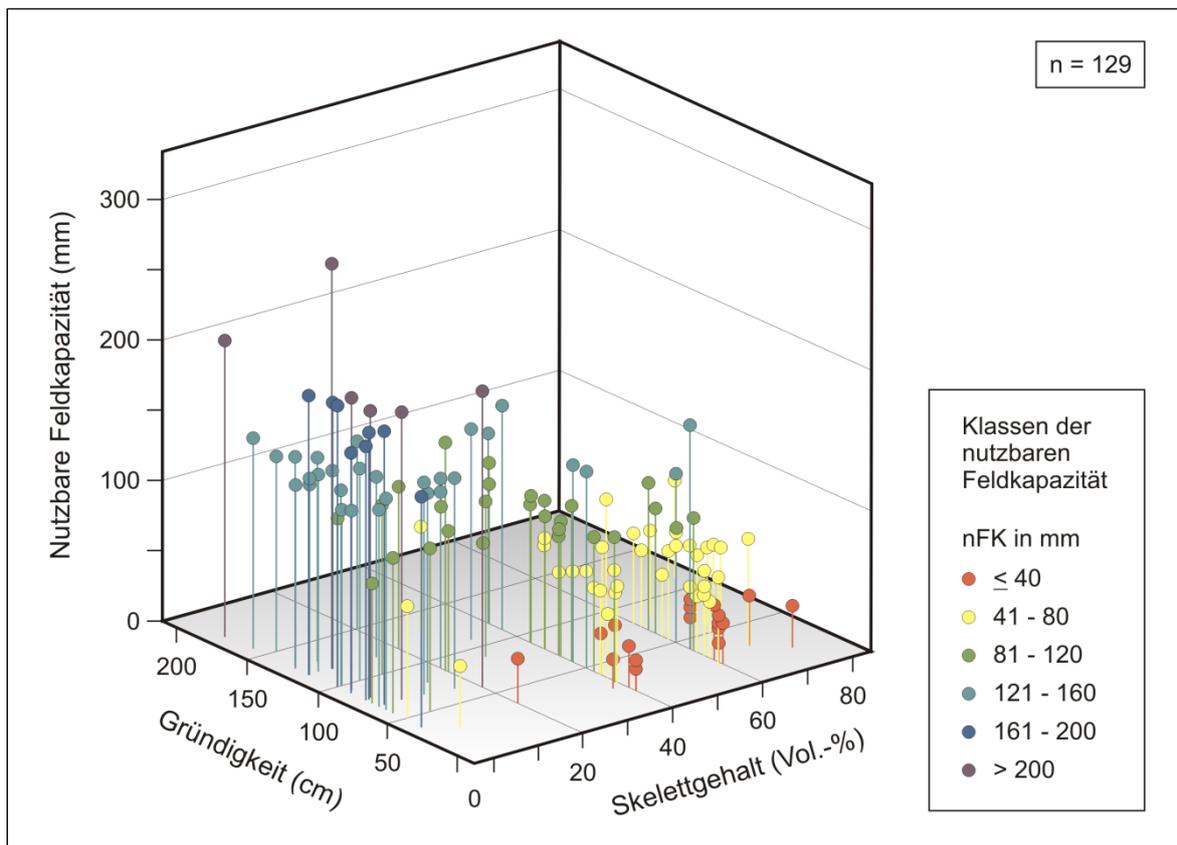


Abb. 19 Nutzbare Feldkapazität in Abhängigkeit von Grundigkeit und Skelettgehalt.

Die nFK nimmt von 15 - 20 mm bei sehr flachgründigen und skelettreichen Böden (Rendzinen und verbrauchte Rendzinen) über skelettärmere und feinmaterialreichere Böden (z.B. Gehängeschutt, Hanglehm, Tonmergel) bis auf rund 200 mm bei den sehr tiefgründigen und nahezu skelettfreien Böden zu (Lössle und mächtige Decklehme). Desweiteren zeigt Abb. 19, dass die flachgründigen Böden häufig skelettreich und nie skelettfrei sind. Mit zunehmender Grundigkeit wird der Skelettgehalt immer geringer und beträgt auch auf den tiefgründigen Gehängeschutten im Jura nie mehr als 50 Vol.-% (MOSIMANN 2011). Grundigkeit und Skelettgehalt hängen im Jura folglich zusammen. Die Lössstandorte mit der höchsten Grundigkeit sind ohnehin vom Substrat her skelettfrei oder bei umgelagertem Lösslehm nahezu skelettfrei.

Die Werte des Wasserspeichervermögens werden für die gesamten Waldbodenprofile in der dieser Arbeit in Abhängigkeit von Grundigkeit (cm), Skelettgehalt (Vol.-%), Bodenart und Trockenrohichte (Vol.-%) ermittelt. Die rechnerische Abschätzung erfolgt mit der in Kap. 2.2.3 vorgestellten Pedotransferfunktion (PTF).

Die geringe Datendichte und die vielfältigen Prädiktorenkombinationen im Untersuchungsgebiet haben zur Folge, dass an einigen Endknoten der Entscheidungsbäume nur vereinzelte oder keine Bodenprofile mit Angaben zur Wasserspeicherfähigkeit vorliegen. Im Rahmen der wissensbasierten Modellierung wird die PTF deshalb angewendet, um für die betroffenen Prädiktorenkombinationen die fehlenden Wasserspeicherfähigkeitswerte abzuschätzen. Für die Bodeneigenschaften Grundigkeit und Skelettgehalt liegen von MOSIMANN ET AL. (2011) entscheidungsbasierte Prognosemodelle vor. Anhand der Unterteilungsregeln

dieser Entscheidungsbäume ist jeder Prädiktorenkombination ohne Wasserspeicherfähigkeitswert für ein Bodenprofil, eine Prognose der Gründigkeit und des Skelettgehalts zuweisbar. Dies ermöglicht die Abschätzung von FK und nFK mit Hilfe der PTF. Die Modellprognosen für die Gründigkeit (cm) und den Skelettgehalt (Vol.-%) sind in vier Klassen eingestuft (Tab. 8).

Gründigkeit (cm)		Skelettgehalt (Vol.-%)		
Klasse	Wertebereich	Klasse	Wertebereich	
1	≤ 20	1	≤ 10	
2	20 - 60	2	10 - 30	Tab. 8
3	60 - 100	3	30 - 50	Klassen der prognostizierten Gründigkeit und des Skelettgehalts.
4	> 100	4	> 50	Nach MOSIMANN ET AL. (2011).

Aus der Verwendung der bereits prognostizierten Eingangsparameter Gründigkeit und Skelettgehalt und aus ihrer Auflösung in jeweils vier Klassen ergeben sich Restriktionen für die Genauigkeit der mittels der PTF abgeschätzten Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit. Bei PTF besteht das grundsätzliche Problem von Fortpflanzungsfehlern (SCHRAMM ET AL. 2006). Das Wasserspeichervermögen stellt eine indirekt erhobene Information dar, die im vorliegenden Fall zudem auf bereits prognostizierten Eingangsgrößen (Gründigkeit und Skelettgehalt) basiert. Damit bestehen bei dieser Verfahrensweise zwei bedeutsame Ursachen informationaler Unsicherheit (FRIEDRICH 2001). Die Aussagesicherheit der abgeschätzten Informationen zum Wasserspeichervermögen ist damit grundlegend eingeschränkt. Durch die ordinal skalierten und klassifizierten Eingangsgrößen ist eine Abschätzung exakter (metrisch skalierten) Speicherfähigkeitswerte nicht möglich. Vielmehr wird für jede Prädiktorenkombination ohne Profilinformatoren zur Wasserspeicherfähigkeit mit der in Kap. 2.2.3 erläuterten Vorgehensweise ein Wertespektrum des Speichervermögens abgeschätzt. Damit ist die näherungsweise Abbildung der relativen Unterschiede der Wasserversorgungssituation für die Standortbedingungen möglich, für die sonst keine Informationen zum Wasserspeichervermögen vorliegen würden. Diese abgeschätzten Wertespektren werden in der wissensbasierten Modellentwicklung u.a. mit dem auf bodenkundlichen Feldaufnahmen basierenden Erfahrungswissen und mit Analogieschlüssen aus vergleichbaren Standortbedingungen kombiniert (Kap. 5.2.3). Hierauf basiert eine empirische Einstufung der Wasserspeicherfähigkeit. Damit dienen die mittels der PTF abgeschätzten Informationen zur Ergänzung der Wissensbasis für die Modellierung. Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung der Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen zur Abschätzung des Wasserspeichervermögens für Prädiktorenkombinationen ohne Profilinformatoren zur Speicherkapazität trotz der informationalen Unsicherheiten zu vertreten. In Kap. 5.2.6. erfolgt eine kritische Betrachtung dieser Verfahrensweise.

5 Wissensbasierte empirisch-statistische Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des wissensbasierten empirisch-statistischen Modells für die Prognose der Wasserspeicherfähigkeit beschrieben. Ein besonderer Schwerpunkt ist dabei neben der eigentlichen Modellierung, die Diskussion der Möglichkeiten und Grenzen dieses entscheidungsbasierten Ansatzes. Abb. 20 stellt das generelle Vorgehen der wissensbasierten Modellentwicklung und der Erstellung von Prognosekarten dar.

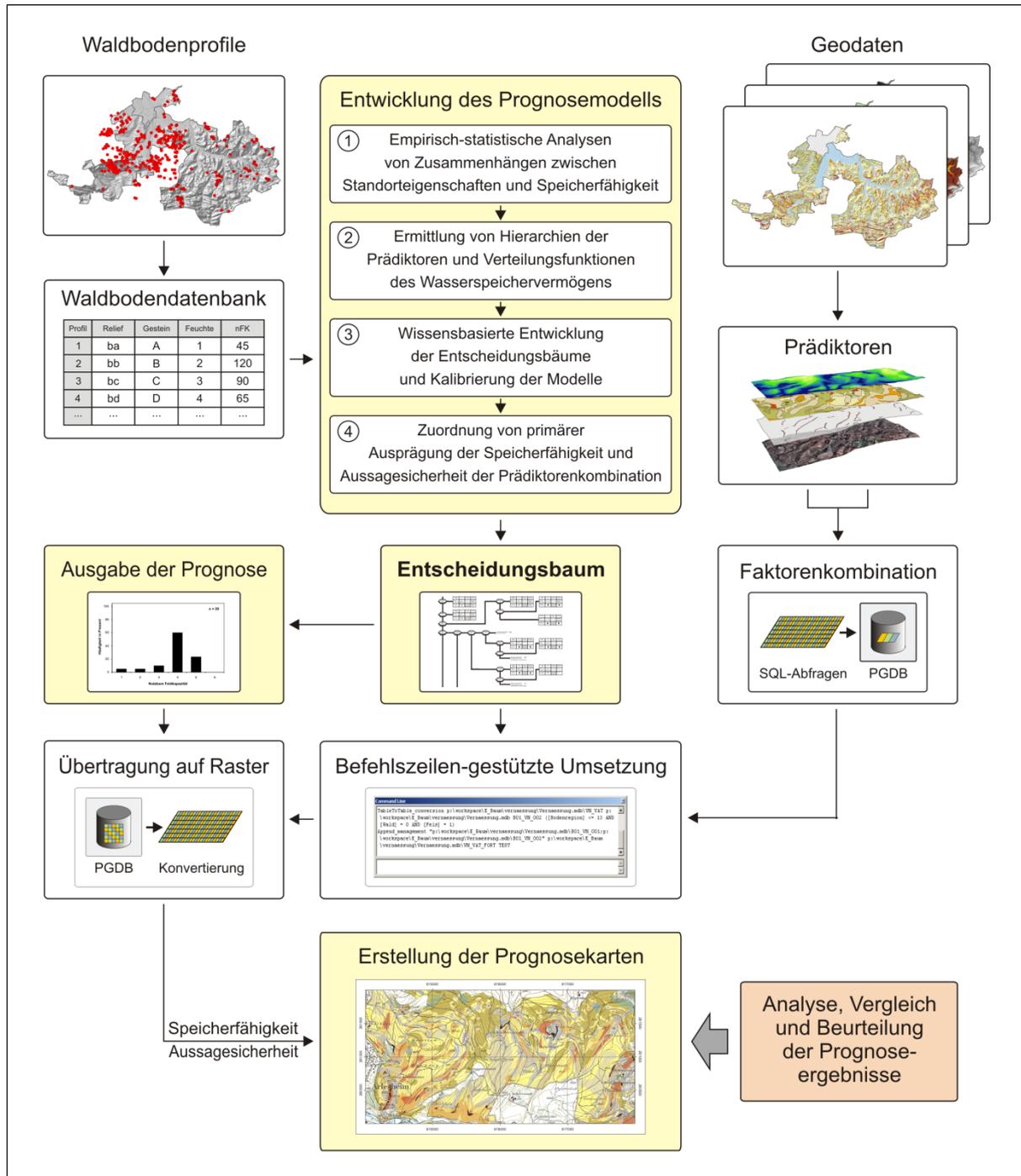


Abb. 20 Konzept und Ablauf der wissensbasierten empirisch-statistischen Modellentwicklung und Prognose.

5.1 Prämissen für die Modellierung

Das verwendete Verfahren zur Modellierung des Wasserspeichervermögens kombiniert häufigkeitsstatistische Analysen mit Expertenwissen. Die Regionalisierung der Wasserspeicherfähigkeit der Waldböden erfolgt dabei faktorenbasiert auf der Basis von Entscheidungsbäumen.

Für dieses Modellierungsverfahren sind folgende Bedingungen ausschlaggebend:

1. Es sollen flächendeckend digitale Prognosekarten des Wasserspeichervermögens der Waldböden in einer Auflösung erstellt werden, die aufgrund der verfügbaren Datenbasis und bestmöglichen Modellkalibrierung erreichbar ist.
2. Um die spezifischen naturräumlichen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet genügend berücksichtigen zu können, müssen in den drei Bodenregionen individuelle Modelle entwickelt und kalibriert werden.
3. Die Modellstruktur muss für Anwender (Waldfachleute, Forschende) transparent und nachvollziehbar sein. Keine Verwendung automatisierter *black-box*-Verfahren. Der Einfluss der Prädiktoren und der Faktorenkombinationen auf die Prognoseergebnisse in den Karten müssen einzeln nachvollziehbar sein.
4. Stichproben sind in der Regel nur bei weit verbreiteten Standorttypen genügend groß. Deshalb müssen die Modelle die Kombination von statistischen Analysen mit Expertenwissen ermöglichen.
5. Der Modellansatz muss ausbaubar und langfristig einsetzbar sein. Mit neuen Erkenntnissen (z.B. aus Kartierungen) sollen die Modelle einfach angepasst werden können.
6. Die Modellierung benötigt die Integration verschiedener Prädiktoren, die nach Möglichkeit alle bodenbildenden Faktoren umfassen. Nur so können die vielfältigen Einflüsse auf den Boden räumlich genügend differenziert berücksichtigt werden.
7. Die Auflösung der Prognoseergebnisse muss die Beantwortung ökologischer Fragestellungen und die Verwendung in weiterführenden Modellierungen gewährleisten.
8. Vorhersagen sind mit Unsicherheiten behaftet. Die digitalen Ergebniskarten müssen deshalb neben der Prognose auch Informationen zur Aussagesicherheit enthalten.
9. Es gibt Areale für die mit der verfügbaren Stichprobe und dem vorhandenen Wissen keine Aussage möglich ist. Diese Flächen müssen gesondert ausgewiesen werden.

5.2 Modellentwicklung

5.2.1 Übersicht zu den Prädiktoren

Für die Prognose von Bodeneigenschaften werden die Zusammenhänge zwischen den standortspezifischen Ausprägungen der bodenbeeinflussenden Faktoren und den daraus resultierenden Bodeneigenschaften beschrieben und anschließend modelliert. Die Beziehungen zwischen den vielfältigen standortspezifischen Faktoren und den Bodeneigenschaften sind komplex (MCBRATNEY ET AL. 2003). Eine räumlich differenzierte Aussage zu den Bodeneigenschaften kann deshalb nur auf Basis einer möglichst umfangreichen Erfassung und Kombination der vielfältigen bodenbeeinflussenden Standortfaktoren (Prädiktoren) erfolgen. Für die Entwicklung des Vorhersagemodells der Wasserspeicherkapazität werden deshalb alle im kantonalen GIS verfügbaren Informationen zu den Standortfaktoren verwendet (Kap. 2.2.4).

Die Grundlagendaten müssen mit zum Teil neu konzipierten Übersetzungsschlüsseln in für die Bodenvorhersage geeignete Größen und Skalen transformiert werden (Gestein, Waldgesellschaften) (MOSIMANN ET AL. 2011). Die Reliefeigenschaften sind entscheidend für die Entstehung des Bodens. Eine weitere Voraussetzung ist deshalb die Berechnung vielfältiger morphometrischer Parameter und die Durchführung einer komplexen Reliefmodellierung auf Basis des Höhenmodells (Kap. 3). Die Gründigkeit und der Skelettgehalt haben im Untersuchungsgebiet einen maßgeblichen Einfluss auf die Speicherkapazität der Böden für Wasser. Deshalb werden die Prädiktoren aus den wissensbasierten Modellen für die Prognose der Gründigkeit und den Skelettgehalt von MOSIMANN ET AL. (2011) in die Modellentwicklung mit einbezogen.

Tab. 9 gibt eine Übersicht zu den verwendeten Prädiktoren für die Modellierung der Gründigkeit und des Skelettgehalts (MOSIMANN ET AL. 2011) sowie der Wasserspeicherkapazität. Für den ausgewählten Prädiktorensatz werden umfangreiche empirisch-statistische Analysen von Zusammenhängen zwischen den Merkmalsausprägungen der Standortbedingungen und der Wasserspeicherkapazität durchgeführt. Dabei werden die Prädiktoren schrittweise miteinander kombiniert um Verteilungsfunktionen abzuleiten und daraus eine Hierarchie der Prädiktoren zu ermitteln, die auf der Bedeutung der einzelnen Prädiktoren als Vorhersagegrößen für die Ausprägung des Wasserspeichervermögens basiert.

Prädiktoren	Bodeneigenschaften				
	Gründigkeit	Skelettgehalt	Wasserspeicherfähigkeit		
			Löss- hügelland	Jura	Talböden
Relief (15 morph. Reliefformtypen)	•	•	•	•	•
Waldtyp (Schuttwald)	•	•		•	
Gestein (16 Gesteinstypen / -gruppen)	•	•	•	•	•
Pflanzenökologische Feuchtestufe (5 Stufen)	•	•	•	•	•
Pflanzenökologische Reaktionsstufe (5 Stufen)		•	•		
Positionsparameter (Distanz zu Fels / Hangkante)	•	•		•	
Positionsparameter (Vertikal- distanz zur Tiefenlinie)	•	•		•	
Hangneigung (Grenzwerte in Grad)	•	•	•	•	
Höhe ü. NN (Schwellenwerte in m)					•
Wald auf anthropogener Aufschüttung					•

Tab. 9 Übersicht zu den Prädiktoren für die räumliche Modellierung der einzelnen Waldbodeneigenschaften. Angaben zu den Prädiktoren von Gründigkeit und Skelettgehalt nach MOSIMANN ET AL. (2011).

Abb. 21 visualisiert den Prädiktorensatz, der sich in den statistischen Analysen für die Vorhersage der Wasserspeicherfähigkeit als bedeutsam erwiesen hat. Die Reihenfolge in der Darstellung entspricht der generellen Hierarchie der Prädiktoren für die Integration in die entscheidungsbasierten Prognosemodelle. An die Auswahl der geeigneten Vorhersagegrößen für die Prognose der Wasserspeicherfähigkeit schließt sich deren schrittweise Kombination an. Erst die Kombination kann die vielseitigen Einflüsse der Bodenbildungsfaktoren (MCBRATNEY ET AL. 2003) auf die Bodeneigenschaften räumlich genügend differenziert abbilden.

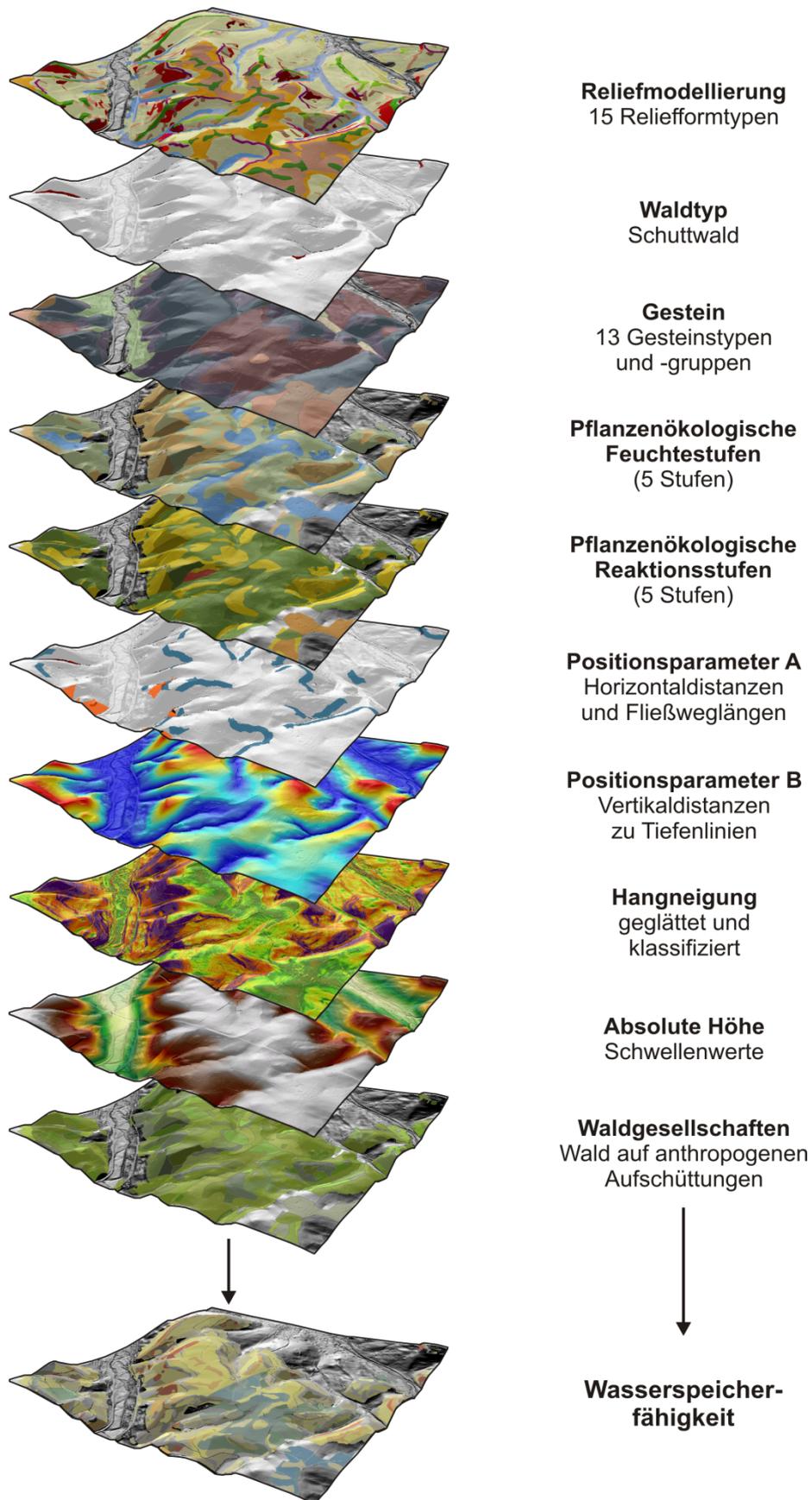


Abb. 21 Verwendete Prädiktoren für die Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden.

5.2.2 Grundstruktur der entscheidungsbasierten Prognosemodelle

Die räumlich differenzierte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit erfolgt in dieser Arbeit mit entscheidungsbasierten Vorhersagemodellen, deren Struktur den CART (BREIMAN ET AL. 1984, BERK 2008a) entspricht. Diese Entscheidungsbäume strukturieren die Unterteilungsregeln für die Prädiktoren der Zielgröße (hier: des Bodenmerkmals) in einer ordnenden Hierarchie. Die Hierarchie zielt darauf ab, mit einer effizienten und nachvollziehbaren räumlichen Differenzierung der Bodenbildungsfaktoren, eine möglichst sichere und räumlich differenzierte Aussage zur Ausprägung der Wasserversorgungssituation treffen zu können. Damit gründet die Reihenfolge der Prädiktoren in der Hierarchie auf ihrer jeweiligen Eignung zur räumlich differenzierten Abbildung der Bodeneigenschaften.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Schnittpunkt dreier Hauptlandschaftstypen (Kap. 1.3). Aufgrund der hierdurch bedingten vielfältigen naturräumlichen Gegebenheiten und Standortbedingungen müssen für die drei Bodenregionen Lösshügelland, Jura und Talböden individuelle Entscheidungsbäume entwickelt werden. So braucht es beispielsweise regionsspezifische Schwellenwerte und Grenzkriterien für die Klassifikation morphometrischer Reliefparameter (z.B. Hangneigungen, Positionsparameter) zur näherungsweisen Erfassung kleinräumiger Substratvariationen. Die Prädiktoren sind im Einzelnen nicht in allen Bodenregionen gleich aussagekräftig. Auch die Reliefformtypen können nur in einer räumlich plausiblen Ausdehnung ausgewiesen werden, wenn die Reliefgliederung auf das jeweils landschaftstypische Formeninventar angepasst ist (Kap. 3.3). Erst die regional angepassten Reliefformtypen sind aussagekräftig für die Wasserversorgungssituation. Zur besseren Übersicht haben aber alle Prognosemodelle von MOSIMANN ET AL. (2011) eine einheitliche Reihenfolge der Prädiktoren. Diese früher ermittelte Grundstruktur wird für die Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit übernommen. Tab. 9 und Abb. 21 zeigen die grundsätzliche hierarchische Anordnung der Vorhersagegrößen und Tab. 9 gibt zudem Aufschluss darüber, welche Prädiktoren des Wasserspeichervermögens in den jeweiligen Modellen der drei Bodenregionen Verwendung finden.

Abb. 22 stellt den prinzipiellen Aufbau der entscheidungsbasierten Prognosemodelle an einem vereinfachten Modellausschnitt vor. Die Darstellung beschränkt sich auf das Zusammenwirken der Prädiktoren *Relief*, *Gestein*, *Feuchtestufen* und *Vertikaldistanz zur Tiefenlinie*. Die modellierten Reliefparameter stehen in allen Bodenregionen grundsätzlich an erster Stelle. Das Relief ist einer der Schlüsselfaktoren bodenbildender Prozesse und der standörtlichen Ausprägung von Bodeneigenschaften (MCBRATNEY ET AL. 2003, GEITNER ET AL. 2011). So beeinflussen beispielsweise der reliefbezogene Bodenwasserhaushalt und der laterale Materialversatz die Bodendifferenzierung unterschiedlicher Standorte deutlich (BÖHNER & KÖTHE 2003). Auch im Jura wird die räumliche Differenzierung der Bodenverhältnisse vom geomorphologischen Prozessgeschehen wesentlich beeinflusst. Dies zeigt sich darin, dass Böden in auf- und umgelagerte Deckschichten quartären und periglazialen Ursprungs flächenmäßig dominieren (z.B. Decklehme auf ebenen Plateaubereichen, Lehm- und Schuttdecken in Hangbereichen, fehlend in exponierten Lagen wie auf Kämmen, Scheiteln oder Kuppen).

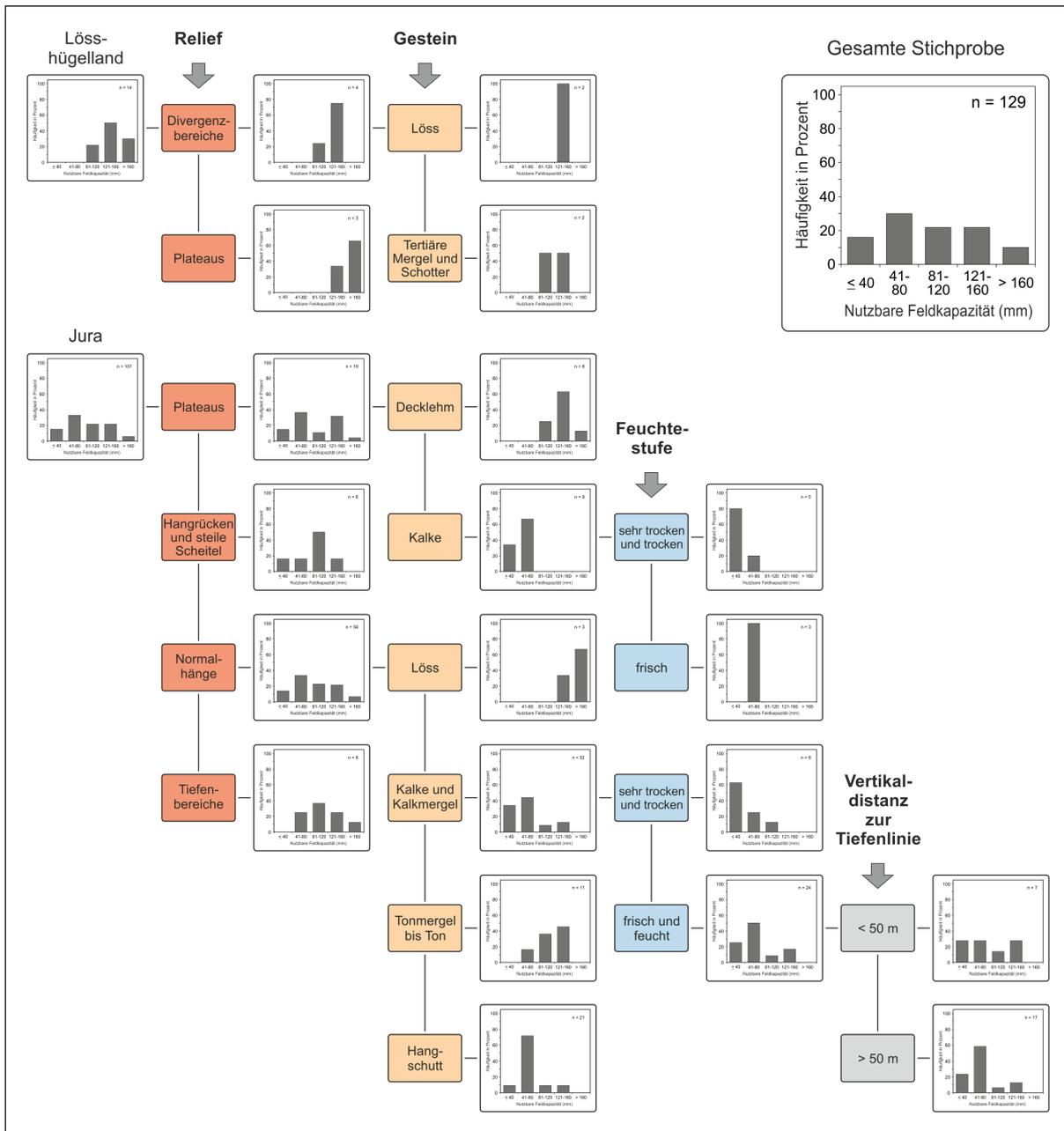


Abb. 22 Vereinfachte Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der Prognosemodelle der nutzbaren Feldkapazität. In den einzelnen Diagrammen werden die prozentualen Häufigkeitsverteilungen der nFK für die jeweiligen Modellpositionen dargestellt. Die Teilstichproben werden anhand der Unterteilungsregeln des Entscheidungsbaumes selektiert. Jede Modellposition repräsentiert eine individuelle Kombination aus den Prädiktoren Relief, Gestein, Feuchtestufe und Vertikaldistanz zur Tiefenlinie. Der Prädiktor *Schuttwald* fehlt in dieser Darstellung.

Zudem ist das Relief nicht nur ein Schlüsselfaktor der standörtlichen Bodenverhältnisse sondern es beeinflusst auch die Merkmalsausprägungen anderer Prädiktoren. So werden beispielsweise durch Exposition, Neigung und Höhenlage die pflanzensoziologische Zusammensetzung der Waldgesellschaften, der lokale Wasserhaushalt sowie über Fließweglängen und Vertikaldistanzen laterale Stoffverlagerungen und Materialversatz in den Hängen mitbestimmt. Der Waldtyp *Schuttwald* ist ein indirekter Ausdruck für skelettreiche Steilhanglagen. Schuttwaldstandorte weisen im Jura sehr starke Zusammenhänge mit den Bodeneigenschaften auf und stehen deshalb in der Prädiktorenhierarchie an zweiter Stelle.

Die entscheidungsbasierten Modelle sind so strukturiert, dass der Einfluss des Prädiktors Gestein auf die Bodeneigenschaften nach den Reliefformtypen differenziert berücksichtigt wird. Dies liegt darin begründet, dass das Relief die räumliche Differenzierung der Ausgangssubstrate der Bodenbildung im Untersuchungsgebiet maßgeblich beeinflusst. So lässt sich eine Bodenentwicklung in anstehenden Gesteinen nur in den Reliefbereichen finden, in denen keine Ab- und Umlagerung von Verwitterungsmaterial stattgefunden hat (z.B. Kämme, Scheitel, Kuppen, oberhalb von Felsstufen, auf Hangrücken) (MOSIMANN 2011). In diesen Reliefbereichen hat die petrographische Zusammensetzung der Gesteine eine hohe Aussagekraft für die Wasserspeicherfähigkeit der Böden. Desweiteren beeinflusst das Relief die räumliche Verbreitung der auf- und umgelagerten Deckschichten (z.B. auf den Jurahängen, in konkaven Hangbereichen, in Hangmulden oder Tiefenlinien). Die Deckschichten können sich mit dem Verwitterungsmaterial des lokal anstehenden Festgesteins vermischen. Damit bestimmen neben den Reliefbedingungen die Eigenschaften der anstehenden Gesteinstypen die Mächtigkeit und Zusammensetzung (Lehm- und Steinanteile, Bodenart) der Ausgangssubstrate der Bodenbildung. Somit lassen die petrographischen Gesteinstypen vor allem in Bereichen geringmächtiger Deckschichten Rückschlüsse auf die Wasserversorgungssituation zu.

Relief und Gestein sind Faktoren, welche die Bodenbildung direkt beeinflussen. Die Waldgesellschaften sind hingegen ein Indikator mit Zeigerwert für die Bodeneigenschaften. Die aus den Waldgesellschaften empirisch abgeleiteten pflanzensoziologischen Feuchtestufen sind keine bodenbeeinflussenden Faktoren. Die Feuchtestufen lassen Rückschlüsse auf die standörtliche Bodenfeuchtesituation zu, welche aber maßgeblich von den Relief- und Gesteinseigenschaften geprägt wird. Deshalb stehen die Feuchtestufen in der Modellhierarchie hinter den Prädiktoren Relief und Gestein. Die Feuchtestufen weisen Zusammenhänge mit standörtlichen Substratvariationen auf. Damit erlauben sie vor allem für die Randbereiche der Einstufung (sehr trocken / trocken und nass) Rückschlüsse auf das Wasserspeichervermögen an Waldstandorten. Hierdurch lassen sich u.a. auf ebenen Plateaubereichen Areale mit Bodenbildung in anstehendem Gestein (z.B. Rendzinen) von angrenzenden tiefgründigeren Böden in Deckschichten (z.B. Lössschleier) differenzieren.

Neben diesen übergeordneten Prädiktoren mit allgemeiner Bedeutung für die Bodeneigenschaften, gibt es weitere Faktoren, welche die Verbreitungssystematik der Wasserspeicherfähigkeit beeinflussen. Hierbei handelt es sich um Positionsparameter, Hangneigung, Höhenlage und spezielle Waldgesellschaften. Mit regionsspezifischen Schwellenwerten und Grenzkriterien ermöglichen sie die näherungsweise Erfassung kleinräumiger Variationen des Wasserspeichervermögens unter bestimmten Standortbedingungen. Aufgrund der verschiedenen naturräumlichen Eigenschaften in den drei Bodenregionen sind diese Prädiktoren nicht in allen Modellregionen gleich aussagekräftig oder treten nur in einer der Bodenregionen in Erscheinung. Tab. 10 listet diese Prädiktoren auf und begründet deren Verwendung in den regionsspezifischen Vorhersagemodellen.

Prädiktor	Bodenregion	Grund der Verwendung
Waldtyp (Schuttwald)	Jura	Abbildung skelettreicher und flachgründiger Steilhangelagen mit sehr geringer Wasserspeicherkapazität (nFK kleiner 40 mm) im Tafel- und Faltenjura.
Pflanzenökologische Reaktionsstufe	Lösshügelland	Versauerung ist in Lössen in der Regel fortgeschritten. Basische Reaktionsstufen (und mehr als 25 Grad Neigung) liefern deshalb Hinweise auf Hanglagen ohne Deckschichten, bei denen kalkhaltige tertiäre Mergel und Kalke nah unter oder direkt an der Oberfläche anstehen.
Positionsparameter (Distanz zu Fels / Hangkante)	Jura	Abgrenzung von Waldstandorten im Einflussbereich schuttliefernder Felsbänder und im Übergangsbereich von den Plateaus in die meist steileren, konvexen und damit häufig flachgründigen Oberhänge.
Positionsparameter (Vertikaldistanz zur Tiefenlinie)	Jura	Erfassung von Unterhängen (Hangfüßen) mit kleinräumigem Wechsel von Hanglehmen und Hangschutt, die gegenüber den anstehenden Kalksteinen zu einer tendenziell höheren Wasserspeicherkapazität führen.
Hangneigung (verschiedene Schwellenwerte)	Jura / Lösshügelland	Differenzierung von Hängen mit 25 – 32 Grad Neigung für die Annäherung an Verbreitung flachgründiger Standorte auf Kalk und mit kleiner als 5 Grad Neigung von Hangverflachungen mit akkumuliertem Feinmaterial.
Höhenlage (Schwellenwert)	Talböden	Abgrenzung der Schotterebenen im Rheintal von den Juratälern mit häufiger vorkommenden feinmaterialreichen Deckschichten.
Wald auf anthropogener Aufschüttung	Talböden	Erfassung der durch Aufschüttungen, Verfüllungen und Auftrag von Fremdmaterial anthropogen veränderten Böden der Schotterebenen.

Tab.10 Auflistung der regionsspezifisch verwendeten Prädiktoren und Schwellenwerte in den wissensbasierten Modellen der drei Bodenregionen.

Entsprechend der Anzahl an Prädiktoren und der relevanten Faktorkombinationen in den unterschiedlich großen Bodenregionen, sind die Entscheidungsbäume verschieden stark verästelt. In den relief- und substratspezifisch einfach strukturierten Talböden genügen 15 Endknoten für die faktorenbasierte Regionalisierung des Wasserspeichervermögens. In den weitgehend homogenen Lössregionen werden durch die variierenden Relief- und Substratverhältnisse rund 30 Endknoten für eine räumliche Differenzierung der Speicherefähigkeit benötigt. Aufgrund der großen Vielfalt und z.T. kleinräumigen Wechsel der Standortbedingungen in der großen Bodenregion Jura (etwa 188 km² Waldfläche), sind hier die Entscheidungsbäume mit rund 150 Endknoten 5-mal so umfangreich.

5.2.3 Verfahrensweise bei den Prädiktorenkombinationen mit kleinen Stichproben oder fehlenden Werten zur Wasserspeicherfähigkeit

Begrenzte Datensätze sind ein weit verbreitetes Problem bei der Regionalisierung von Bodeninformationen (HARTEMINK ET AL. 2008). Neben der Unschärfe von zur Verfügung stehenden Grundlagendaten (FRIEDRICH 2001, ZHANG & GOODCHILD 2002) als Prädiktoren der Bodeneigenschaften in den Modellen, sind vor allem kleine und ungenaue Stichproben von Bodeninformationen der limitierende Faktor für die Genauigkeit modellgestützter Prognosen.

Der vorliegende Prädiktorensatz ermöglicht eine detaillierte Aufgliederung der Entscheidungsbäume. Daraus ergeben sich an den Endknoten der Modelle zum Teil sehr kleine Stichproben für die Prädiktorenkombinationen. Deshalb muss in dieser Arbeit die empirisch-statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen der Wasserspeicherfähigkeit und den bodenbildenden Faktoren mit regionalem Erfahrungswissen über die Bodenverhältnisse kombiniert werden. Insbesondere bei kleinen Stichproben ist die inhaltliche Beurteilung der statistischen Analyseergebnisse auf der Basis der Geländeerfahrung unerlässlich. Überproportional vertretene Ausreißer verzerren hier leicht die Häufigkeitsverteilung. Deshalb müssen die Angaben zu den Waldbodenprofilen in diesen kleinen Teilstichproben im Einzelnen inhaltlich bewertet werden (FRACEK & MOSIMANN 2012). Eine sehr gute bodenkundliche Feldkenntnis der modellierten Region und gezielte Felduntersuchungen zur Ergänzung der Stichprobe sind für dieses Vorgehen Voraussetzung (MOSIMANN ET AL. 2011).

Natürlich gibt es auch bei der Geländekenntnis Lücken. Dies gilt insbesondere für weniger weit verbreitete Standortbedingungen oder Bereiche mit sehr kleinräumigen Wechseln der Zusammensetzung der Deck- oder Verwitterungsschichten. Deshalb erfolgt für jede Prädiktorenkombination im Untersuchungsgebiet eine grundsätzliche Abschätzung der Prognostizierbarkeit von Bodeneigenschaften. Die Abschätzung erfolgt unabhängig von den Stichprobendaten mit festgelegten Bewertungskriterien für die Standortbedingungen. Diese sind auf der Basis von Geländekenntnissen und den Erfahrungen aus vorangegangenen Modellierungen von Bodeneigenschaften in der Region zu beurteilen. Das Prüfsystem wird in Kap. 5.2.5 erläutert. Die Prüfung der Prognostizierbarkeit ermöglicht die Ausweisung von Standortbedingungen, unter denen die Bodeneigenschaften ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit kleinräumig so stark variieren, dass sie nicht von den Prädiktoren abgebildet werden können. In diesen Fällen ist eine modellgestützte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit grundsätzlich nicht möglich. Nur wenn die Einstufung der Prognostizierbarkeit positiv ausfällt, kann die Vorhersage der Wasserspeicherfähigkeit für die Prädiktorenkombinationen mit der im Kap. 2.3 dargestellten methodischen Verfahrensweise erfolgen.

Damit eine Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit durchgeführt werden kann, muss an den Endknoten der Entscheidungsbäume eine der im Folgenden erläuterten Bedingungen erfüllt sein. Für die Prädiktorenkombinationen mit kleinen Stichproben oder ohne Bodenprofil mit Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit gelten im Speziellen die Voraussetzungen unter den Punkten 3 und 4:

1. Die Stichprobe ist für eine Häufigkeitsverteilung genügend groß und weist eine für die Standortbedingungen erwartungsgemäße und unimodale Verteilung auf.
2. Die Stichprobe ist für eine Häufigkeitsverteilung genügend groß, weist aber eine unscharfe oder standortkundlich unplausible Verteilung auf. In diesen Fällen kann eine empirisch begründete Vorhersage erfolgen, wenn:
 - die fehlende häufigkeitsstatistische Aussage durch vorhandenes bodenkundliches Erfahrungswissen über die Standortbedingungen ersetzt werden kann,
 - auf Basis des Erfahrungswissens Ausreißer in der Stichprobe als ungültig eingestuft werden können und sich dadurch eine standortkundlich nachvollziehbare Häufigkeitsverteilung ergibt,
 - Analogieschlüsse zu angrenzenden oder ähnlichen Standortsituationen gezogen werden können oder Zusammenhänge aus anderen Räumen bekannt sind.
3. Die Stichprobe ist zu klein um eine statistisch begründete Aussage treffen zu können. An diesen Endknoten kann eine rein empirische Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit erfolgen, wenn:
 - das örtliche Erfahrungswissen auf Basis eigener Feldaufnahmen und Geländeerfahrung für die betroffene Standortsituation eine Abschätzung der Wasserversorgungssituation ermöglicht,
 - eine auf dem Erfahrungswissen gründende inhaltliche Beurteilung die Angaben zu den einzelnen Waldbodenprofilen bestätigt und damit die quantitativen Zusammenhänge als standörtlich plausibel eingestuft werden kann,
 - unter ähnlichen Standortbedingungen in der Region oder im Rahmen vergleichbarer Untersuchungen gewonnene Erkenntnisse eine Aussage ermöglichen,
 - sich die Angaben zu den einzelnen Waldbodenprofilen mit der Abschätzung des Wertespektrums durch die Pedotransferfunktion auf Basis der Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen (MOSIMANN ET AL. 2011) decken (Kap. 2.2.3).
4. Wenn nur einzelne oder keine Bodenprofile mit Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit vorliegen, kann für die betreffende Prädiktorenkombination eine Abschätzung des fehlenden Wertespektrums mit der Pedotransferfunktion erfolgen. Hierfür müssen in den Entscheidungsbäumen von MOSIMANN ET AL. (2011) die notwendigen Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen für die jeweiligen Faktorenkombinationen vorliegen.

Trifft keine dieser Voraussetzungen zu, ist für die entsprechende Prädiktorenkombination keine Aussage zum Wasserspeichervermögen möglich. Die Waldflächen mit diesen Standortbedingungen sind nicht prognostizierbar und werden als solche in den Karten kenntlich gemacht (siehe Ergebniskarte auf Abb. 27).

5.2.4 Modellkonstruktion für das Lösshügelland und die Talböden

Die Bodenregionen Lösshügelland und Talböden haben mit 8 % nur einen geringen Anteil an der Waldfläche. Deshalb liegen für die beiden Modellregionen nur rund 20 Waldbodenprofile mit Angaben zur Wasserspeicherfähigkeit vor. Die Stichprobe ist für eine rein statistisch belegte Modellentwicklung zu klein. Im Vergleich zu den vielfältigen naturräumlichen Gegebenheiten im Tafel- und Faltenjura, sind das Lösshügelland und vor allem die Talböden naturräumlich wesentlich einfacher strukturiert. Dies gilt sowohl für das regionale Formeninventar des Reliefs als auch für die dominierenden Ausgangssubstrate der Bodenbildung. Im Lösshügelland stocken rund 70 % der Wälder auf Löss und Decklehmen. Für eine räumlich differenzierte Abschätzung der standörtlichen Wasserversorgungssituation genügt deshalb die Konstruktion einfacher Entscheidungsbäume. Hierfür wird die Stichprobenauswertung mit örtlichem Erfahrungswissen aus bodenkundlichen Standortaufnahmen, dem Kenntnisstand der Literatur und Erkenntnissen aus der wissensbasierten Modellierung von Waldbodeneigenschaften im Kanton Basel-Landschaft kombiniert.

5.2.4.1 Lösshügelland

Im Lösshügelland weisen die zumeist tiefgründigen Böden im Löss und in Decklehmen eine hohe Wasserspeicherfähigkeit auf ($nFK > 160$ mm in oberen 100 cm) (BONO 1985, MOSIMANN 2011). Die Literaturangaben lassen sich mit der vorliegenden Stichprobe der Waldböden bestätigen. Tab. 11 zeigt, dass alle Böden im Löss eine Wasserspeicherkapazität aufweisen, die bis 100 cm Tiefe im Bereich von 161 - 200 mm nFK liegt. Das Auftreten dieser hohen nFK-Werte ist für den Großteil der Böden in Löss- und Decklehm-lagen sehr wahrscheinlich und kann damit prognostiziert werden.

Ausgehend von diesem hohen Wasserspeichervermögen der Böden in Löss-Substraten auf den hügeligen Hochflächen, erfolgt die räumliche Differenzierung derjenigen Standort-situationen, bei denen relief- und/oder substratbedingt eine abweichende Wasserspeicherfähigkeit der Böden anzunehmen ist. Divergente Abflussbedingungen und eine konvexe Oberflächenstruktur begünstigen auf den Hochflächen und in den Hanglagen die Erosion von Feinmaterial (BONO 1985). Dadurch sind die Lössböden häufig gekappt (in Bereichen ehemaliger Ackernutzung auf heutigen Waldflächen), wodurch der dichtere Bt-Horizont näher unter der Geländeoberfläche (GOF) ansteht. Schotter sind in Divergenzbereichen häufig durch weniger mächtige Deckschichten (Löss- und Schwemmlösse) überlagert und die sandigen tertiären Mergel können im Untergrund näher an der GOF anstehen. Die Bodenprofile auf Divergenzbereichen weisen eine Speicherfähigkeit von 95 - 175 mm nFK auf (Tab. 11). Erwartungsgemäß fallen die nFK-Werte gegenüber den Profilen auf den Plateaubereichen (170 - 200 mm) tendenziell geringer aus. In den Divergenzbereichen ist es daher wahrscheinlich, dass bei den Böden auf Löss und Schotter neben der verbreitet hohen Speicherkapazität zum Teil auch geringere nFK-Werte auftreten. Diese Tendenz zu geringerer Speicherkapazität wird deshalb vom wissensbasierten Modell als sekundäre Ausprägung auf den Divergenzbereichen ausgewiesen.

Prädiktor	n	Nutzbare Feldkapazität (mm)				
		Min	Max	Spannweite	\bar{x}	Häufigste nFK-Klasse
Bodenregion Lösshügelland	11	95	205	110	163	161-200
Reliefeinheit Divergenzbereich	4	95	179	84	147	161-200
Reliefeinheit Plateaubereich	3	171	198	27	188	161-200
Reliefeinheit Tiefenbereich	4	140	205	65	161	121-160
Gesteinstyp Löss / Decklehm	6	160	205	45	179	161-200
Gesteinstyp (Decken-)Schotter	4	95	195	100	147	121-160

Tab. 11 Nutzbare Feldkapazität der Waldbodenprofile im Lösshügelland differenziert nach modellrelevanten Reliefeinheiten und Substratbedingungen. Die Bodenprofile werden jeweils einer Reliefeinheit und einem Gesteinstyp zugeordnet. Die Selektion der Bodenaufschlüsse ist damit redundant.

Feldaufnahmen mit dem Bohrstock haben gezeigt (Kap. 5.3), dass in den Tiefenlinien und Muldenlagen neben kolluvialen Schwemmlösskörpern (BONO 1985) weitere Substrate kleinräumig differenziert mit variabler Mächtigkeit akkumulieren (z.B. Hanglehme, z.T. mit eingemischten Geröllen, Hangschutt). Damit ist auch die Wasserversorgungssituation in den Tiefenbereichen heterogen, beträgt aber in den meisten Situationen mindestens 120 mm nFK (Abschätzung im Gelände). Vier Bodenprofile liegen in Tiefenbereichen, die je nach Mächtigkeit der kolluvialen Lehme nFK-Werte von 140 - 200 mm aufweisen. Es ist offensichtlich, dass die Wasserspeicherkapazität der Böden in den Tiefenbereichen mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens 120 mm nFK beträgt. Auf Basis der Reliefeinheiten ist derzeit noch keine weitere Differenzierung des Wasserspeichervermögens möglich. Das begrenzte regionale Formeninventar des Reliefs und der eingeschränkte Stichprobenumfang sind die maßgeblichen Ursachen.

Die Standorte mit der geologischen Information Schotter bzw. Deckenschotter haben nach den Lössen mit rund 15 % den zweitgrößten Anteil an der Waldfläche im Lösshügelland. In der Stichprobe handelt es sich nur bei einem Profil um einen ungestörten Schotterstandort (nFK 95 mm). Die übrigen Profile liegen bis etwa 1 m Tiefe in Hanglehm, verspültem Löss oder Kolluviallehm und weisen nFK-Werte von 150 - 195 mm auf. Damit bilden die Bodenaufschlüsse nicht die Bedingungen der sehr skelettreichen Schotter mit ihrem geringen Wasserspeichervermögen ab (nFK 30 - 70 mm). Sie zeigen die Situation an Standorten, die durch unterschiedliche Deckschichten über den Decken- oder Bachschottern geprägt sind (MOSIMANN 2011). Im Sundgauer Lösshügelland treten Schotter der Hochterrasse v.a. in steilen Hangbereichen der Terrassenstufen in Erscheinung. Diese variieren in ihrer Zusammensetzung stark und sind häufig mit umgelagertem Löss oder Verwitterungslehm vermischt. Eine Modellaussage scheidet hier an der Heterogenität der Bodenverhältnisse.

Im Ausläufer des Lösshügellandes bei Giebenach und Arisdorf (BITTERLI-BRUNNER & FISCHER 1988) sind die Deckenschotter weitgehend von Decklehmen aus Löss und von Hanglehmen variabler Mächtigkeit überdeckt. Für die Bodenprofile wurden unter diesen Standortbedingungen nFK-Werte von 150 - 200 mm ermittelt. Auch die stichprobenartige Überprüfung im Gelände lässt insgesamt die Annahme zu, dass die Waldböden über mindestens 120 mm nFK an standörtlichem Wasserspeichervermögen verfügen. Im Gelände konnte desweiteren ein lagebezogener Zusammenhang zwischen der Feuchtestufe trocken gemäß Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften und Deckenschottern mit geringmächtiger oder fehlender Deckschicht und dadurch reduziertem Wasserspeichervermögen nachvollzogen werden. Ein Bodenprofil in der Flur *Im Bärenfels* bei Arisdorf ist vollständig im Deckenschotter entstanden und hat mit 95 mm nFK die geringste Wasserspeicherfähigkeit der Bodenaufschlüsse im Lösshügelland. Es ist zugleich der einzige Profilstandort für den eine trockene Feuchtestufe angezeigt wird. Nach den Erkenntnissen aus lokalen Feldaufnahmen und unter Berücksichtigung vergleichbarer Standortbedingungen im Jura, reicht das Feinbodenvolumen der Böden im Bereich von Deckenschottern mit geringmächtiger oder fehlender Deckschicht in der Regel dafür aus, dass eine nFK von 80 mm nicht unterschritten wird.

Mit den beschriebenen Zusammenhängen werden über 85 % der Waldfläche im Lösshügelland erfasst. Auf die Erläuterung weiterer Auswertungen zu den Zusammenhängen zwischen den Faktorenkombinationen und der Wasserspeicherfähigkeit unter kaum verbreiteten Standortbedingungen (z.B. zur Reaktionsstufe, siehe Tab. 10), wird an dieser Stelle verzichtet. Ergänzenden Ausführungen erfolgen in der Ergebnisdiskussion (Kap. 5.4). Auf der Grundlage sämtlicher Auswertungen wird für das Lösshügelland ein Entscheidungsbaum konstruiert, der rund 30 Endknoten für die räumlich differenzierte Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit umfasst.

5.2.4.2 Talböden

Die Bodenregion Talböden hat mit rund 4 km² Waldfläche einen Anteil von nur 2 % an den Wäldern des Untersuchungsgebietes. Die Modellregion begrenzt sich auf die Schotterebenen des Rheintals und die breiten Talböden mit Schotterablagerungen im Jura (*Birs* und *Ergolz*). Deren physikalische Eigenschaften sind sehr ähnlich: hohe Steingehalte, überwiegend lehmig-sandige Bodenarten und extrem hohe Durchlässigkeit. Damit verfügen die ungestörten Schotterebenen nach MOSIMANN (2011) nur über ein geringes Wasserspeichervermögen (nFK 30 - 70 mm). Die Böden der Schotterebenen sind in vielen Bereichen durch frühere Nutzungen, Aufschüttungen und oberflächlichen Auftrag von fremdem Material stark verändert. Im Zusammenhang mit der Lössumlagerung wurden am Fuß der Hochterrasse des Sundgauer Lösshügellandes Verwitterungslehmdecken von mehreren Dezimetern bis 1 - 2 Metern auf die Niederterrassenschotter abgelagert (BONO 1985). Durch den Auftrag dieser vielfältigen Substrate wird das standörtliche Wasserspeichervermögen erheblich beeinflusst. Die Aufschüttungsböden speichern bis 150 mm Wasser und damit zwei- bis viermal mehr als ungestörte Böden auf Schotter (MOSIMANN 2011). Die Heterogenität dieser ungestörten bis stark gestörten Böden spiegelt auch die verfügbare Stichprobe wieder (Tab. 12).

Waldböden der Schotterebenen	n	Nutzbare Feldkapazität (mm)				
		Min	Max	Spannweite	\bar{x}	Häufigste nFK-Klasse
Ungestörte Böden	3	37	70	33	56	41-80
Gestörte Böden	5	30	189	159	99	81-120

Tab. 12 Nutzbare Feldkapazität der ungestörten und gestörten Waldbodenprofile auf den Schotterebenen in der Bodenregion Talböden. Die gestörten Böden wurden durch frühere Nutzungen, Umlagerungen, Aufschüttungen und oberflächlichen Auftrag von fremdem Material verändert.

Die Profile auf ungestörten Schotterflächen haben die nach MOSIMANN (2011) typischen geringen Speicherkapazitäten von 30 - 70 mm nFK. Mit der Ausnahme einer sehr trockenen Variante typischer Schotterstandorte, handelt es sich bei den gestörten Bodenprofilen um Standorte, die entweder von verschwemmten Hanglehmen oder von anthropogenen Aufschüttungen überprägt sind. Die nFK-Werte dieser Böden streuen stark und liegen zwischen 30 - 190 mm nFK. Eine Aussage zur Wasserspeicherefähigkeit der Aufschüttungsböden ist nicht möglich. Hierfür fehlt ein geeigneter Prädiktor, um die kleinräumig wechselnden Bodenverhältnisse der Aufschüttungsböden räumlich differenzieren zu können. In der Bodenregion Talböden beschränkt sich die Abschätzung der Wasserspeicherefähigkeit deshalb auf die weitgehend ungestörten Schotterareale. Die Aufschüttungsböden können mit Hilfe der Gesteinsklasse *Aufschüttung* in der geologischen Karte und der Waldgesellschaft *Wald auf Aufschüttung* (BURNAND & HASSPACHER 1999) räumlich näherungsweise abgegrenzt werden. Ein Schwellenwert von > 6 Grad Hangneigung dient ergänzend dazu die Randbereiche der Talböden im Übergang zu den Hängen zu erfassen. Diese sind häufig durch umgelagerte Hangsubstrate überprägt. Die kleinräumige Heterogenität der Böden verhindert hier eine Prognose der Wasserspeicherefähigkeit.

Auf den ungestörten Schotterarealen ist nach dem beschriebenen Kenntnisstand und auf Basis der vorliegenden Profilinformatoren eine nFK von 41 - 80 mm weit verbreitet. Eine weitere räumliche Differenzierung ist nur sehr eingeschränkt möglich. Auswertungen aus dem Lösshügelland und dem Jura lassen Rückschlüsse darauf zu, dass die trockenen Feuchtestufen gemäß Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften aussagekräftig für Standorte mit einer eingeschränkten Wasserversorgungssituation sind. Einen Hinweis auf diesen Zusammenhang liefert das Profil mit der geringsten nFK (30 mm), dessen Standort als einziger eine sehr trockene Feuchtestufe gemäß Waldgesellschaft aufweist. Die Feuchtestufen sehr trocken und trocken dienen im wissensbasierten Modell der näherungsweisen Erfassung von ungestörten Schotterarealen, auf denen in der Tendenz auch geringere nFK-Werte als 40 - 80 mm vorkommen können.

Weitere Erläuterungen erfolgen in der Ergebnisdiskussion. Das Modell für die Talböden umfasst rund 15 Klassifizierungsregeln für die Prognose von nFK und FK auf den ungestörten Schotterebenen.

5.2.5 Modellkonstruktion im Jura

Die Bodenregion Jura umfasst mit 92 % den Großteil der Waldfläche des Untersuchungsgebietes. Um die vielfältigen naturräumlichen Gegebenheiten im Tafel- und Faltenjura für die modellgestützte Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit erfassen zu können, ist eine detaillierte Aufgliederung der Entscheidungsbäume notwendig. Hierfür steht mit 110 Waldbodenprofilen eine begrenzte Stichprobe mit Angaben zur Wasserspeicherfähigkeit für die Modellierung zur Verfügung. Vor diesem Hintergrund muss in der Bodenregion Jura zunächst für jede der vielfältigen Prädiktorenkombinationen eine grundsätzliche Einstufung der Prognostizierbarkeit von Bodeneigenschaften durchgeführt werden. Nur wenn diese Bewertung positiv ausfällt, kann die Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit an den Endknoten der Entscheidungsbäume mit der in Kap. 2.3 u. 5.2.3 erläuterten Verfahrensweise erfolgen.

5.2.5.1 Prüfung der Prognostizierbarkeit von Prädiktorenkombinationen

In der Bodenregion Jura sind die Prognosen nur für wenige Prädiktorenkombinationen rein statistisch belegbar (ca. 10 %). Im Entscheidungsbaum steht jede Verästelung für eine bestimmte Prädiktorenkombination. Deshalb erfolgt für jede Modellposition eine Überprüfung, ob eine Prognose der Wasserspeicherfähigkeit, unabhängig von den Stichproben-
daten, überhaupt möglich ist. Dies geschieht mit den folgend angeführten Bewertungskriterien. Die Einstufung der einzelnen Kriterien beruht auf den vorhandenen Gelände-
kenntnissen und Kartiererfahrung sowie auf den Erkenntnissen aus vorangegangenen
wissensbasierten Modellierungen von Waldbodeneigenschaften im Tafel- und Faltenjura.

Kriterien für die Prüfung der Prognostizierbarkeit:

1. Gründigkeit:
Prüfung, ob für die Prädiktorenkombination von MOSIMANN ET AL. (2011) eine Gründigkeitsprognose ausgegeben wird oder ob keine Aussage möglich ist.
Auflistung von primärer und sekundärer Ausprägung sowie der Aussagesicherheit.
2. Skelettgehalt:
Prüfung, ob für die Prädiktorenkombination von MOSIMANN ET AL. (2011) eine Skelettgehaltsprognose ausgegeben wird oder ob keine Aussage möglich ist.
Auflistung von primärer und sekundärer Ausprägung sowie der Aussagesicherheit.
3. Beurteilung der Heterogenität der Bodenverhältnisse:
Abschätzung, ob aufgrund der vorliegenden Kombination der Standortfaktoren von einer kleinräumigen Variabilität der Bodenverhältnisse auszugehen ist.
Einstufung: homogen, kann variieren, sehr heterogen.
4. Aussagekraft der pflanzenökologischen Feuchtestufe:
Die Aussagekraft ist v.a. in den Randbereichen der Ökogramme gegeben (Kap. 4.3).
Einstufung: hoch, eingeschränkt, gering.

5. Vorhandensein von Deckschichten:

Abschätzung, ob über dem anstehenden Gestein periglaziale Deckschichten vorhanden sein können.

Einstufung: ja, weniger wahrscheinlich, nein.

Es wird eine Tabelle mit allen Prädiktorenkombinationen des Entscheidungsbaumes erstellt. Tab. 13 zeigt an Beispielen, wie die Bewertungskriterien für jede einzelne Modellposition eingestuft und dokumentiert werden. Für jede Prädiktorenkombination erfolgt eine Einstufung der Prognostizierbarkeit auf Grundlage der vorangegangenen Beurteilungen der einzelnen Prüfkriterien.

Modellposition	Prädiktoren / -kombination	n	Gründigkeitsprognose (cm)	Skelettgehaltsprognose (Vol.-%)	Beurteilung der Bodenverhältnisse	Aussagekraft der Feuchtestufe	Deckschichten möglich?	Einstufung der Prognostizierbarkeit
101	Schuttwald / Dist.Fels ≤150 m	1	20-60 / hoch / 60-100	>50 / hoch (für < 50m)	homogen	hoch	eher unwahrscheinlich	sicher prognostizierbar
202	Flache Scheitel auf Vollformen / G6,7 / FS2,3,4	-	Heterogenität zu groß	10-30 / eingeschränkt	können variieren	eingeschränkt	eher unwahrscheinlich	nicht prognostizierbar
302	Scheitel auf Plateau / G6,7	2	20-60 / eingeschränkt/ 0-20	> 50 / eingeschränkt/ 30-50	homogen	hoch	eher unwahrscheinlich	sicher prognostizierbar
310	Plateaubereich BR2 / G1,2 / FS3,4	4	60-100/eingeschränkt/ >100	1-10 / hoch 10-30	homogen	eingeschränkt	nein	sicher prognostizierbar
401b	Steilhang / kein Schuttwald / G6,7,11 / VDCN > 80 m	1	20-60 / hoch	>50 / hoch	können variieren	eingeschränkt	nein	weniger sicher prognostizierbar
416a	Normalhang / G6,7 / FS1	-	20-60 / eingeschränkt/ 60-100	30-50 / eingeschränkt	homogen	hoch	nein	sicher prognostizierbar
503a	Steile Tiefenlinie / G6,7 / FS1,2	-	20-60 / hoch / 60-100	30-50 / eingeschränkt	können variieren	eingeschränkt	ja	weniger sicher prognostizierbar

Tab. 13 Auszüge aus der Tabelle zur Einstufung der Prognostizierbarkeit von Prädiktorenkombinationen im Modellbereich Jura. Die vollständige Tabelle umfasst 148 Einstufungen. Die Angaben der Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen (Primäre Ausprägung / Aussagesicherheit / Sekundäre Ausprägung) entstammen den identischen Modellpositionen in den wissensbasierten Entscheidungsbäumen von MOSIMANN ET AL. (2011).

Bei der Beurteilung der Prognostizierbarkeit werden drei Einstufungen unterschieden:

1. Sicher prognostizierbar (25 % der Prädiktorenkombinationen).
2. Weniger sicher prognostizierbar (30 % der Prädiktorenkombinationen).
3. Nicht prognostizierbar (15 % der Prädiktorenkombinationen aus inhaltlichen Gründen, 30 % der Prädiktorenkombinationen aus technischen Gründen).

Sicher prognostizierbar sind diejenigen Prädiktorenkombinationen, für die Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen vorliegen, für die aufgrund der Faktorenkombinationen am Standort homogene Bodenverhältnisse angenommen werden können, für die die Aussagekraft der Feuchtestufen hoch ist und Deckschichten in den Hängen ausgeschlossen werden können (z.B. sehr trockene Normalhangbereiche auf Kalkstein, ebene Plateaubereiche mit hoher Feuchtestufe). Diese Fälle bilden in den Entscheidungsbäumen die Minderheit. Am häufigsten treten Prädiktorenkombinationen auf, bei denen zumindest ein Kriterium mit einer eingeschränkten Aussagekraft eingestuft wird. In diesen Fällen bleibt die Prognostizierbarkeit sicher, solange nicht die Bodenverhältnisse als variabel eingestuft werden. Bei variablen Bodenverhältnissen oder mehr als einer unsicheren Beurteilung eines Prüfkriteriums, ist die Prädiktorenkombination weniger sicher prognostizierbar. Die Ergebnisse der häufigkeitsstatistischen Analysen, der PTF, Informationen zu einzelnen Bodenprofilen und vorhandenes Erfahrungswissen werden herangezogen um über die Prognostizierbarkeit zu entscheiden (Kap. 5.2.3).

Fehlende Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen, sehr heterogene Bodenverhältnisse sowie eine oder mehrere negative Bewertungen der Prüfkriterien sind die maßgeblichen inhaltlichen Gründe für die Einstufung *nicht prognostizierbar*. Weitere Gründe bestehen vor allem in unscharfen oder fehlenden Informationen zu den Standortfaktoren (z.B. stratigraphische Gesteinstypen, die petrographisch nicht zuordbar sind oder fehlende Angaben zu den Feuchtestufen) sowie in unplausiblen Prädiktorenkombinationen (z.B. Löss im Steilhang). Standortbedingungen für die keine Prognosen zur Wasserspeicherfähigkeit möglich sind, werden in den Ergebniskarten unter Angabe der Ursache (z.B. Heterogenität zu groß, Prädiktor unplausibel) gesondert ausgewiesen (siehe Karte auf Abb. 27).

5.2.5.2 Abschätzung und kritische Betrachtung fehlender Wasserspeicherfähigkeitswerte an den Endknoten der Entscheidungsbäume

An 25 Positionen mit Prädiktorenkombinationen, die in der vorangegangenen Überprüfung als prognostizierbar eingestuft wurden, fehlen im Entscheidungsbaum belastbare Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit. Diese entsprechen einem Waldflächenanteil von rund 12 %. Für diese Modellpositionen erfolgt die Abschätzung des Wasserspeichervermögens nach AD-HOC-AG BODEN (2005) und HERBST & MOSIMANN (2008) in Abhängigkeit von:

- Bodenarten differenziert nach petrographischen Gesteinstypen,
- Annahme einer mittleren Trockenrohdichte,
- Einbezug von klassifizierten Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen.

Die rechnerische Abschätzung erfolgt mit der in Kap 2.2.3 angeführten Pedotransferfunktion. Aus den Ergebnissen ergibt sich ein klassifiziertes Wertespektrum der nFK und FK, in welchem sich das Wasserspeichervermögen für die jeweiligen Modellpositionen gemäß PTF bewegt. Die fehlenden Informationen zur Wasserspeicherfähigkeit an den Endknoten können so näherungsweise abgeschätzt werden.

Die Ableitungen bodenphysikalischer Kenngrößen nach AD-HOC-AG BODEN (2005) basieren auf Erhebungen landwirtschaftlich genutzter Böden. Nach GAUER ET AL. (2011) ist die Verwendung dieser Kennwerte bei der Abschätzung bodenhydraulischer Merkmale von Waldböden mit Unsicherheiten verbunden. Auch TEEPE ET AL. (2003) sehen die bisherige Abschätzung als mangelhaft an. Allerdings handelt es sich hierbei um eine generalisierte PTF, deren Entwicklung auf einer sehr breiten Datengrundlage gründet. Damit werden für Waldstandorte typische Wertebereiche der Eingangsgrößen mit eingeschlossen. HANGEN & SCHERZER (2004) halten eine Verwendung dieser PTF für Waldböden grundsätzlich für möglich. Dies bestätigen die Ergebnisse von HANGEN (2009). Eine Validierung verschiedener PTF zur Ableitung der nFK von Forststandorten hat dort für die PTF nach AD-HOC-AG BODEN (2005) die höchste Schätzgenauigkeit ergeben. RUSS & RIEK (2011) validieren unterschiedliche PTF zur Ableitung der nFK beispielhaft für Waldböden des norddeutschen Tieflands. Die Ergebnisse zeigen u.a., dass die PTF nach RINGER ET AL. (2008) den geringsten Fehler unter den verglichenen Verfahren ergibt. Dabei gilt es aber zu berücksichtigen, dass die Validierungsstichprobe überwiegend aus sandigen Waldböden besteht.

RINGER ET AL. (2008) weisen darauf hin, dass die Festlegung der FK bei einem einheitlichen pF-Wert von 1,8 zu Über- und Unterschätzung der Kennwerte der Wasserbindung führt. Deshalb empfehlen sie, für die Ermittlung der FK-Werte nach AD-HOC-AG BODEN (2005) zukünftig das Feuchtigkeitsäquivalent nach VETTERLEIN (1983) zu verwenden. Die Differenz der so neu ermittelten FK und nFK-Werte beträgt bei den Bodenarten allerdings nur wenige Volumenprozent. Auf die Integration dieses Ansatzes bei der Verwendung der PTF nach AD-HOC-AG BODEN (2005) wird deshalb verzichtet. Die Unschärfe der in dieser Arbeit verwendeten Eingangsdaten lassen eine exakte Ermittlung von nFK- und FK-Werten mit der PTF nicht zu (Kap. 2.2.3 u. 4.4). Deshalb werden klassifizierte Wertebereiche des Wasserspeichervermögens ausgewiesen. Mit der Klassifikation der abgeschätzten Wertebereiche von nFK und FK geht ein Informationsverlust einher (Kap. 2.4). Diese quantitative Unschärfe der Abschätzung ist größer als die Wertekorrekturen, die sich für die nFK und FK nach RINGER ET AL. (2008) ergeben würden. Die Implementierung würde damit im vorliegenden Fall zu keiner maßgeblichen Verbesserung der Schätzergebnisse führen.

Der Fehlereinfluss durch die klassifizierte Gründigkeits- und Skelettgehaltsangaben fällt dagegen deutlich höher aus. Auch MOSIMANN (2011) weist darauf hin, dass die standörtliche Differenzierung des Wasserspeichervermögens im Jura nicht entscheidend von der Bodenart abhängt, sondern primär von der Gründigkeit und dem Skelettgehalt. Im Jura liegen fast alle Böden im Bereich nicht sehr stark variierender Lehme. Aus der Verwendung von Bodenarten, differenziert nach petrographischen Gesteinstypen und Tiefenbereichen, und aus der Annahme einer mittleren Trockenrohddichte resultieren Unschärfen hinsichtlich der zugrunde gelegten Mittelporenanteile bei der Berechnung der Wasserspeicherfähigkeit. Die

quantitative Ungenauigkeit ist aber im Vergleich zum Fehlereinfluss der Gründigkeits- und Skelettgehaltsprognosen auf das Abschätzungsergebnis des Wasserspeichervermögens vernachlässigbar (HERBST & MOSIMANN 2008). Trotz der diskutierten Ungenauigkeiten ist diese Verfahrensweise zur Abschätzung fehlender Wasserspeicherfähigkeitswerte im Rahmen der wissensbasierten Modellierung vertretbar. Denn die mittels PTF abgeschätzten Wertespektren für die nFK und FK werden in der Modellentwicklung dazu verwendet, die relativen Unterschiede der Wasserversorgungssituation für die Standortbedingungen abzubilden, für die sonst keine Informationen zum Wasserspeichervermögen vorliegen. Die Ergebnisse der PTF dienen zur Ergänzung der Wissensbasis der Modellierung. Es werden keine einzelnen nFK-Werte als Prognose ausgewiesen, sondern es erfolgt die empirische Abschätzung eines klassifizierten Wertespektrums der Wasserspeicherfähigkeit in Kombination mit dem vorhandenen Erfahrungswissen (Kap. 5.2.3).

5.3 Überprüfung der ersten Modellprognosen im Gelände und Modellanpassung

Mit der in Kap. 2.6 beschriebenen technischen Modellumsetzung wurden zunächst vorläufige Prognosekarten erstellt. Die Kontrolle der ersten Modellergebnisse zeigte in verschiedenen Bereichen des Untersuchungsgebietes prognostizierte nFK-Werte die aufgrund der Standort-situationen fraglich erschienen. Desweiteren wurden auch Grenzverläufe und Verteilungsmuster der Wasserspeicherfähigkeit festgestellt, die im Kontext der bekannten Relief- und Substratvariationen bisher unbekannt waren oder nicht erwartungsgemäß ausfielen. Diese Modellierungsergebnisse können nicht losgelöst von eigenen Feldaufnahmen und Felderfahrungen beurteilt und gegebenenfalls angepasst werden. Aus diesem Grund wurde eine Feldkartierung zur Überprüfung und Bewertung der ersten Modellvorhersagen durchgeführt.

5.3.1 Datenerhebung und Feldbegehung

Wegen des großen Aufwandes können für die Überprüfung der vorläufigen Modellprognosen keine neuen Bodenprofile im Gelände angelegt werden. Deshalb erfolgt eine Kontrolle der vorläufigen Modellprognosen stichprobenartig mit dem Bohrstock (Abb. 23). Jeder Standort wird mit GPS erfasst. Bohrungen mit dem Edelmanbohrer an mehreren Positionen dienen zur Bestimmung des Ausgangssubstrates der Bodenbildung sowie zur Abschätzung von Gründigkeit und Skelettgehalt. Über die Eindringtiefe und den Steingehalt sind keine genauen Angaben zur Wasserspeicherfähigkeit ableitbar. Die Böden mit geringem Wasserspeichervermögen lassen sich mit dem Bohrstock aber mit ausreichender Sicherheit über geringe Eindringtiefen und hohe Steingehalte identifizieren. Wenn möglich werden Wegböschungen für die Beurteilung der Substratbedingungen berücksichtigt. Zudem erfolgt die Erfassung wichtiger Standortbedingungen (z.B. Reliefform, Neigung, Wölbung, Waldgesellschaft). Das methodische Vorgehen orientiert sich grundsätzlich an AKS (2003) und AD-HOC-AG BODEN (2005).

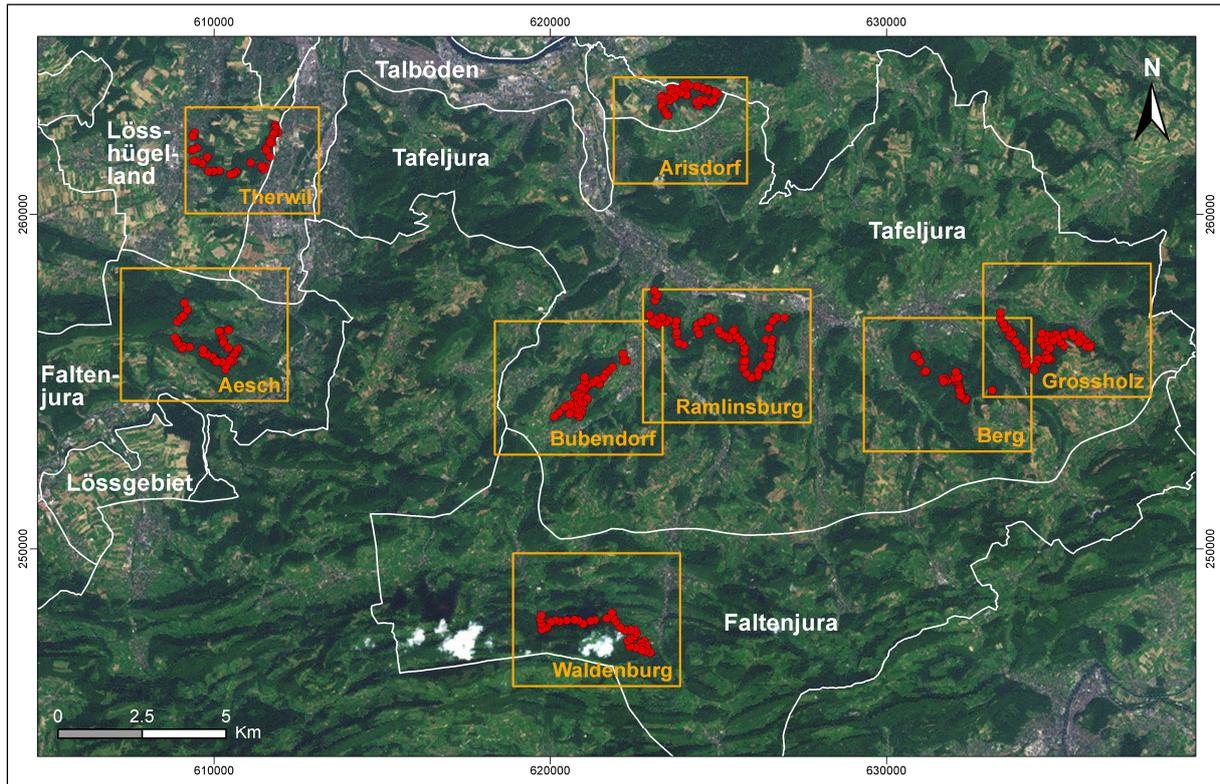


Abb. 23 Lage der Kartiergebiete und der Bohrpunkte der Feldkartierung im Kanton Baselland (n = 321).
Quelle der Luftbilder: World Imagery Map Service von ESRI (2011).

Die Auswahl der Kartiergebiete orientiert sich an der Repräsentativität der dort vorherrschenden Standortbedingungen für die jeweilige Bodenregion und an der Erfassung der Bereiche, die nach der Betrachtung der Zwischenergebnisse problematisch erscheinen. Hierzu zählen vor allem fragliche Grenzen der Prognosen, markante Grenzen von Relief- und Deckschichtenverbreitung, großflächige Prognosen sehr geringer Wasserspeicherkapazität (n_{FK} -Werte ≤ 40 mm) sowie Standortbedingungen, für die bisher wenige Informationen zu den Bodenverhältnissen vorlagen. Abb. 23 zeigt die Lage der acht Gebiete verteilt auf die Bodenregionen Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura. Insgesamt wurden rund 320 Kartierpunkte (rote Markierungen) aufgenommen.

Auf Grundlage der Kartierungsergebnisse konnten für rund 20 Modellpositionen Korrekturen vorgenommen oder unsichere Modellvorhersagen durch die Feldbefunde bestätigt werden. Die Prüfung von Grenzverläufen bei markanten Wechsels der n_{FK} -Werte und von Möglichkeiten zur Verbesserung der Abbildung von Standorten mit geringer Wasserspeicherkapazität haben dabei die wichtigsten Erkenntnisse für die Modellierung geliefert. Sie werden deshalb im Folgenden angeführt und erläutert.

5.3.2 Prüfung von Grenzverläufen bei markanten Wechseln der prognostizierten Wasserspeicherfähigkeit

In den vorläufigen Prognosekarten wurden verschiedene Grenzen mit markanten Wechseln der prognostizierten Wasserspeicherfähigkeit festgestellt. Abb. 24 veranschaulicht ein typisches Beispiel anhand eines Kartenausschnittes im Tafeljura westlich von Bubendorf.

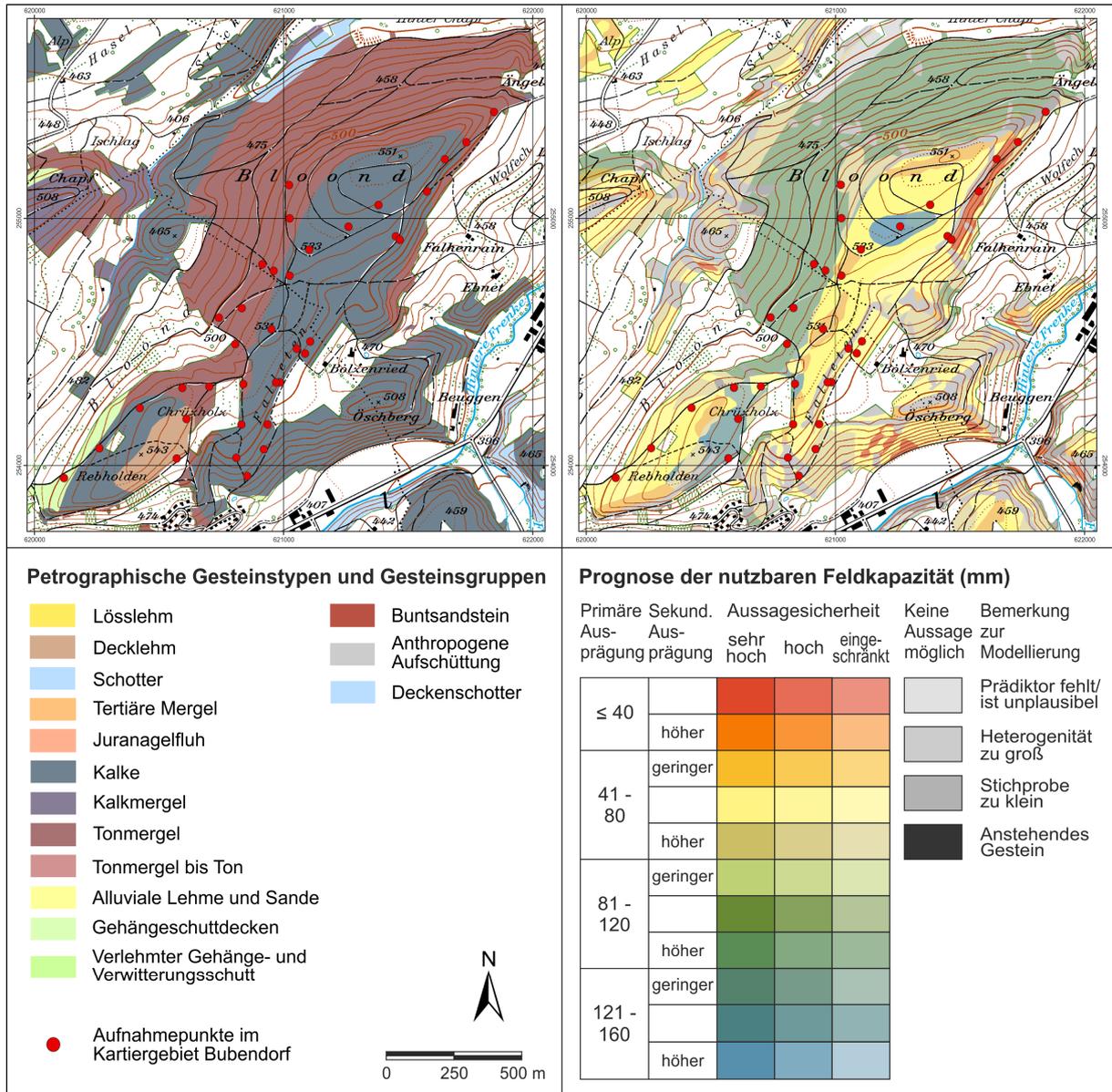


Abb. 24 Gegenüberstellung von markanten Grenzverläufen in der Gesteinstypenkarte und der Modellprognose der nutzbaren Feldkapazität für einen Kartenausschnitt im Tafeljura westlich von Bubendorf.

Der abrupte Wechsel von geringer (gelblich) zu hoher prognostizierter nFK (grünlich) tritt v.a. an den Grenzverläufen zwischen Kalken und Tonmergeln in der geologischen Karte auf. Bereits BISCHOFF (2011) und WESSELS (2012) haben während ihrer Kartierungen in der Region festgestellt, dass diese scharfen Grenzen im Gelände zumeist nicht erkennbar sind. Dies gilt auch für das Gebiet *Bloond*. Die Feldaufnahme (rote Punkte) zeigt, dass weder in den Hängen noch im Kuppenbereich die Grenzverläufe anhand der Substrate nach-

vollziehbar sind. Mit wenigen Ausnahmen ist das Gebiet von unterschiedlich skeletthaltigen Hangschutten und -lehmen geprägt. Zumeist wird der anstehende Tonmergel (Wildeg-Formation) von diesen Deckschichten überlagert. Desweiteren zeigt sich in diesem Gebiet ein Prädiktorenproblem hinsichtlich der petrographischen Charakterisierung der Tonmergelschichten. Die Wildeg-Formation enthält in ihrer Abfolge neben mergeligen Schichten auch Kalkmergel. Diese kommen im Kartiergebiet verbreitet vor (Kartenausschnitt auf Abb. 24). Damit ist hier die petrographische Zusammensetzung der Wildeg-Formation ähnlich der des angrenzenden Kalks. Für die Modellierung wurde aber die mergelige (tonige) Variante der Wildeg-Formation angenommen. Die Kartierung hat ergeben, dass das Modell in diesem Gebiet dadurch tendenziell zu hohe Wasserspeichervermögen für die Böden auf Tonmergel gemäß geologischer Information ausweist. In anderen Fällen sind die Grenzen im Gelände hingegen nachvollziehbar. Dies gilt vor allem für die Tafeljurahochflächen im östlichen Teil des Kantons. Der Kartenausschnitt auf Abb. 18 (Kap. 4.2) zeigt ein solches Beispiel. Auf den Plateaus ist der Substratwechsel vom Tonmergel zum Kalk auf wenigen Metern Distanz anhand der sprunghaften Abnahme der Gründigkeit und eines rapiden Anstiegs des Skelettgehalts erkennbar. Dies gilt solange der Grenzverlauf in flachen Mulden auf den Plateaus nicht von Decklehmen überlagert wird. Die modellierten Wechsel der Speichervermögen von hohen zu niedrigen Werten sind plausibel.

Abb. 25 stellt das Ergebnis der Feldaufnahme im Faltenjura beispielhaft anhand der Substratsituation am *Schällenberg* bei Waldenburg dar. Die Grenze zwischen dem Tonmergel und dem darüber liegenden Kalk wird in den Hängen fast immer von Hangschutten oder -lehmen überlagert.

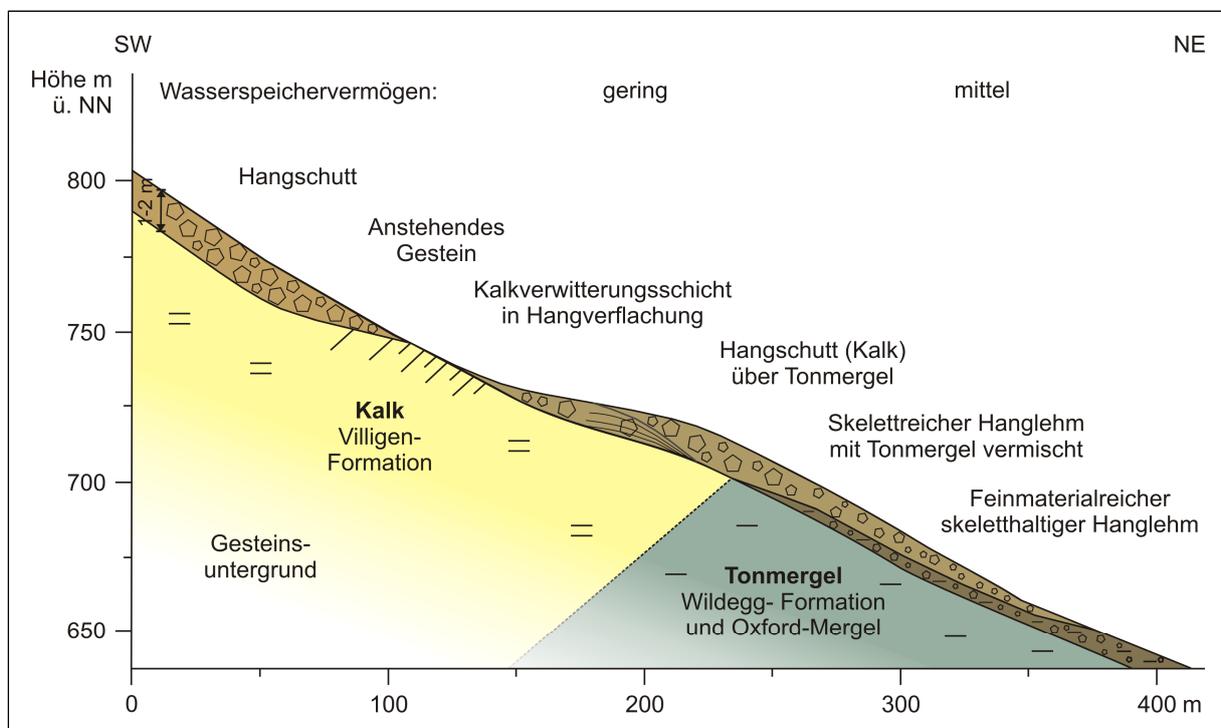


Abb. 25 Vereinfachter Profilschnitt der Substratsituation am Schällenberg (Gebiet Waldenburg, Faltenjura). Die Mächtigkeit der Deckschicht wird in der Grafik stark überhöht dargestellt. Sie beträgt etwa 1 - 2 m.

Dabei nimmt der Skelettgehalt der Deckschichten mit zunehmender Distanz zum anstehenden Kalk tendenziell ab und die Mächtigkeit wird mit steigender Hangneigung geringer. Über dem Tonmergel kommt es zu einer Durchmischung der Substrate, so dass die Lehme der unteren Hangbereiche feinmaterialreicher sind. Das Wasserspeichervermögen ist im Bereich der Hänge auf Kalk entsprechend gering. Die Prognosen geringer Speicherfähigkeit sind im Gelände nachvollziehbar. Im Grenzbereich zum Tonmergel fällt die Prognose zu hoch aus. Erst im unteren Hangbereich stimmt die modellierte mittlere Speicherfähigkeit in etwa mit den realen Bedingungen überein.

Insgesamt hat die Kartierung ergeben, dass bei den Tonmergeln in den Hangbereichen eine Modellanpassung erfolgen muss. Durch die weit verbreiteten Hangschutte und -lehme fällt die Einstufung der Wasserspeicherfähigkeit zu hoch aus, sobald Kalke oberhalb der Tonmergel im Hang anstehen. Es zeigt sich deutlich, dass die Erfassung von Nachbarschaftsbeziehungen in der Abfolge der Gesteinstypen in Gefällerrichtung zu einer Verbesserung der Prognose führen würde.

5.3.3 Differenziertere Abbildung von Standorten mit geringen Wasserspeicherfähigkeitswerten

Im unteren Wertespektrum der Wasserspeicherfähigkeit ist die Genauigkeit des Modells von großer Bedeutung. Für weiterführende Modellierungen (z.B. Trockenstressrisiko) haben vor allem Waldflächen mit sehr geringer Wasserspeicherfähigkeit eine große Bedeutung (WESSELS 2012). Ein Schwerpunkt der Kartierung lag deshalb in der Prüfung von Arealen mit sehr geringer prognostizierter Speicherfähigkeit.

Die Flächenanteile der Standorte mit sehr geringer Speicherfähigkeit ($nFK \leq 40$ mm) sind auf den Plateaus stark begrenzt (z.B. Scheitel auf Plateaus, Übergangsbereiche zu den Hangkanten, Plateauränder ohne Decklehme, oberhalb von Felsbändern). Decklehmreste und lokale Kalkverwitterungsschichten sorgen auf dem größten Teil der Hochflächen für eine Mächtigkeit an Feinmaterial, die zu nFK -Werten über 40 mm führt. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Kartierung (Abb. 26). Nur für 13 % der Kartierpunkte auf den Plateaus wurde im Gelände ein sehr geringes Speichervermögen für pflanzenverfügbares Wasser festgestellt. Die Feldbeobachtungen zeigen insgesamt, dass auf einem hohen Flächenanteil im Kalk eine nFK von 40 - 80 mm deutlich wahrscheinlicher ist als eine nFK unter 40 mm. Dies gilt auf den Plateaus auch für Waldgesellschaften mit pflanzenökologischer Feuchtestufe *sehr trocken*. Über die Prädiktoren ist somit keine weitere Differenzierung mehr möglich. Damit ist eine Prognose der nFK unter 40 mm auf den Plateaus abzulehnen.

In den Hangbereichen hat die Geländebegehung gezeigt, dass niedrige Einstufungen der nFK nur in steilen und/oder stark konvex gewölbten Bereichen zutreffend sind. Die pflanzenökologischen Feuchtestufen sind nur in der Stufe *sehr trocken* als hinreichender Prädiktor für Standorte mit sehr wenig pflanzenverfügbarem Wasser geeignet. Die Kombination der Prädiktoren Relief, Gestein und Feuchtestufen hat sich als unzureichend erwiesen, um die Hangbereiche mit sehr geringer Speicherfähigkeit im Modell sicher abzubilden.

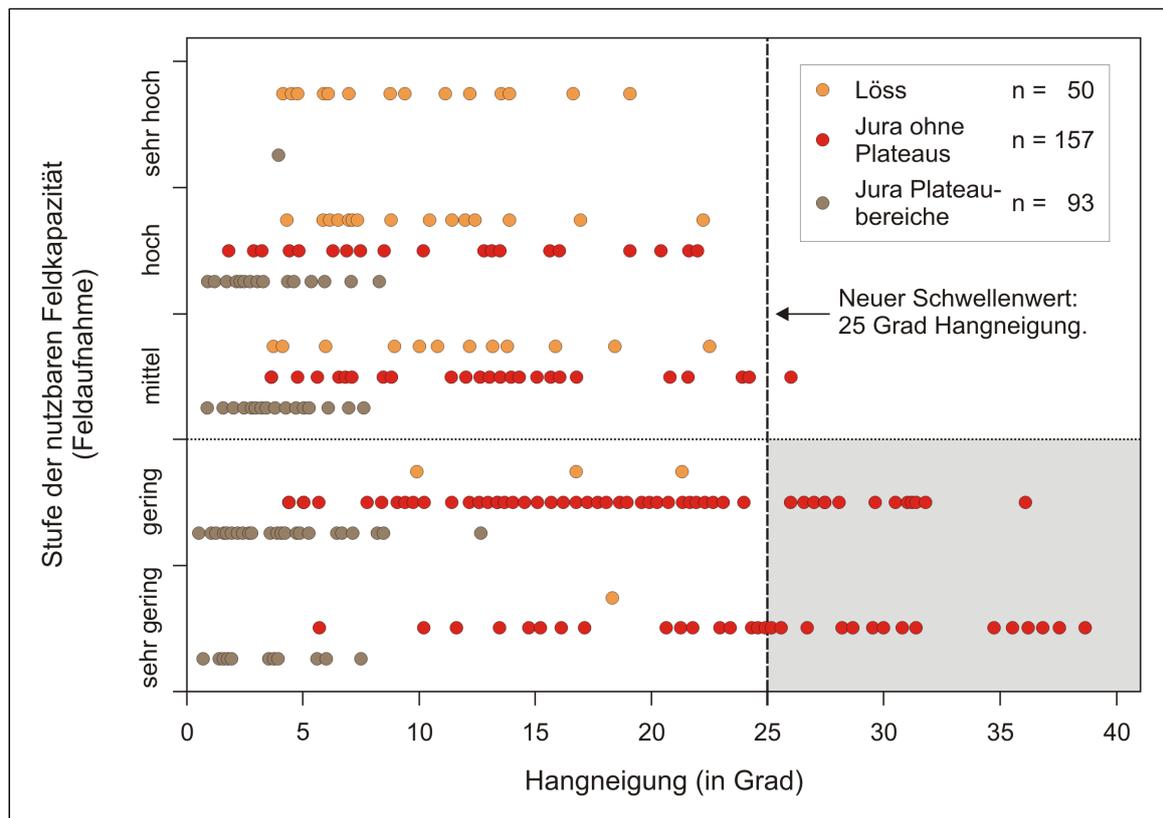


Abb. 26 Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der nFK (Abschätzung im Feld). Die Auswertung basiert auf 300 Kartierpunkten. Die vertikale gestrichelte Linie markiert den Schwellenwert von > 25 Grad Neigung zur Abgrenzung der Standorte mit geringem Wasserspeichervermögen.

Eine bessere Annäherung bringt die Kombination dieser Prädiktoren mit der Hangneigung. Damit lassen sich die weniger weitverbreiteten Standorte sehr geringer Speicherfähigkeit von den Hangbereichen mit eingeschränktem bis mittlerem Speichervermögen besser abgrenzen. Ein Schwellenwert der Hangneigung von 25 Grad verbessert die Abgrenzung von Standorten mit geringer und sehr geringer Wasserspeicherfähigkeit (grauer Hintergrund). Beträgt der Häufigkeitsanteil der Standorte mit sehr geringem Speichervermögen in Hangbereichen mit Neigungen < 25 Grad nur 13 %, so sind es bei Neigungen > 25 Grad rund 55 %. Der Anteil der Fälle mit geringer Speicherfähigkeit steigt von 27 % auf 45 %. Mit einer Ausnahme weisen bei Neigungen > 25 Grad alle Fälle ein geringes Wasserspeichervermögen unter 80 mm auf. Die Integration dieses Schwellenwertes bei den Kalken, Kalk- und Tonmergeln und die Kombination mit der Feuchtestufe *sehr trocken* als ergänzendem Prädiktor, verbessert die weitere Differenzierung der Normalhänge in Hangbereiche mit sehr geringem und geringem Wasserspeichervermögen deutlich.

Neben den angeführten Anpassungen ermöglichte die Feldaufnahme weitere wichtige Prädiktor- und Modellkorrekturen. So konnten beispielsweise Informationen zur Substratsituation von Plateaubereichen auf Juranagelfluh ergänzt werden. Weitere Decklehminseln wurden erfasst und Lagefehler in der geologischen Karte konnten korrigiert werden. Nach diesen Modellkorrekturen und -kalibrierungen erfolgt die finale Prognose.

5.4 Die Karten der Wasserspeicherfähigkeit als Ergebnis der wissensbasierten Modellierung

Die Ergebnisse der wissensbasierten Modellierung werden am Beispiel der nFK vorgestellt. Die räumlichen Verteilungsmuster der Prognosen von nFK und FK sind nahezu identisch. Die Struktur der Entscheidungs bäume von nFK und FK stimmt überein und die Ausweisung der Prognosen basiert auf denselben Prädiktorinformationen.

5.4.1 Übersicht zur Gesamtkarte

Abb. 27 stellt die Prognose der nFK für die Wälder der Kantone Baselland und Basel-Stadt dar. Die dazugehörige Legende wird in der Abb. 28 angeführt. Die Karte liefert für jedes Waldareal Informationen zu:

1. Prognostizierte Klasse der nFK, primäre Ausprägung.
2. Wenn möglich: Prognostizierte Klasse der nFK, sekundäre Ausprägung. Angabe einer Tendenz zu höheren oder geringeren Werten der nFK.
3. Aussagesicherheit: Einstufung auf Grundlage vorhandener Stichproben, Plausibilitätsprüfung der Prädiktorenkombination und Felderfahrung.
4. Bei Arealen ohne Aussage: Angabe des Grundes (z.B. Heterogenität zu groß, Stichprobe zu klein, Prädiktorenkombination unplausibel).

Bereiche mit hoher nFK (blau) finden sich weit verbreitet in den Ausläufern des Sundgauer Lösshügellandes, im Laufener Becken und in der Region um Arisdorf und Giebenach. Damit gibt die Karte die Lage der riss- und würmzeitlichen Löss über die hohen nFK-Werte erwartungsgemäß deutlich wieder. Die Dominanz von Flächen mit geringer nFK (blassgelb) auf den Plateauflächen und Hängen, charakterisieren den Tafeljura. Im Untersuchungsgebiet stocken laut Prognose rund 50 % der Wälder auf diesen Böden mit geringer nFK (Abb. 29). Sehr geringe nFK (rötlich) beschränkt sich weitgehend auf steilere Hanglagen und Standorte, die durch Schuttlieferungen aus Felsbändern beeinflusst sind. Größere Areale mit mittlerer nFK (grünlich) zeigen die Lagen der Tonmergel und Tone in den flacheren Hangbereichen und auf den Plateaus. Markante Wechsel der prognostizierten nFK von geringen (blassgelb) zu hohen Werten (bläulich) fallen auf den Tafeljurahochflächen mit der Verbreitung der 0,5 - 2 m mächtigen Decklehme zusammen.

Im Faltenjura zeigt die Karte einen deutlich höheren Anteil an Arealen mit sehr geringer nFK (rötlich). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Böden der Schuttwälder auf Steilhängen, in steileren Normalhängen (Neigungen über 25 Grad) und in Hanglagen im Einflussbereich von Felsbändern in der Regel skelettreich und flachgründig sind. Diese Standortbedingungen treten im Faltenjura häufig auf. Im Kontrast dazu werden für die Tonmergel in den unteren und flacheren Hangbereichen weit verbreitet mittlere Werte der nFK ausgewiesen (grünlich).

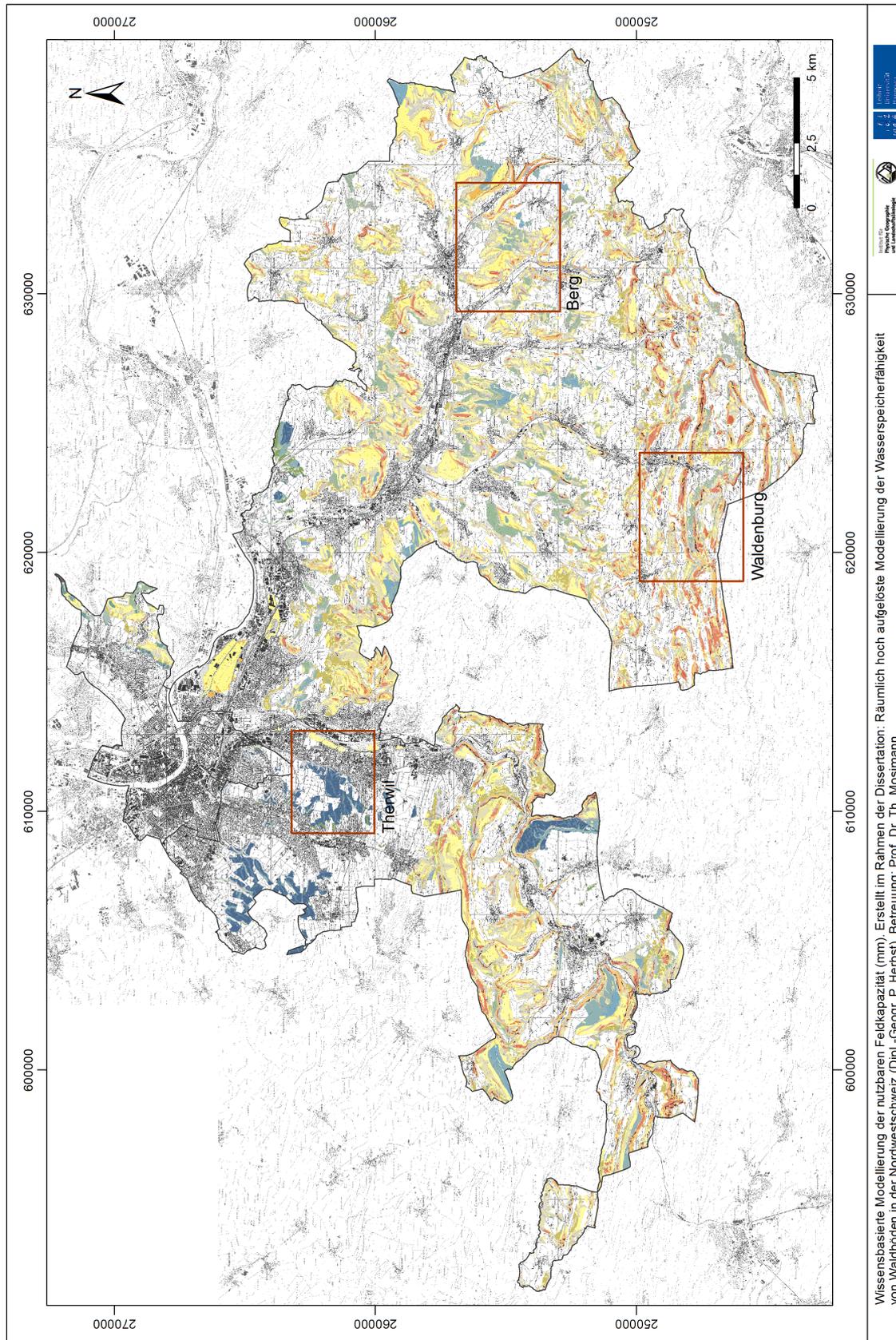


Abb. 27 Ergebniskarte der wissensbasierten Prognose der nutzbaren Feldkapazität der Waldböden in den Kantonen BL und BS. Die Legende wird auf der folgenden Seite dargestellt (Abb. 28). Die roten Rahmen markieren die Lage der Kartenausschnitte der Abb. 31 u. 32. Die Gesamtkarte kann im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html in hoher Auflösung betrachtet werden. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000 (swisstopo).

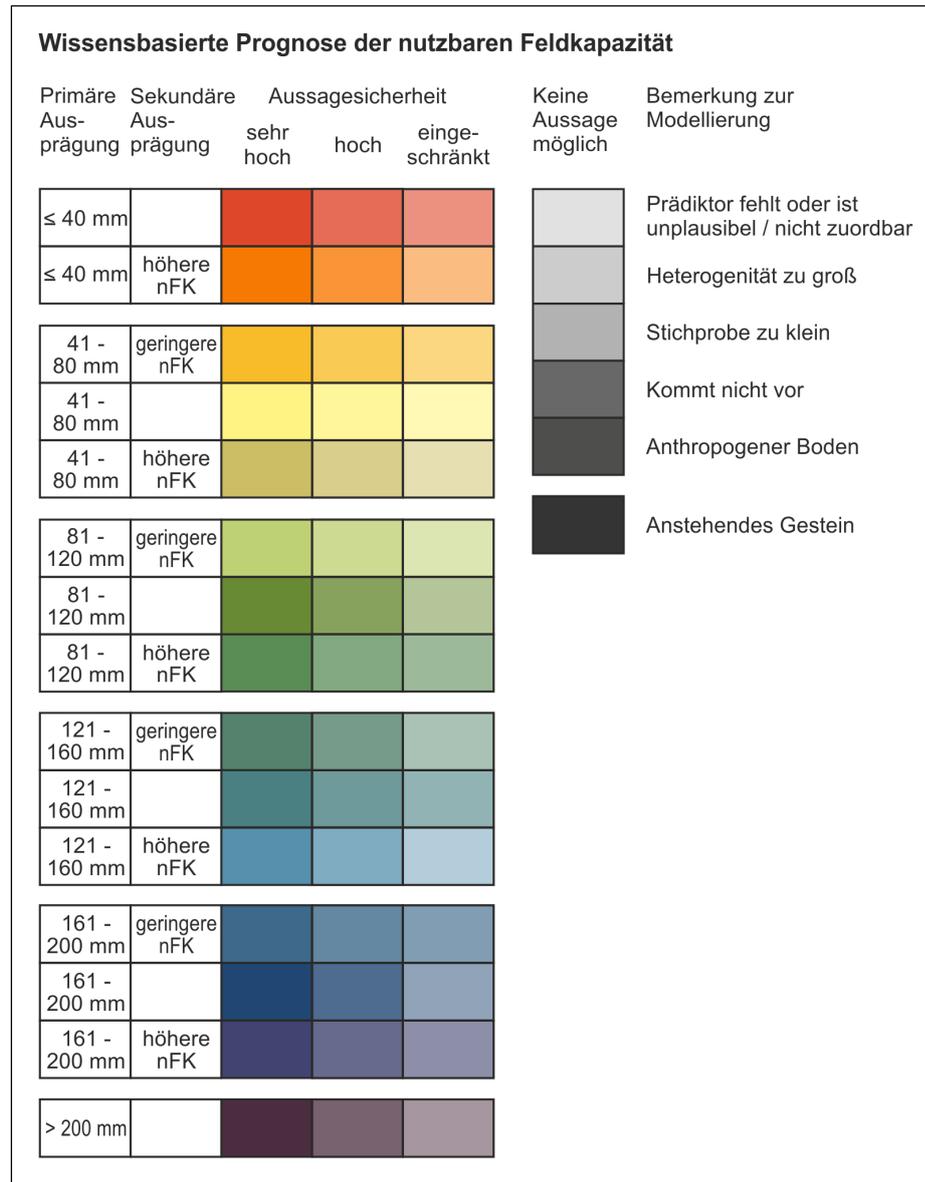


Abb. 28
Legende
der Ergebniskarten
der wissensbasierten
Modellierung der
nutzbaren Feld-
kapazität.

Abb. 29 zeigt die Waldflächenanteile der nFK-Klassen der wissensbasierten Modellierung für das ganze Untersuchungsgebiet (rund 204 km²). Die Bilanzierung zeigt deutlich die Dominanz der Waldböden im Untersuchungsgebiet, die laut Modellprognose eine geringe Wasserspeicherefähigkeit aufweisen. nFK-Werte unter 80 mm haben einen Anteil von rund 60 % an der gesamten Waldfläche. Hingegen weisen nur 15 % der übrigen Waldflächen mittlere bis sehr hohe nFK-Werte als Prognose auf. Für rund 25 % der Waldfläche ist keine Aussage zur Wasserspeicherefähigkeit möglich.

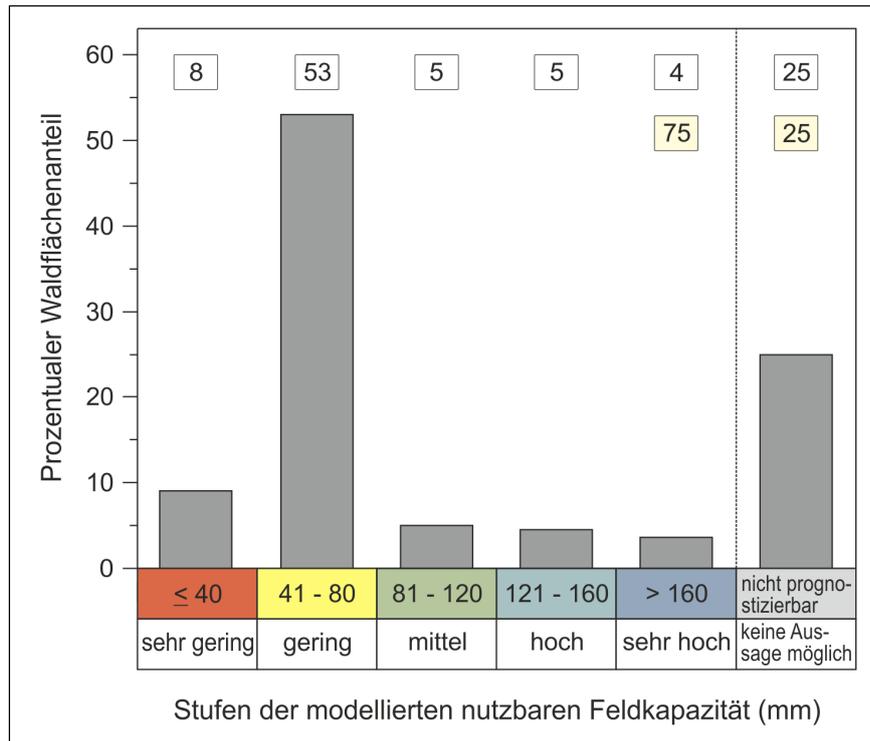


Abb. 29
Flächenanteile
der wissensbasiert
prognostizierten Stufen
nutzbarer Feldkapazität.
In den weißen Feldern stehen
die prozentualen Flächen-
anteile der einzelnen Klassen.
Die hellgelb hinterlegten Felder
geben den prozentualen Anteil
der prognostizierbaren und
der nicht prognostizierbaren
Waldflächen an.
Die gesamte Waldfläche
umfasst rund 204 km².

5.4.2 Prognose der nFK in den drei Bodenregionen

Abb. 30 schlüsselt die Flächenbilanzierung der modellierten nFK nach Bodenregionen auf. Die Unterschiede in den drei Modellregionen werden dabei sehr deutlich. Im Lösshügelland weist der überwiegende Teil der Waldfläche erwartungsgemäß eine sehr hohe nFK (> 160 mm) auf. Eine hohe und mittlere nFK wird für rund ein Fünftel der Waldfläche modelliert. Der Anteil geringer und sehr geringer nFK beträgt weniger als 1 %. Insgesamt sind über 80 % der Waldfläche wissensbasiert prognostizierbar.

Im Gegensatz dazu dominieren im Tafel- und Faltenjura die Flächen sehr geringer und geringer nFK. Nur jeweils ca. 5 % der Waldareale weisen Böden mit mittlerer oder hoher nFK auf. Deren Auftreten hängt mit Standortbedingungen zusammen, die im Jura nur in begrenztem Ausmaß vorkommen. Hierzu zählen im Wesentlichen die Verbreitung mächtiger Decklehme sowie anstehender Tonmergel auf den Plateaus und Hangverflachungen, Hangfüße und Muldentäler mit akkumulierten Verwitterungslehmen oder anstehenden Tonmergeln und Tonen. Ein Viertel der Waldfläche im Jura lässt keine belastbare Aussage zur Wasserspeicherefähigkeit zu.

Auf der sehr kleinen Waldfläche der Talböden (4 km²) weisen die Böden auf den weitgehend ungestörten Schotterarealen einheitlich eine geringe Wasserspeicherefähigkeit auf (41 - 80 mm nFK). Auf rund 40 % der Schotterflächen sind die Böden durch den Auftrag von Fremdmaterial überprägt. Für diese Aufschüttungsböden ist aufgrund der zu hohen Heterogenität der Bodenverhältnisse derzeit noch keine Aussage zur Wasserspeicherefähigkeit möglich.

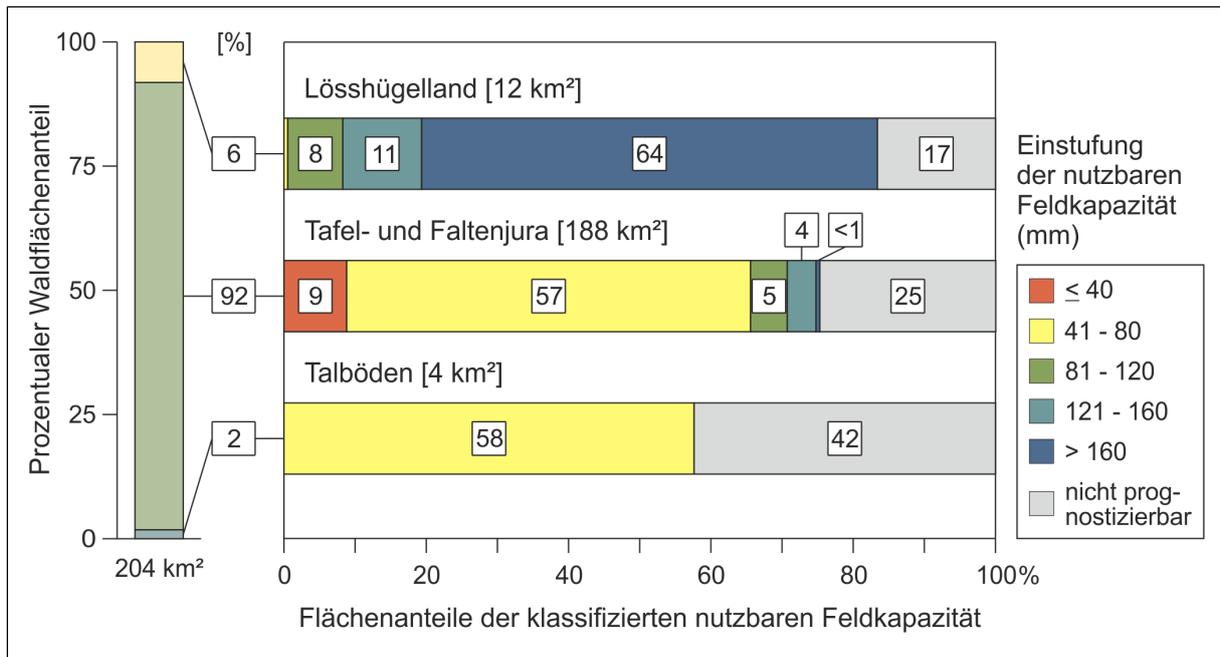


Abb. 30 Flächenbilanzen der wissenschaftlich prognostizierten nutzbaren Feldkapazität in den Bodenregionen. Die Flächenbilanzen der Feldkapazität weichen nur um wenige Prozent von den Ergebnissen der nFK ab und werden im Anhang dokumentiert. In der Bodenregion Talböden sind von Deckschichten überprägte Schotterareale weit verbreitet. Für Böden auf Aufschüttungen ist derzeit noch keine Vorhersage der nFK möglich. Der Flächenanteil für den keine Aussage möglich ist, fällt deshalb bei den Talböden hoch aus.

Beispielgebiet aus dem Lösshügelland (Hinteres Bruderholz)

Eine typische Differenzierung der nFK für das Lösshügelland zeigt der Kartenausschnitt für das hintere Bruderholz östlich von Therwil (Abb. 31). Auf der hügeligen, durch flache Rücken und Mulden gegliederten Hochfläche, überwiegen aufgrund von mehreren Metern mächtigen Lössablagerungen die Waldböden mit sehr hoher nFK (dunkelblau). Ihr Flächenanteil beträgt im dargestellten Ausschnitt über 60 % (Abb. 33). Divergente Abflussbedingungen und die konvexe Oberflächenstruktur begünstigen in den Divergenzbereichen die Erosion von Feinmaterial über dem tertiären Untergrund. Dies führt zu einer Verringerung des Feinbodenvolumens über dem Festgestein, weshalb die primär hohe Wasserspeicherfähigkeit der Lössböden auf diesen Waldflächen tendenziell geringer ausfallen kann (graublau). In den Tiefenbereichen herrscht ein kleinräumiger Wechsel der Substrate von skelettreichen Hanglehmen, tertiären Mergeln über Löss bis hin zu mächtigen Kolluviallehmen vor. Das führt wasserhaushaltlich zu kleinräumigen Variationen. Aufgrund des hohen Anteils an Feinmaterial ist die Wasserversorgung der Bäume aber gewährleistet. Ein Schwellenwert von 120 mm nFK (in der Legende der Klasse 121 - 160 mm zugeordnet) wird in den Tiefenbereichen mit hoher Sicherheit nicht unterschritten.

Im Übergang zu den Talbereichen herrscht eine mittlere nFK vor. Hier stehen tertiäre Mergel näher unter der GOF an. Die Gründigkeit ist dementsprechend geringer. Die Mergel sind zumeist von Lössresten, Deck- und Hanglehmen überlagert. Die oberen 50 cm sind dadurch fast immer skelettfrei, was eine mittlere nFK von mindestens 80 mm ermöglicht. In überwiegend steilen Hangbereichen der Terrassenstufen (grau) stehen vermehrt Schotterbänder der Hochterrasse an. Diese variieren stark in ihrer Zusammensetzung und bedingen klein-

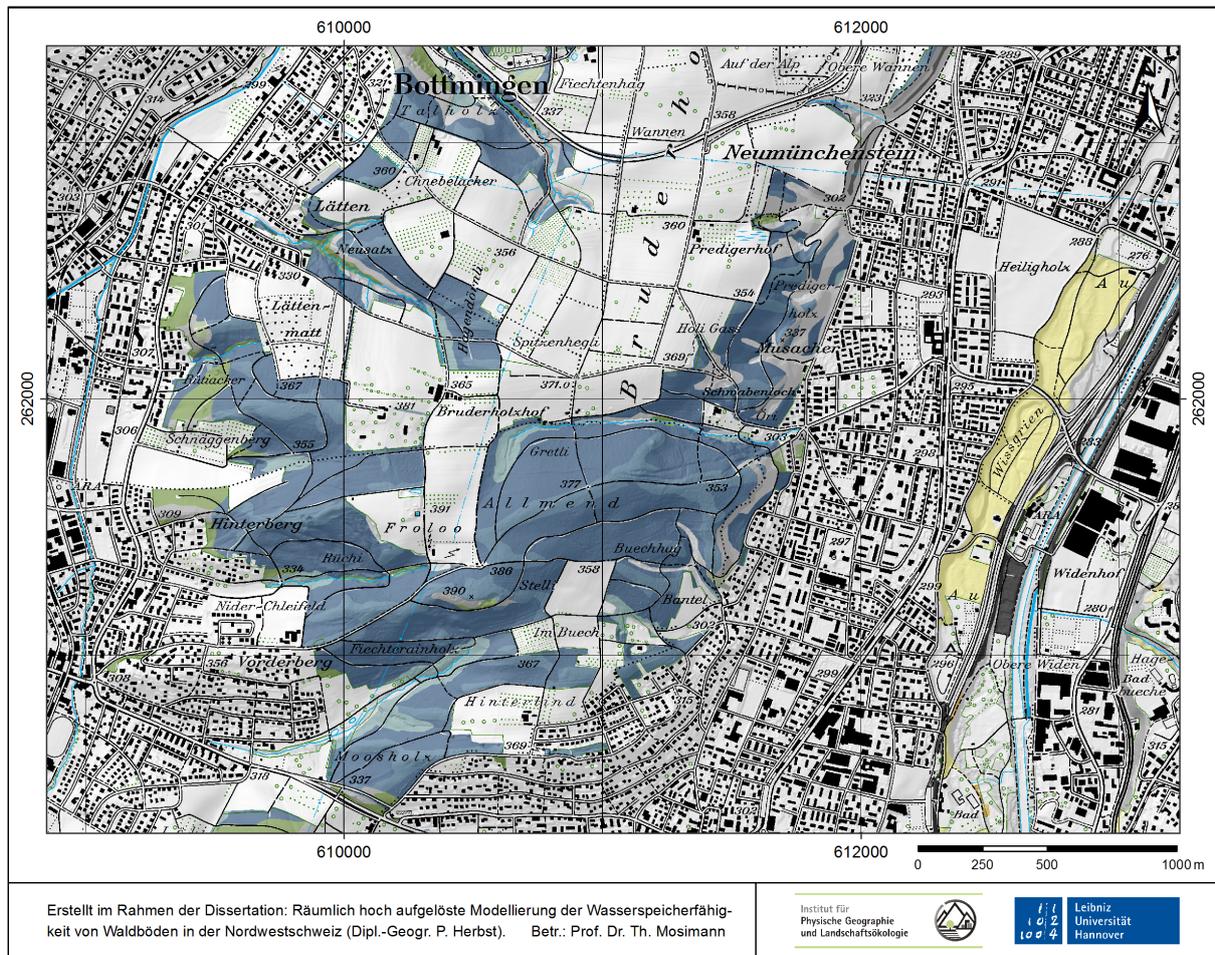


Abb. 31 Wissensbasierte Prognose der nutzbaren Feldkapazität im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz. Die Legende wird in Abb. 28 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1067 Arlesheim (SWISSTOPO).

räumige Wechsel unterschiedlich skelettreicher Hangschutte und -lehme. Die Heterogenität ist hier so hoch, dass keine belastbare Modellaussage möglich ist. In deutlichem Kontrast dazu stehen die einheitlich gelblich dargestellten Waldareale im östlichen Kartenausschnitt. Hier stocken die Wälder auf den Schotterebenen des Birstals. Diese haben aufgrund des sehr hohen Skelettanteils und geringen Feinbodenvolumens nur eine geringe nFK. Ausnahmen sind bedingt durch Umlagerungen oder Aufschüttungen von Feinmaterial.

Beispielgebiet aus dem Tafeljura (Diepflingen - Tecknau)

Eine deutlich stärkere Differenzierung der nFK als im Löss, zeigen die Tafeljurahochflächen und angrenzenden Hangbereiche im Gebiet zwischen Diepflingen und Tecknau (Abb. 32). Die dazugehörige Flächenbilanzierung ist Abb. 33 zu entnehmen. Rund 60 % der Waldfläche stockt hier auf Böden mit geringer nFK von 41 - 80 mm (blassgelb). Auf den ebenen und geneigten Plateaus sind dies die Arealen der anstehenden Kalke und Kalkmergel. Sie sind überwiegend von unterschiedlich mächtigen Deckschichten und Kalkverwitterungsschichten überlagert. Das Feinbodenvolumen ist dadurch höher als bei Rendzinen, was ein ausreichendes Wasserspeichervermögen bedingt. Auch die Divergenzbereiche der Plateaus (beige) weisen eine geringe Speicherkapazität auf, jedoch mit einer Tendenz zu sehr geringer nFK.

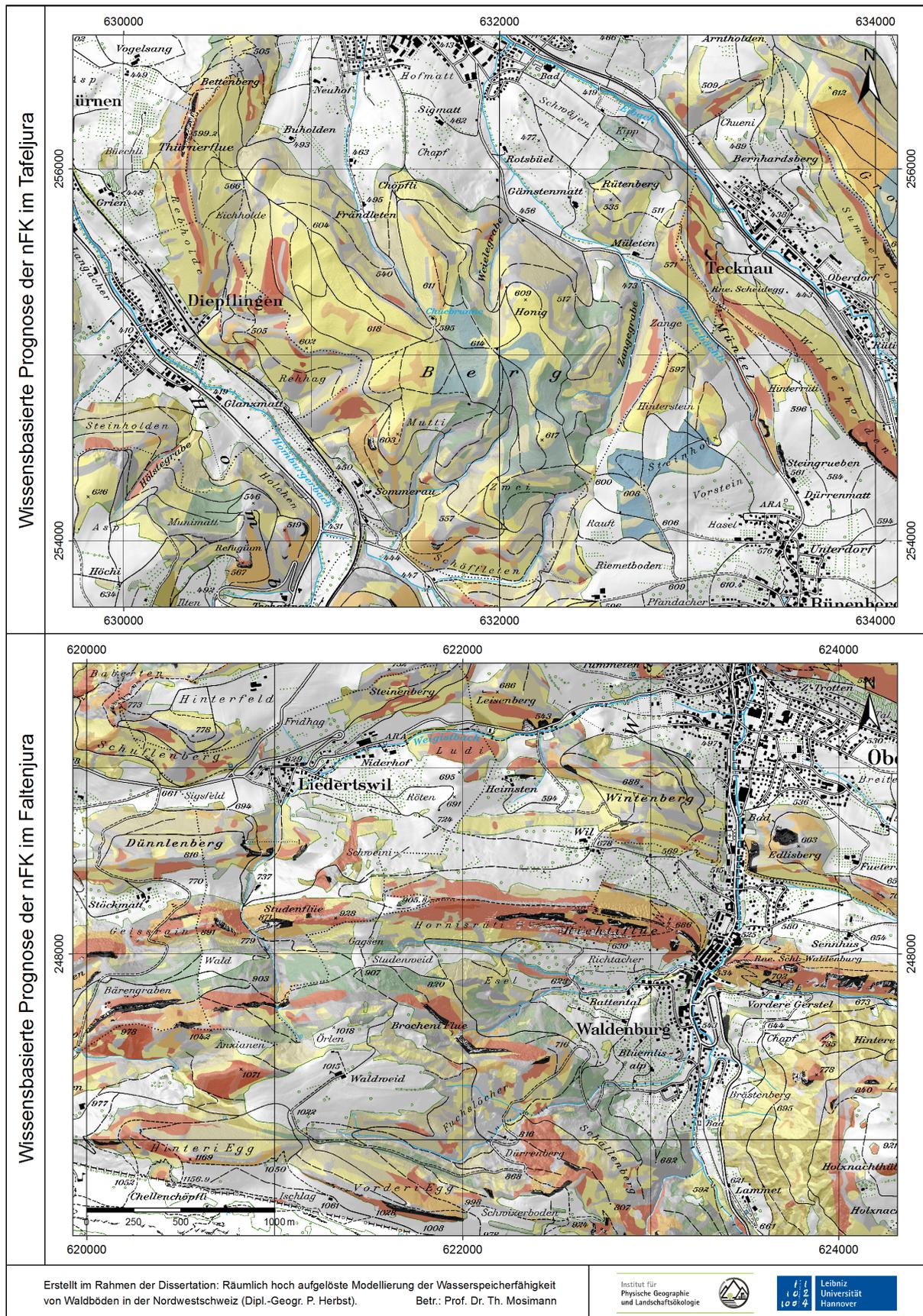


Abb. 32 Wissensbasierte Prognose der nutzbaren Feldkapazität für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura). Die Legende wird in Abb. 28 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blätter 1068 und 1088 (SWISSTOPO).

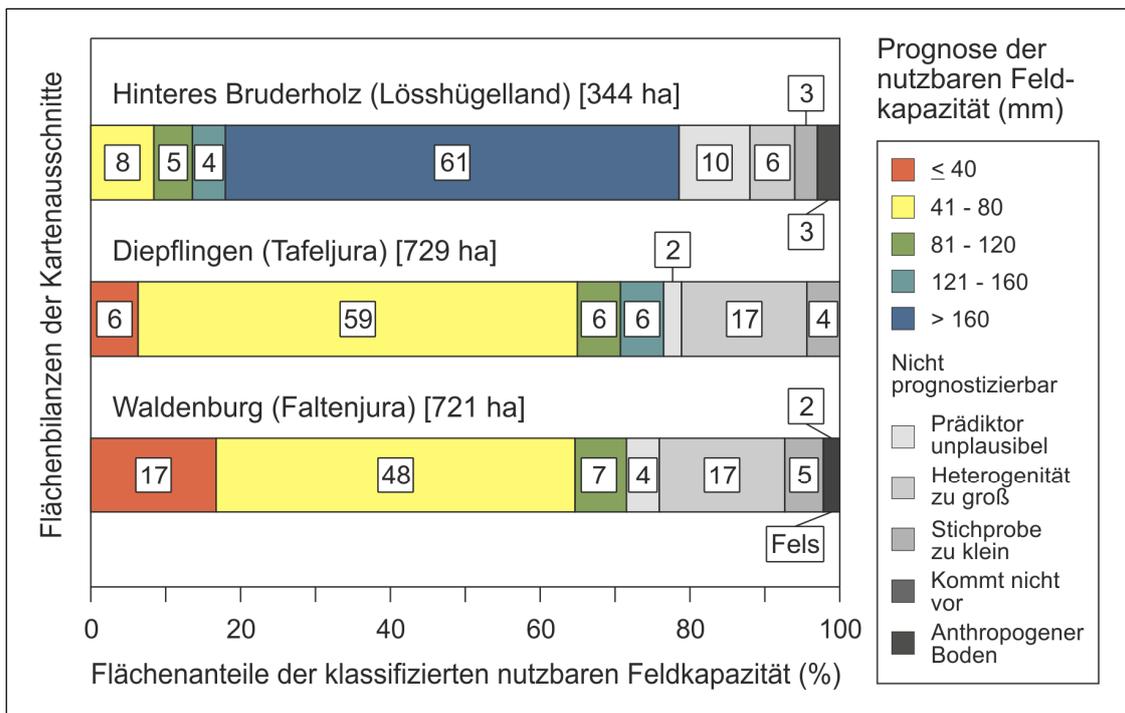


Abb. 33 Flächenbilanzen der wissenschaftlich prognostizierten nutzbaren Feldkapazität für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura (Abb. 31, 32).

In den Hanglagen haben die flacheren Normalhänge (< 25 Grad) auf Kalk und Kalkmergel und die Gehängeschutte den größten Anteil an den Flächen mit geringer nFK. Flachere Hangbereiche sind häufiger von mächtigeren Hangschutten und -lehmen überlagert als die steilen Hanglagen. Sehr geringe Wasserspeichereigenschaften unter 40 mm nFK (rötlich) beschränken sich im Wesentlichen auf Steilhänge und auf Schuttflächen unterhalb von Felsbändern. Desweiteren sind Hänge mit Neigungen von 25 – 32 Grad sowie Hangrücken auf Kalk, auf denen Waldgesellschaften mit der Zeigereigenschaft für sehr trockene Standorte stocken, Standortsituationen mit sehr geringer nFK (z.B. nordöstl. von Diepflingen). Diese räumliche Differenzierung der nFK ist plausibel. Dies gilt auch für den relativ geringen Flächenanteil von 6 % mit einer nFK unter 40 mm.

Für etwa 10 % der Waldfläche des Kartenausschnitts wird ein mittleres bis hohes Wasserspeichervermögen prognostiziert. Diese Areale hängen auf den Plateaus mit der Verbreitung der Decklehme (bläulich) und Tonmergel (grünlich) zusammen. In den Hängen beschränkt sich die Prognose mittlerer nFK maßgeblich auf die Bereiche, in denen laut geologischer Karte Tonmergel anstehen. Waldböden in Decklehmen und Tonmergeln sind häufig skelettarm oder -frei. Entsprechend ihrer schluffig bis tonigen (Decklehm) bzw. vorwiegend lehmig-tonigen Zusammensetzung (Tonmergel), speichern diese Substrate viel Wasser. Auf den Plateaus ist damit der scharfe Wechsel von Böden mit hoher nFK zu den direkt angrenzenden Böden auf Kalk mit geringer nFK nachvollziehbar. Im Gegensatz dazu sind die Übergänge der Gesteine in den Hängen häufig von Hanglehmen oder -schutten überlagert. In den Hanglagen bildet das Modell deshalb zu scharfe Grenzen zwischen den Arealen geringer und hoher Wasserspeichereigenschaften ab.

Für Hangkantenbereiche, flache Scheitel auf Vollformen und konvex geformte Hangbereiche ist in den meisten Fällen keine Aussage möglich (gräulich). Obwohl hier eine Bodenentwicklung im anstehenden Gestein sehr wahrscheinlich ist (MOSIMANN 2011), lassen die statistische Analyse und die Feldbegehung keine eindeutige Zuordnung der nFK zu. Durch die Heterogenität der Substrate dieser und weiterer Standorte sind 17 % der Waldfläche nicht prognostizierbar.

Beispielgebiet aus dem Faltenjura (Waldenburg - Liedertswil)

Die markanten rötlichen Hangbereiche mit sehr geringer nFK machen im Faltenjura etwa ein Fünftel der Waldfläche aus. Damit ist ihr Flächenanteil deutlich höher als im Tafeljura (Abb. 33). Zum überwiegenden Teil handelt es sich um Steilhänge, steilere Hanglagen (> 25 Grad) auf Kalk, Standorte unterhalb von Felsbändern, sowie Hangrücken und steile Scheitelbereiche. Diese Reliefformen nehmen einen deutlich höheren Flächenanteil ein. Dennoch muss v.a. in den unteren Bereichen der Hänge mit Neigungen von 25 - 32 Grad tendenziell von einer Unterschätzung der nFK ausgegangen werden. Dort nimmt die Mächtigkeit der Hangschutte und -lehme durch lokale Akkumulation häufig zu. Das umgelagerte Feinmaterial in diesen Lagen reicht dann aus, um mehr Wasser zu speichern. Die weitverbreitete geringe nFK von 41 - 80 mm (blassgelb) ist den Gehängeschuttdecken (z.B. östlich von Waldenburg) und den Normalhanglagen mit Hangschutten und -lehmen zugehörig. Dies ist plausibel.

Die Prognose der Areale mittlerer nFK (grünlich) ist grundsätzlich nachvollziehbar. Sie hängt mit der Lage der Tonmergel im unteren Abschnitt der Bergleisten zusammen. Die Übergänge zu den angrenzenden Flächen mit sehr geringen nFK (rötlich) zeigen sich im Gelände jedoch weniger deutlich als in der Karte dargestellt. Die anstehenden Gesteine sind weitgehend von Deckschichten überlagert. Die hohe Reliefenergie führt im Faltenjura dazu, dass die Stratigraphie der Gesteine durch Deckschichten und Mischsubstrate noch stärker verwischt wird, als es im Tafeljura der Fall ist. Im Gegensatz zum Tafeljura gibt es im Faltenjura keine Böden mit hoher oder sehr hoher nFK. Skelettarme tiefgründige Decklehme fehlen mit Ausnahme kleiner taschenartiger Akkumulationen.

Die Waldareale ohne Aussage zur nFK nehmen im Kartenausschnitt fast 30 % der Fläche ein. Die Ursachen decken sich im Wesentlichen mit den Bedingungen im Tafeljura. Aufgrund der hohen Heterogenität und kleinräumigen Wechsel der Hangsubstrate gelingt in Hangkantenbereichen, auf flachen Scheiteln auf Vollformen, auf steilen Scheiteln und Hangrücken sowie auf konvex geformten Hangbereichen in den meisten Fällen vorläufig keine belastbare Aussage zur nFK.

5.4.3 Lagebezogene Übereinstimmung von Modellprognosen und Bodenprofildaten

Durch eine lagebezogene Extraktion der Modellprognosen für die untersuchten Bodenprofile, ist ein Vergleich der prognostizierten nFK mit der beobachteten nFK möglich. Die Berechnung einfacher Gütemaße lässt Aussagen über die punktuelle Übereinstimmung der nFK-Werte zu (Tab. 14). Für die quantitative Überprüfung der Vorhersagen kann nur der Modellteil berücksichtigt werden (etwa 30 % der Waldfläche), bei dem die Prognosen der nFK durch die Häufigkeitsverteilungen der Stichproben an den Endknoten der Entscheidungsbäume statistisch belegt sind. Bei den übrigen Modellpositionen konnten die Stichproben nicht als repräsentativ angenommen werden und wurden deshalb mit bodenkundlichem Erfahrungswissen kombiniert (Kap. 5.2.3). Deshalb können diese Bodeninformationen auch nicht zur Prüfung der lagebezogenen Übereinstimmung mit der Modellierung herangezogen werden. Dies gilt insbesondere, da bei einigen Prädiktorenkombinationen die Modellaussage bewusst von den punktuellen Bodeninformationen der Stichprobe abweicht.

Die Ergebnisse zeigen für den Kanton BL für 66 % der Stichprobe eine lagebezogene Übereinstimmung von modelliertem und beobachtetem Wert. Wird neben der primären prognostizierten Klasse der nFK auch die Angabe der Tendenz zu höheren oder geringeren Werten der nFK mit berücksichtigt (*RR-S*), dann steigt die Übereinstimmung auf über 70 %. Im Lösshügelland ist die punktuelle Übereinstimmung höher als im Jura, wo trotz der vielfältigen naturräumlichen Bedingungen ein Wert von rund 60 % erreicht wird. Die Auswertung zeigt für die statistisch belegten Modellprognosen keine systematische Über- oder Unterschätzung der beobachteten nFK-Werte.

Modellregion	n	Gütemaße				
		<i>RR</i> (%)	<i>RR-S</i> (%)	<i>N1</i> (%)	<i>P1</i> (%)	<i>ME</i> (-)
Kanton Baselland	32	65,6	71,9	9,4	9,4	- 0,2
Lösshügelland	10	80,0	80,0	10,0	-	- 0,3
Jura	22	59,1	68,2	9,1	13,6	- 0,1

Tab. 14 Lagebezogene Übereinstimmung der statistisch-begründeten Modellprognosen der nFK mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile. Die Auswertung bezieht sich nur auf die Waldflächen mit Modellprognosen, die ausschließlich auf den statistischen Verteilungsfunktionen basieren. Dieser Fall kommt in den Talböden nicht vor. Die Talböden fehlen deshalb in der Auswertung. Die Profile sind Grundlage der Modellentwicklung. Die Ergebnisse liefern also Hinweise auf die Güte der Modellkalibrierung. Es handelt sich jedoch um keine Validierung anhand unabhängiger Testdaten. Abkürzungen: *RR*: Übereinstimmung (*Recall Ratio*) von Prognose (primäre Ausprägung) und Punktinformation, *RR-S*: Übereinstimmung von Prognose (primäre und sekundäre Ausprägung) und Punktinformation, *N1*: Anteil der Fälle, bei denen die Prognose eine nFK-Klasse niedriger ausfällt, *P1*: Anteil der Fälle, bei denen die Prognose eine nFK-Klasse höher ausfällt, *ME*: Mean Error (Mittl. Fehler oder systematischer Fehler). *ME* zeigt an, um wieviel nFK-Klassen die Prognose im Mittel von denen der Bodenprofile abweicht.

Die Übereinstimmung der statistisch belegten Modellprognosen mit den punktuellen Bodeninformationen in zwei Dritteln der Fälle ist ein Hinweis für eine gute Modellkalibrierung und stellt ein vergleichbares Ergebnis mit den Resultaten von EGLI ET AL. (2005) zur Modellierung von Bodeneigenschaften dar. In rund einem Drittel der Fälle weichen die flächenbezogenen Vorhersagen von den beobachteten nFK-Werten der Profile ab. Eine wesentliche Ursache liegt hierfür in der Variabilität der verbreiteten Deckschichten auf den Jurahängen, deren Lehm- und Steinanteile mitunter kleinräumig ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit schwanken. Als weiterer Grund sind das kleinflächige Vorkommen von Deckschichten auf den Plateaus (z.B. Decklehmreste, Lössschleier) und von lokalen feinmaterialreichen Akkumulationen in Hanglagen (z.B. verschwemmte Verwitterungslehme) zu nennen. Die Bodenprofile haben einen starken Bezug zum Mikrorelief und diesen lokalen Variationen der Substratverhältnisse auf wenigen Metern (EGLI ET AL. 2005). Aufgrund der räumlichen Auflösung der Prädiktoren kann diese lokale Differenzierung der Merkmalskombinationen von den flächenbezogenen Modellprognosen nicht mehr abgebildet werden. Eine quantitative Beurteilung der Modellierung hinsichtlich ihrer arealbezogenen Plausibilität ist mit einer punkthaften Überprüfung deshalb nur sehr eingeschränkt möglich. Hier zeigt sich das grundlegende Problem des Vergleichs von Punkt- mit Flächeninformationen (LAGACHERIE 2008). Die bisherige Ergebnisdiskussion der prognostizierten nFK-Werte hat gezeigt, dass die Plausibilität der räumlichen Verteilungsmuster der Modellprognosen höher ausfällt als die punktuelle Überprüfung vermuten lässt.

5.4.4 Bedeutung der einzelnen Prädiktoren in der Prognose und von den Prädiktoren abhängende Fehler

5.4.4.1 Reliefformtypen

Die Bedeutung von Reliefparametern für die modellgestützte Vorhersage von Bodeneigenschaften und des standörtlichen Wasserhaushalts ist erwiesen (MOORE ET AL. 1991, MCBRATNEY ET AL. 2003, LI ET AL. 2005, HENGL & REUTER 2009). Der grundlegende Stellenwert der Reliefformtypen für die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung wurde in vorangegangenen Kapiteln bereits diskutiert (Kap. 3). Die Ergebnisse zeigen, dass nur auf Grundlage der modellierten Reliefeinheiten und -formtypen im Lösshügelland und im Jura keine belastbare modellgestützte Prognose des Wasserspeichervermögens erfolgen kann. Gerade im Jura variiert die Substratverbreitung innerhalb der Reliefformareale z.T. stark, so dass daraus deutliche Unterschiede des Wasserspeichervermögens resultieren (z.B. Plateaubereiche, Normalhänge). Erst die Kombination der Reliefformtypen mit weiteren Prädiktoren, ermöglicht eine räumlich hinreichende Differenzierung der Standortbedingungen, um sich den vielfältigen und häufig kleinräumig wechselnden Bedingungen der Wasserspeicherfähigkeit anzunähern.

Ein solches Zusammenwirken von Relief und Gesteinsausbildung veranschaulicht Abb. 34 anhand eines Beispiels am Rand der Tafeljurahochfläche in der Flur *Berg*. In diesem Gebiet dominieren die tiefgründigeren Tonmergel (braune Linien grenzen die Einheiten ab). Das Modell prognostiziert weitverbreitet eine hohe nFK (121 - 160 mm).

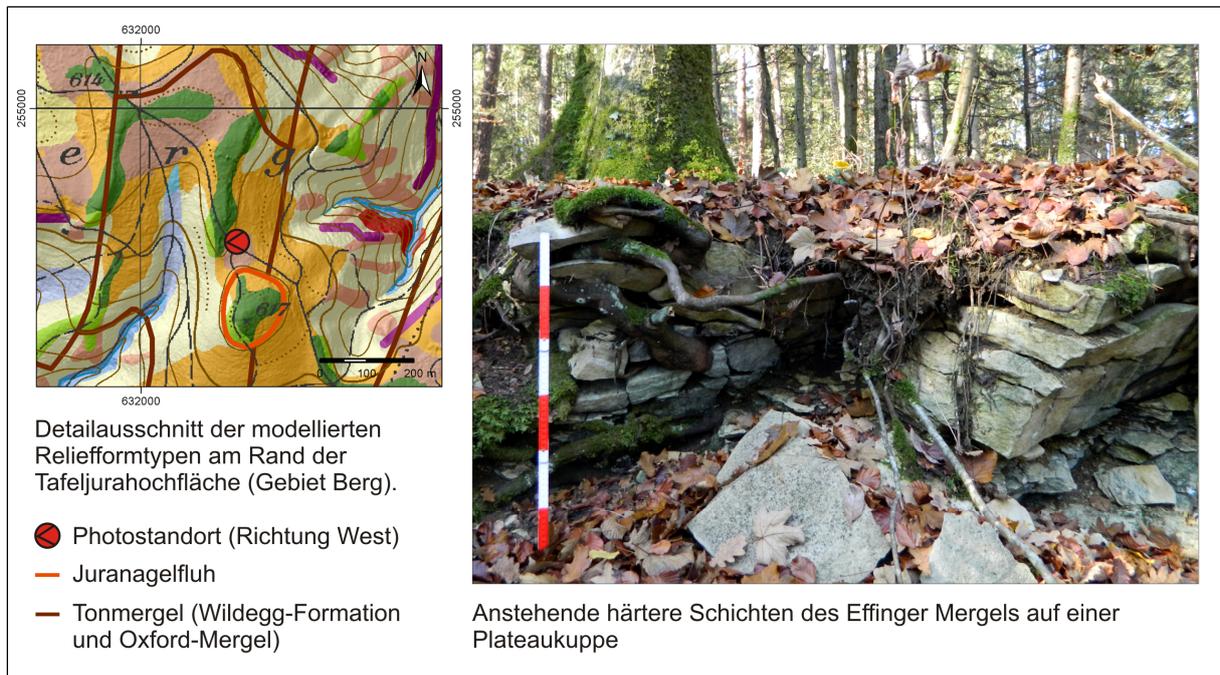


Abb. 34 Bedeutung der Scheitel auf Plateaus zur Abgrenzung geringer nFK auf Tonmergeln und Juranagelfluh.

Im Kartenausschnitt weist die Reliefgliederung auf den zergliederten Plateauflächen (orange) Scheitel auf Plateaus (dunkelgrün) aus. In diesen Reliefbereichen sind die tonreicheren Teilschichten erodiert und die härteren Schichten des *Effinger Mergel* stehen an der Oberfläche an (siehe Photo). Die Standorte verfügen mit geringer Gründigkeit und hohem Skelettgehalt über ein geringes Speichervermögen. Die Prädiktorenkombination ermöglicht hier eine sehr gute Abgrenzung dieser Standorte von umliegenden Böden, die deutlich mehr Wasser speichern können. Ein weiteres Beispiel ist die modellierte Plateaukuppe bei der Höhe 617 m. In diesem Bereich steht die Juranagelfluh an (dunkelorange abgegrenzte ovale Fläche). Auch hier bedingen hohe Steingehalte und das Fehlen einer Deckschicht flachgründige Böden mit geringer Wasserspeicherfähigkeit (41 - 80 mm nFK).

Die genannten Fälle sind Beispiele für Reliefformen, auf denen keine Umlagerungsprozesse von Verwitterungsmaterial stattgefunden haben. Böden, die sich im anstehenden Gestein entwickelt haben, sind auf diese Reliefbereiche beschränkt. Hierzu zählen nach MOSIMANN (2011) Kämme, Scheitel, Kuppen und Sättel, Reliefbereiche oberhalb von Felsstufen, auf Plateaus und im Lösshügelland, Hangkanten und -rücken. In diesen Reliefbereichen werden die Bodeneigenschaften wie die Gründigkeit, Bodenart oder Steingehalt und damit auch die Fähigkeit der Böden Wasser zu speichern, im Wesentlichen durch die petrographische Zusammensetzung der anstehenden Gesteine bestimmt. In anderen Reliefbereichen ergeben sich in der Kombination von Relief und Gestein z.T. große Streuungen der nFK (Kap. 5.4). Dies sind v.a. verschiedene Hanglagen, in denen das anstehende Gestein im Jura fast immer von unterschiedlich zusammengesetzten Deckschichten überlagert ist.

Wie schon MOSIMANN ET AL. (2011) betonen, ist die Bedeutung der Oberflächendifferenzierung des Reliefs anhand der morphographischen Formtypen maßgeblich für die räumliche Plausibilität der Modellierung. Denn erst die grundsätzliche Erfassung des geomorphologischen Prozessgeschehens über die Reliefformtypen ermöglicht:

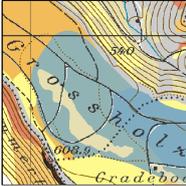
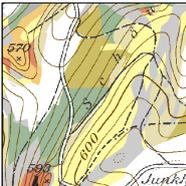
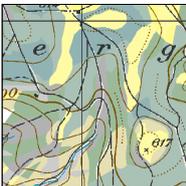
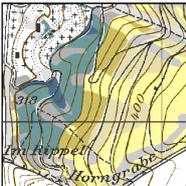
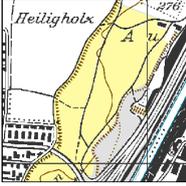
1. Standorte mit gesteinsbestimmten Böden von denen zu differenzieren, an denen sich die Böden in Deckschichten entwickelt haben.
2. Abgrenzung der Reliefbereiche mit homogenen Bodenverhältnissen von den Bereichen mit vielfältigen Substratvariationen.
3. Näherungsweise Differenzierung der Deckschichten in den Hängen und auf den Plateaus mit gleichem Gesteinsuntergrund in Kombination mit der Verwendung morphometrischer Reliefparameter (z.B. Hangneigungen, Fließweglängen).

Da die Reliefbedingungen zudem auch die Merkmalsausprägungen anderer Prädiktoren mit beeinflussen (z.B. Pflanzensoziologie der Waldgesellschaften über Exposition, Neigung und Höhenlage), ist der Prädiktor Relief insgesamt unverzichtbar für die räumlich differenzierte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit.

5.4.4.2 Gesteinstypen und -gruppen

Die Ergebnisdiskussion der vorangegangenen Kapitel hat bereits die generelle Bedeutung des Prädiktors Gestein für die räumlich differenzierte Modellierung des Wasserspeichervermögens aufgezeigt. Die petrographische Zusammensetzung der Gesteinstypen hat vor allem dann maßgeblichen Einfluss auf die räumliche Differenzierung der Bodeneigenschaften (z.B. Gründigkeit, Lehm- und Steinanteile) und damit eine hohe Aussagekraft für die Wasserspeicherfähigkeit, wenn sich die Waldböden im anstehenden Gestein entwickelt haben. Das Vorkommen dieser gesteinsbestimmten Böden (MOSIMANN 2011) beschränkt sich im Untersuchungsgebiet hauptsächlich auf die in Kap. 5.4.4.1 angeführten Reliefbereiche, in denen keine Ab- und Umlagerung von Verwitterungsmaterial stattgefunden hat.

Flächenmäßig dominieren im Jura die Böden auf Deckschichten. Vor allem die Hänge tragen größtenteils umgelagertes Verwitterungsmaterial über dem Festgestein. Mit dem lateralen Materialversatz können sich die Deckschichten mit dem Verwitterungsmaterial des anstehenden Gesteinsuntergrundes durchmischen. In Reliefbereichen mit geringmächtigen Hanglehmen und Hangschutten (z.B. Hänge mit mehr als 25 Grad Neigung) beeinflussen die petrographischen Gesteinstypen die Zusammensetzung dieser Hangsubstrate deutlich. Mit dem Prädiktor Gestein können dann Rückschlüsse auf das Wasserspeichervermögen gezogen werden. Die Deckschichten werden in der geologischen Karte aber nur unzureichend wiedergegeben (Kap. 4.2). Aus dieser Unschärfe in der geologischen Information resultieren potenzielle gesteinsbestimmte Modellierungsfehler. Tab. 15 fasst die problematischen Gesteinssituationen für die Modellierung zusammen, die am häufigsten vorkommen oder welche die potenziell größten Fehler verursachen. Die Aufstellung zeigt, dass in Extremfällen auf kleinen Flächen Abweichungen der Prognose von bis zu drei nFK-Klassen aus den unscharfen oder fehlenden Informationen zum Gestein resultieren können.

Kartenausschnitt mit Situationsbeispiel	Gesteins-situation gemäß geologischer Karte	Modell-prognose nFK (mm)	Problemstellung für die Modellierung	Potenziell resultierender Modellfehler
	Anstehender Kalk neben Decklehm auf Tafeljura-hochfläche.	Kalk: 41- 80. Decklehm: 121-160.	Der Übergang von Decklehm zum Kalk ist häufig unscharf. Verbreitung der Decklehm auf den Plateaus ist nicht vollständig bekannt.	Liegen Decklehm über dem Kalk, dann wird die nFK zwei Klassen zu niedrig eingestuft.
	Wechsel von Kalk, Gehängeschuttdecken und Tonmergeln im Hang.	Kalk u. HS: ≤40 / 41-80. Tonmergel: 121-160.	Wald stockt in Hängen überwiegend auf Deckschichten. Hangsubstrate sind in geol. Karte i.d.R. nicht vermerkt. Grenzen unklar. Böden auf Deckschichten speichern mehr Wasser.	Erfassung der Substrate ist schwierig, z.T. nicht möglich. Max. 2-3 Klassen Abweichung zwischen Rendzinen, Lehmen u. Tonmergel möglich.
	Stratigraphische Einheiten des Tonmergels mit hoher räumlicher und zeitlicher Vielfalt.	Tonmergel: 41-80 / 81-120 / 121-160.	Die Tonmergel bestehen aus sehr vielfältigen Teilschichten. Das Mischungsspektrum reicht von Mergelkalk bis zu tonreichen Mergeln, die unterschiedlich viel Wasser speichern können.	Ausgehend von tonreichen Schichten, kann die nFK im Bereich härterer Schichten bis zu zwei Klassen zu hoch eingestuft sein.
	Gekappter Löss folgt unterhalb von Kalk in der Hangabfolge.	Kalk: 41-80. Löss: 121-160 / 161-200.	Grenzen der Lössverbreitung im Hang sind ungenau. Mächtigkeit der Lössse variierend. Mischsubstrate sind im Übergang zum Kalk vorhanden.	Nicht genau bekannter Wechsel von Löss mit sehr hoher nFK zu Kalk mit geringer nFK kann bis zu drei Klassen Abweichung verursachen.
	Schotterebenen auf der Niederterrasse.	Schotter: 41-80.	Böden der Schotterebenen sind verbreitet durch Umlagerungen, Aufschüttungen und Auftrag von fremdem Material verändert. Die Angaben fehlen weitgehend in der geologischen Karte.	Aufschüttungsböden speichern 2-4-mal mehr Wasser als ungestörte Böden. nFK kann bis zu zwei Klassen zu gering eingestuft werden.

Tab. 15 Probleme der Modellierung durch ungenaue und fehlende Informationen zu den Gesteinstypen.

Damit besteht beim aus den geologischen Karten abgeleiteten Prädiktor Gestein das größte Problem in den ungenügenden Informationen zu den Deckschichten und ihrer unsystematischen räumlichen Abbildung auf den Karten. Für eine Verbesserung der Prognose in den Hängen muss die Verbreitung der Deckschichten unter Umständen lokal auskartiert werden. Wie bereits in Kap. 5.3.2 festgehalten, könnte die GIS-gestützte Erfassung von Nachbarschaftsbeziehungen in der Abfolge der Gesteinstypen in Gefällerrichtung einen weiteren Beitrag zur Verminderung dieser Fehlerquellen liefern. Hierfür wäre zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen den Substrateigenschaften von Deckschichten und der Distanz zu einem oberhalb anstehenden petrographischen Gesteinstyp besteht. So könnte über Fließweglängen oder Vertikaldistanzen in Kombination mit Hangneigungskriterien eventuell abgeschätzt werden, inwiefern beispielsweise ein Tonmergel von Gehängeschutt überprägt wird, sobald Kalke oberhalb im Hang anstehen.

5.4.4.3 Pflanzenökologische Feuchtestufen

Die pflanzenökologischen Feuchtestufen sind am ehesten im unteren Randbereich des Ökogramms (sehr trocken und trocken) aussagekräftig für die Wasserversorgungssituation. In den Stufen *frisch* und *feucht* streuen die Wasserspeicherefähigkeitswerte hingegen häufig stark. Die Feuchtestufen werden im Modell folglich hauptsächlich dazu genutzt, um in Bereichen gleicher Reliefformen und Gesteinstypen, die Standorte mit geringem Wasserspeichervermögen von den Waldflächen mit durchschnittlichen Bedingungen abzugrenzen. Im mittleren Wertespektrum der nFK ist hingegen nahezu keine Differenzierung möglich.

Abb. 35 dokumentiert ein Beispiel dafür, wie sich eine Differenzierung des Modells anhand der Feuchtestufen *sehr trocken* und *trocken* auf die prognostizierte nFK auswirkt. Die auf den Jurahochflächen nebeneinander liegenden Waldgebiete Grossholz und Korn unterscheiden sich bei ihren maßgeblichen Standortbedingungen nur marginal voneinander (Plateau mit anstehendem Kalkstein, vergleichbare Mächtigkeit der Verwitterungslehme). Für die Böden im Grossholz prognostiziert das Modell eine geringe Wasserspeicherefähigkeit (41 - 80 mm nFK) mit der Tendenz zu geringeren nFK-Werten (orange). Für den westlich gelegenen Plateaubereich Korn weist das Modell hingegen eine geringe Speicherkapazität ohne Tendenz zu geringeren nFK-Werten aus (blassgelb). Die unterschiedlichen Prognosen der nFK resultieren hier ausschließlich aus den verschiedenen Feuchtestufen gemäß Pflanzensoziologie (sehr trocken im Grossholz und trocken in der Flur Korn). Wie in Kap. 5.3.3 begründet wird, ist auf den Plateaus auch für die pflanzenökologische Feuchtestufe *sehr trocken* eine Prognose sehr geringer nFK-Werte (≤ 40 mm) abzulehnen. Wäre diese Regel nicht in das Modell integriert worden, wären für die Waldböden auf Kalk im Grossholz flächendeckend zu geringe nFK-Werte prognostiziert worden. Dies haben die Ergebnisse der stichprobenartigen Überprüfung der Substratbedingungen im Gelände gezeigt.

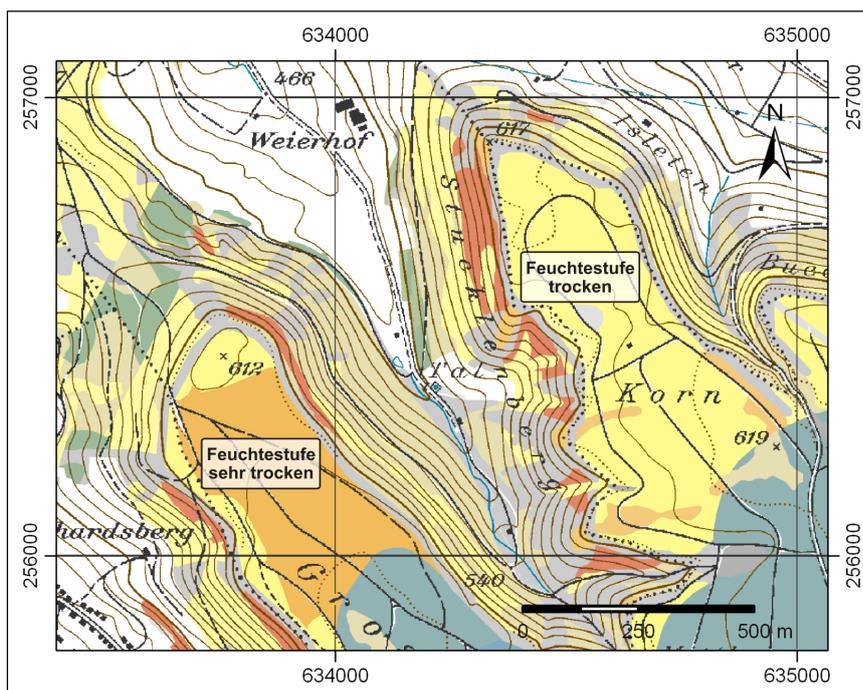


Abb. 35 Einfluss der pflanzenökologischen Feuchtestufen auf die wissensbasierten Modellprognosen.

Der Kartenausschnitt zeigt die Jurahochflächen Grossholz und Korn zwischen Tecknau und Rothenfluh. Auf beiden Hochflächen stehen Kalk und Kalkmergel gemäß geologischer Karte an. Die unterschiedlichen Prognosen der nFK (orange = 41-80 mm, tendenziell geringer; blassgelb = 41-80 mm) resultieren ausschließlich aus den verschiedenen Feuchtestufen gemäß Pflanzensoziologie.

Dieses Beispiel belegt, dass die Feuchtestufe *sehr trocken* auf den Plateaus nicht immer als Prädiktor für Areale mit sehr geringem Wasserspeichervermögen ausreichend ist. Dieser Befund gilt auch für Hangbereiche. Damit bestehen für die Modellierung die wesentlichen Probleme beim Prädiktor Feuchtestufe darin, dass die Ableitung der Bodenfeuchtesituation aus den Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften nicht immer funktioniert und Fehleinschätzungen unterliegt. Die Waldgesellschaften liefern zum Teil ungenaue Einstufungen der Feuchtesituationen, die sich in den standörtlichen Bodenverhältnissen nicht nachvollziehen lassen. Dies hat das angeführte Beispiel gezeigt. Ein weiteres maßgebliches Problem ist die geringe Aussagekraft des Prädiktors für die standörtliche Wasserversorgungssituation im mittleren Bereich des Ökogramms (frisch und feucht). Eine Ursache hierfür kann darin bestehen, dass sich die pflanzensoziologische Kartierung und Abgrenzung der Waldgesellschaften auf waldwachstumsbestimmende Standortmerkmale stützt, "die nicht unbedingt mit bodensystemischen Kriterien übereinstimmen" (FRIEDRICH 2001, S. 72). Hieraus resultiert eine generelle Unschärfe in der räumlich differenzierten Abschätzung von Bodenverhältnissen, abgeleitet aus den Zeigereigenschaften der Pflanzensoziologie.

Die pflanzenökologischen Feuchtestufen müssen deshalb im Modell häufig mit weiteren Prädiktoren wie Neigungskriterien zur Abbildung steilerer Hanglagen (Neigungen über 25 Grad) oder mit Positionsparametern (Vertikaldistanz zur Tiefenlinie) kombiniert werden. Durch die Prädiktorenkombination können kleinräumige Variationen der Substratverhältnisse in einigen Modellbereichen besser erfasst (z.B. steile Hanglagen auf Kalkstein) und das standörtliche Wasserspeichervermögen der Böden dadurch besser differenziert werden.

5.5 Zusammenfassende Bemerkungen zur Leistungsfähigkeit und den Grenzen des entwickelten Modells

Der faktorenbasierte Modellierungsansatz kombiniert empirisch-statistische Häufigkeitsanalysen mit Expertenwissen. Der methodische Ansatz ermöglicht für große Waldflächen des Untersuchungsgebietes eine räumlich plausible Differenzierung des Wasserspeichervermögens der Böden in einem hohen Detailierungsgrad. Grundsätzliche Voraussetzungen für das entwickelte Modellierungsverfahren sind:

- eine ausreichende Stichprobe valider Profilaufnahmen (Datendichte von mindestens 0,5 bis 2 Bodenprofilen pro km²).
- die Integration und Kombination verschiedener Prädiktoren, welche die vielfältigen Einflüsse der Faktoren auf den Boden räumlich möglichst differenziert abbilden.
- umfangreiche und detaillierte Geländekenntnisse über die Bodeneigenschaften im modellierten Raum.

Die große Vielfalt der Standortbedingungen macht im Jura eine vollständige Abbildung sämtlicher Variationen der bodenbildenden Faktoren durch Bodenprofilaufnahmen unmöglich. Jede Datengrundlage weist damit Lücken auf. In diesem Sinne haben sich Erfahrungswissen und Feldkartierung zur Verdichtung der Bodeninformationen, für die abschließende Modellkalibrierung sowie für die Plausibilitätsprüfung der Prognosen als unverzichtbar erwiesen.

Ausgehend von den Merkmalsausprägungen der Standortfaktoren liefert das Modell erwartungsgemäß räumlich plausible Vorhersagen der Wasserspeicherkapazität für die Böden auf Lössen und Decklehmen im Lösshügelland und für die weitgehend ungestörten Schotterebenen in der Modellregion Talböden. Im Jura gilt dies für die Reliefbereiche, in denen keine Ab- oder Umlagerung von Verwitterungsmaterial stattgefunden hat und sich die Böden im anstehenden Festgestein entwickelt haben. Desweiteren sind die Plateaubereiche, Hänge im Einflussbereich von Felsbändern, Steilhänge, Hanglagen mit über 25 Grad Neigung, Tiefenbereiche und Muldentäler weitere Reliefbereiche, in denen das Modell mit der Kombination Gestein, Feuchtestufen und Positionsparametern verbreitet eine räumlich plausible Differenzierung des Wasserspeichervermögens der Böden leisten kann.

Hingegen ist in vielen Bereichen der Hänge mit 5 - 25 Grad Neigung im Tafel- und Faltenjura sowie in konvexen und konkaven Hangbereichen die Genauigkeit der Modellprognosen eingeschränkt. Zudem bildet das Modell in den Hanglagen häufig zu scharfe Grenzen zwischen den Arealen geringer und hoher Wasserspeicherkapazität ab. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass die Informationen zu den dort weit verbreiteten Deckschichten über den Gesteinen unvollständig und unsystematisch sind oder dass sich die kleinräumigen Variationen der Deckschichtsubstrate z.T. dem Modellmaßstab entziehen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Aussagen von WALTHER ET AL. (2004) und MOSIMANN (2011), die auf die große Vielfalt der Ausgangssubstrate der Bodenbildung in der untersuchten Region verweisen.

Die Genauigkeit der Modellprognose wird primär durch den Informationsgehalt der Datengrundlage begrenzt. Die z.T. eingeschränkte Aussagekraft der Prädiktoren und die verbreitete große Vielfalt der Bodeneigenschaften auch innerhalb einheitlicher geologischer Formationen (FRACEK & MOSIMANN 2012), setzen der Prognostizierbarkeit klare Grenzen. Zusammen mit der hohen Variabilität und dem kleinräumigen Wechsel der Deckschichten auf den Jurahängen sind dies wesentliche Gründe dafür, dass das entwickelte Modell für rund 25 % der Waldfläche vorläufig keine räumlich differenzierte Aussage für die Wasserspeicherkapazität der Waldböden liefern kann (Kap. 8.2). Hier könnte beispielsweise die gezielte Nachkartierung von Deckschichten zukünftig dabei helfen, substratbedingte Fehlerquellen für die Modellprognose zu reduzieren.

Die Angaben der Aussagesicherheit zu jeder Prognose der Wasserspeicherkapazität lassen die Belastbarkeit der Vorhersage in den Karten unmittelbar erkennen. Desweiteren wird eine Tendenz zu höheren oder geringeren Werten der nFK angegeben, sofern dies die Variation des Wasserspeichervermögens unter den gegebenen Prädiktorenkombinationen zulässt. Ist aufgrund der zu hohen Heterogenität der Bodenverhältnisse für eine Standortsituation keine Aussage zur Wasserspeicherkapazität möglich, wird diese in den Karten gesondert ausgewiesen. Damit bewältigt das entwickelte Modellierungsverfahren insgesamt das Problem der kleinräumigen Variabilität und der z.T. breiten Amplitude des Wasserspeichervermögens (MOSIMANN ET AL. 2011). Zusammen mit der Auflösung der prognostizierten Wasserspeicherkapazitätswerte in fünf Klassen ist somit die Anwendung der Modellierungsergebnisse für weiterführende ökologische Fragestellungen generell möglich.

6 Vorhersage des Wasserspeichervermögens mit Random Forest

Parallel zur wissensbasierten Modellierung erfolgt in dieser Arbeit die faktorenbasierte Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit mit einem teilautomatisierten Modellansatz. Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der hierfür verwendeten Random Forest Modelle und diskutiert die räumliche Plausibilität der Ergebnisse. Abb. 36 stellt das Vorgehen der teilautomatisierten Modellierung bis hin zur Ausgabe der Prognosekarten schematisch dar.

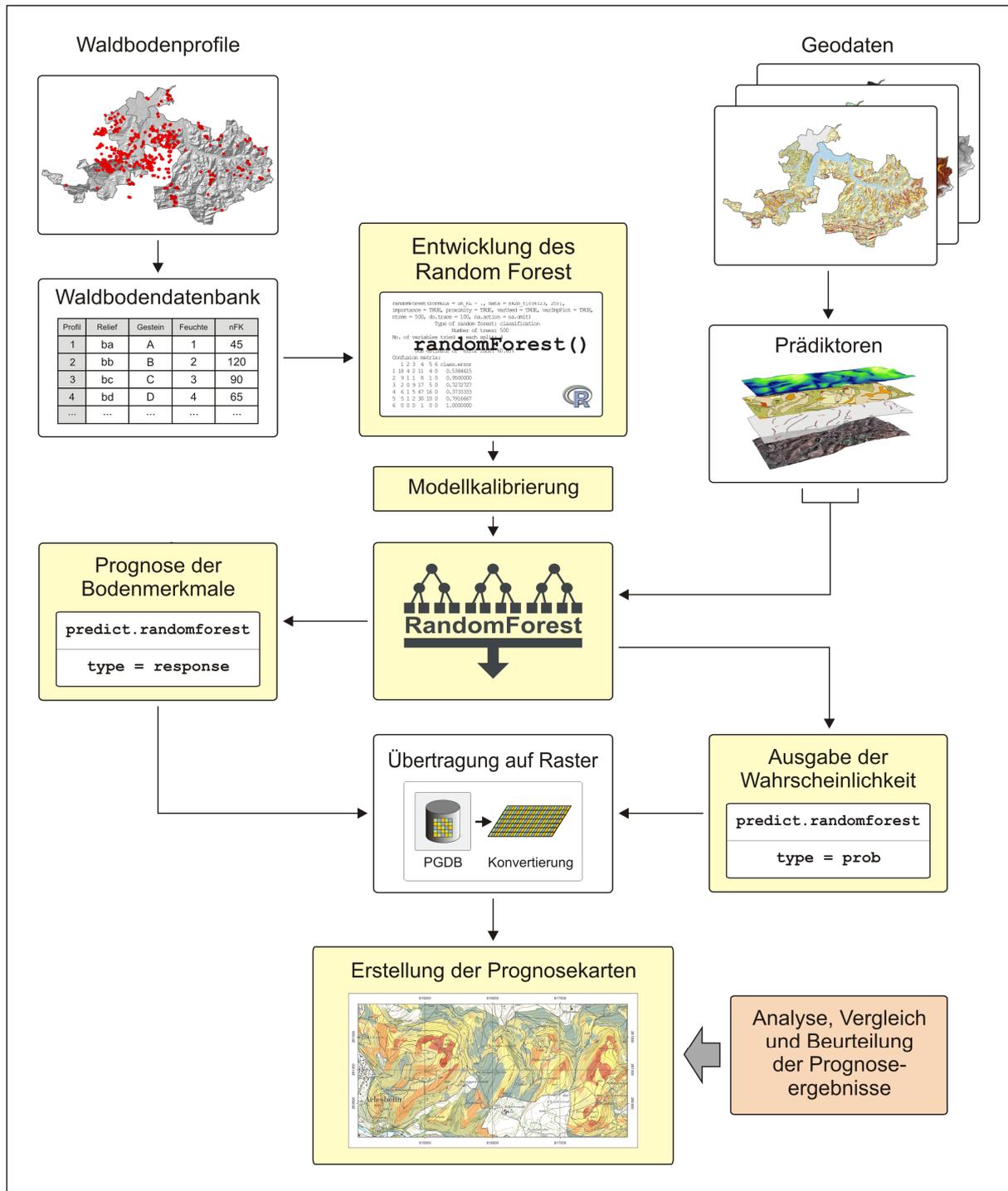


Abb. 36 Konzept und Ablauf der teilautomatisierten Modellentwicklung und Ausgabe der Prognosekarten.

6.1 Entwicklung der Random Forest-Modelle

6.1.1 Teilautomatisierte Modellkonstruktion und Kalibrierung

Die Entwicklung der Random Forest-Modelle basiert auf der gleichen Datengrundlage, die auch für die wissensbasierten Modelle verwendet wird (Kap. 5.2). Die Waldbodenprofile sind als Trainingsdaten die Basis für die Konstruktion der Modelle und die Prädiktoren stehen als Prognosedaten für die flächendeckende Modellierung bereit. Die grundsätzliche Vorgehensweise des Algorithmus wird in Kap. 2.4 beschrieben. Die detaillierte Darstellung der Definitionen und Funktionen von Random Forest (RF) lässt sich BREIMAN (2001), BREIMAN (2004), BREIMAN & CUTLER (2007), BERK (2008b) und LIAW & WIENER (2010) entnehmen.

Auf Grundlage der Trainingsdaten und unter Verwendung der Standardeinstellungen wird ein erstes Ensemble von Entscheidungsbäumen generiert. Dieses Basismodell ist dann mit den in Tab. 16 angeführten Parametern in rund 200 Modellläufen iterativ kalibriert worden. Als Qualitätsmaß und zur Fehlereinschätzung des RF dient die intern und unabhängig generierte Fehlerrate des Modells: *der OOB error* (BREIMAN 2001, BREIMAN & CUTLER 2007). Er wird auf Basis der unabhängigen *out-of-bag* Fälle ermittelt (Kap. 2.4). Der *OOB error* gibt den prozentualen Anteil der Fälle an, bei denen die Prognosen des RF nicht mit den tatsächlich gegebenen nFK/FK-Klassen der Stichprobe übereinstimmen (Abb. 37). Das Ziel der Modellkalibrierung ist die Minimierung des *OOB error* bei gleichzeitiger Ausbalancierung der Fehleraten für die einzelnen Wasserspeicherfähigkeitsklassen. Abb. 37 zeigt die Abnahme der *OOB error* der einzelnen Klassen und des gesamten RF (schwarze Kurve) mit zunehmender Anzahl an Entscheidungsbäumen im Ensemble. Bereits bei rund 250 Bäumen pendeln sich die Fehlerraten ein und bleiben ab 800 Bäumen konstant. Die gepunktete Linie markiert damit den notwendigen Ensembleumfang, um mit der vorliegenden Datenbasis konstant niedrige Fehlerraten zu erzielen (LIAW & WIENER 2002).

Parameter	Kurzbeschreibung	Referenzen
n_{tree}	Anzahl der Entscheidungsbäume in einem Random Forest. Die Fehlerrate des RF sinkt mit steigender Anzahl.	LIAW & WIENER 2002, 2010.
m_{try}	Anzahl zufällig zu testender Variablen (Prädiktoren) an jedem Split (Knoten) eines Entscheidungsbaumes.	LIAW & WIENER 2002, 2010, BREIMAN & CUTLER 2007.
classwt	Gewichtung einzelner Klassen der nFK/FK. Je stärker die Gewichtung, desto höher der Anteil an der Ziehung der Stichprobe.	CHEN ET AL. 2004, BREIMAN & CUTLER 2007.
samplesize	Festlegung der maximalen Anzahl an Fällen, die aus den einzelnen nFK/FK-Klassen je Baum gezogen werden dürfen.	LIAW & WIENER 2010.
cutoff	Toleranzwert, der die Mehrheitsentscheidung des RF für die Wahl einer nFK- bzw. FK-Klasse als Prognose beeinflusst.	CHEN ET AL. 2004, DAHINDEN 2007, LIAW & WIENER 2010.
variable importance measures	Ranking der Prädiktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf die Prognose. Schwache Prädiktoren sind erkennbar.	LIAW & WIENER 2002, STROBL ET AL. 2007, BERK 2008b.

Tab. 16 Verwendete Parameter für die iterative Kalibrierung der Random Forest-Modelle.

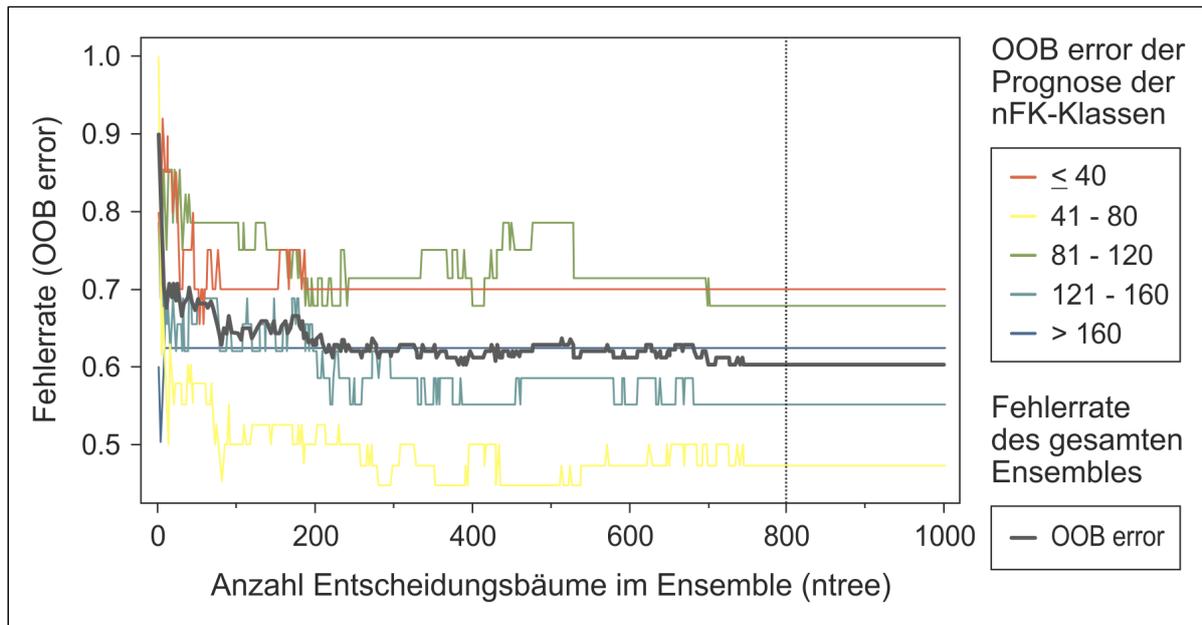


Abb. 37 Verlauf des OOB error für die Prognose der nFK-Klassen und für den gesamten Random Forest in Abhängigkeit von der Anzahl an Entscheidungsbäumen im Ensemble.

Die *variable importance measures* (VIM) (LIAW & WIENER 2002) dienen zur Identifikation der Prädiktoren mit dem geringsten Einfluss auf den OOB error (Abb. 38). Es wurden die laut VIM schwächsten Prädiktoren Distanz oberhalb Fels, Wald auf Aufschüttung, Felsband und Schuttwald sukzessiv entfernt, bis keine Veränderung des OOB error mehr feststellbar war. Auf diese Weise werden einfacher strukturierte und leichter interpretierbare Modelle erstellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Methoden der VIM mit Unsicherheiten behaftet sein können (STROBL ET AL. 2007). Aus diesem Grund sind nur diejenigen Variablen von der endgültigen Modellgenerierung ausgeschlossen worden, die in den Trainingsdaten sehr selten vertreten sind und die von den unterschiedlichen *Rankings* einheitlich als schwache Prädiktoren ausgewiesen wurden (HERBST & MOSIMANN 2008).

Die Klassen des Wasserspeichervermögens liegen in der Stichprobe unterschiedlich häufig vor. Daraus resultierten im Basismodell für die Prognose derjenigen Klassen hohe Fehlerraten (z.T. $> 80\%$), für die in den Trainingsdaten nur relativ selten Fälle vorliegen (≤ 40 mm, 161-200 mm nFK) (CHEN ET AL. 2004). Mit Hilfe der Parameter *classwt*, *sampsiz*e und *cutoff* (Tab. 16) wird versucht, RF an diese unregelmäßige Stichprobenverteilung anzupassen, um so den OOB error zu reduzieren. Die Minimierung der Fehlerraten für die Klassen ≤ 40 mm und 41 - 80 mm nFK hatte dabei Priorität, da RF die sehr trockenen und trockenen Standorte möglichst verlässlich ausweisen soll.

Die Anpassung des RF hat gezeigt, dass die Kalibrierung letztendlich einen Kompromiss zwischen der Reduktion der Fehlerraten der einzelnen Klassen und des OOB error für das gesamte Ensemble darstellt. Wird die Fehlerrate einer Klasse deutlich reduziert, steigt der OOB error in der angrenzenden Klasse und für den gesamten RF zumeist deutlich an. Entgegen den Aussagen von LIAW & WIENER (2002) und den Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen (HERBST & MOSIMANN 2008), reagiert RF im vorliegenden Fall sensibel auf die Einstellungen der Modellparameter.

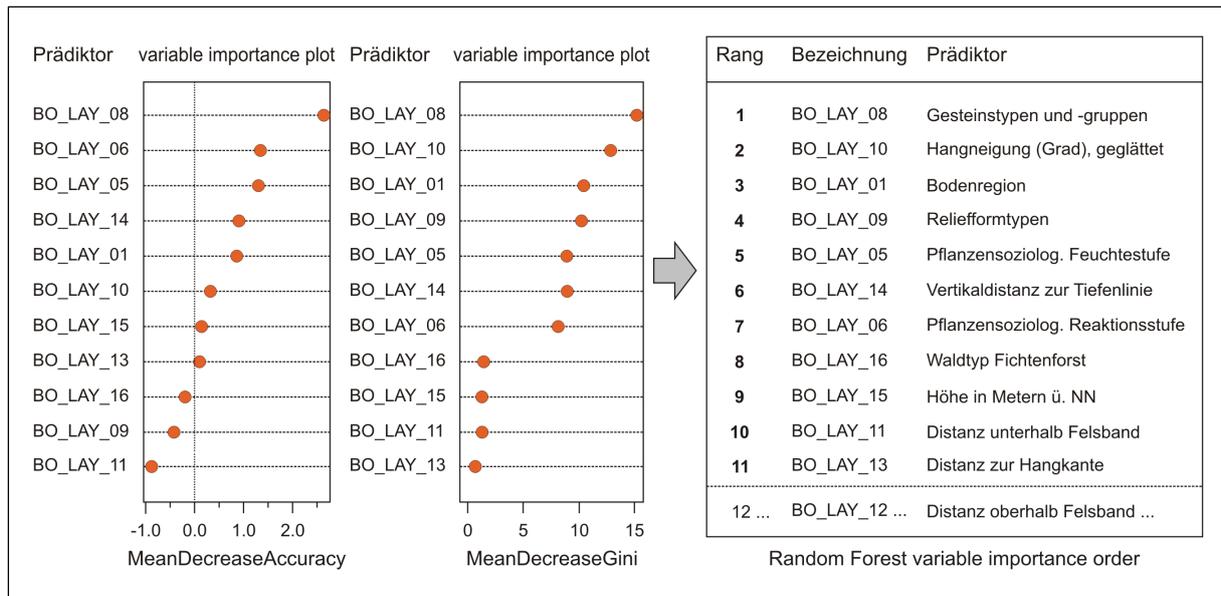


Abb. 38 Variable importance measures des kalibrierten Random Forest-Modells für die Prognose der nFK.

Der *OOB error* schwankt für verschiedene Einstellungen um bis zu 20 %. Dies gilt insbesondere für *mtry*, für *classwt*, *sampsiz*e und *cutoff*, sowie deren Kombination zur Minimierung der Klassenfehler. Aus diesem Grund beschränkt sich die Kalibrierung der endgültigen RF auf die Parameter *ntree*, *mtry*, *sampsiz*e und den Ausschluss schwacher Prädiktoren mit der *VIM*.

6.1.2 Modellparameter und Einschätzung der Modellqualität

Tab. 17 fasst Parameterwerte und Gütemaße der kalibrierten RF zusammen. Mit rund 60 % fallen die *OOB error* für beide RF vergleichbar hoch aus und entsprechen damit der Fehlerquote der Prognose von Gründigkeit und Skelettgehalt nach HERBST & MOSIMANN (2008). Die Modellkalibrierung ermöglichte eine Verringerung der *OOB error* um 10 - 15 % gegenüber den Basismodellen. Die hohen Fehlerraten selten auftretender Klassen in den *OOB*-Daten konnten aber nur geringfügig reduziert werden, ohne den *OOB error* zu erhöhen.

Random Forest-Modelle	Modellparameter					Gütemaße		
	n Trainingsdaten	n Prädiktoren	<i>ntree</i>	<i>mtry</i>	<i>treesize</i> (mean/max)	<i>OOB rr</i> (%)	<i>OOB error</i> (%)	<i>test set rr</i> (%)
Nutzbare Feldkapazität	129	11	1000	3	47 / 64	39,5	60,5	92,2
Feldkapazität	129	11	1000	2	37 / 56	38,8	61,2	87,6

Tab. 17 Modellparameter der kalibrierten Random Forest-Modelle für die Prognose von nFK und FK.

Parameter: *ntree*: Ensembleumfang, *mtry*: Anzahl zufällig getesteter Prädiktoren je Knoten, *treesize*: mittlere und maximale Größe der E.-Bäume. Gütemaße: *OOB rr*: Trefferquote der out-of-bag Prognosen, *OOB error*: Fehlerquote der out-of-bag Prognosen, *Test set rr*: Anteil der Trainingsdaten, bei denen die nFK- und FK-Klassen mit der Prognose des Random Forest übereinstimmen. Hierbei handelt es sich um keine unabhängige Validierung.

RF weist für die nFK-Klasse 41 - 80 mm den geringsten *OOB error* auf (Abb. 37). Für die Klasse ≤ 40 mm ergibt sich auf Grundlage der *OOB* Fälle die höchste Fehlerrate. Die Abweichung der zugewiesenen nFK beträgt hier aber in den meisten Fällen nur eine Klasse. Die Fälle mit geringem Wasserspeichervermögen (≤ 80 mm nFK) sind damit insgesamt relativ sicher erfasst.

Während die Trefferquote der RF für die *OOB*-Fälle (*OOB rr*) mit rund 40 % relativ gering ist, zeigt die Trefferquote der gesamten Trainingsdaten (*test set rr*) ein anderes Ergebnis. In über 90 % der Fälle stimmt die Prognose des RF mit den tatsächlichen nFK-Werten der Trainingsdaten überein. Die Klassenfehler liegen immer unter 15 %. Bei diesen Ergebnissen gilt es aber restriktiv zu berücksichtigen, dass sie nur Hinweise auf die Kalibrierungsgüte der Klassifizierungsregeln bezogen auf die Stichprobe liefern. Hieraus lassen sich keinerlei Rückschlüsse auf die flächenbezogene Plausibilität der Klassifizierungsregeln ziehen. Die wissensbasierte Modellentwicklung hat zudem gezeigt, dass die Stichproben nur für wenige Prädiktorenkombinationen die Realität der standörtlichen Wasserversorgungssituation repräsentativ abbilden.

Die *VIM* weisen Gesteinstypen, Hangneigung, Bodenregion, Reliefformtypen und die pflanzenökologische Feuchtestufe als maßgebliche Prädiktoren aus. Dieses Ergebnis ist sehr plausibel und deckt sich im Wesentlichen mit den Erkenntnissen aus der wissensbasierten Modellentwicklung (Kap. 5.2).

Bei der zusammenfassenden Einschätzung der Qualität der erlernten Klassifizierungsregeln der RF sind noch weitere wichtige Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu zählen:

1. Die Qualität der Trainingsdaten ist beschränkt. Sie enthalten Ausreißer. Die Häufigkeitsverteilung der nFK-Klassen ist in der Stichprobe ungleichmäßig.
2. RF kann Ausreißer in den Trainingsdaten nicht ohne weiteres identifizieren.
3. Bei kleinen Stichproben können Ausreißer einen hohen Anteil haben und das Ergebnis stark verfälschen. Dieser Umstand kann von RF nicht erkannt werden.
4. RF erkennt nicht, ob die Stichprobe entsprechend der Flächenanteile der verschiedenen Prädiktorkombinationen repräsentativ verteilt ist.
5. Nicht alle wichtigen Zusammenhänge zwischen den Prädiktoren und der Wasserspeicherfähigkeit werden von der Stichprobe ausreichend wiedergegeben.

Die erlernten Klassifizierungsregeln eines RF können nur den Genauigkeitsgrad erreichen, der durch die Repräsentativität der Stichprobe, die Qualität der Datenstruktur und durch die Erkennbarkeit der Zusammenhänge zwischen den Prädiktoren und der Zielgröße innerhalb der Trainingsdaten bestimmt wird (HERBST & MOSIMANN 2008). Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus der wissensbasierten Modellentwicklung über Inkonsistenzen in den zur Verfügung stehenden Trainingsdaten, ist bei vielen Prognosen der Wasserspeicherfähigkeit mit den kalibrierten RF-Modellen von einer geringen Aussagesicherheit und einer geringen flächenbezogenen Repräsentativität der teilautomatisierten Vorhersagen auszugehen.

6.2 Die Karten der Wasserspeicherfähigkeit als Ergebnis der Random Forest-Modellierung

In diesem Kapitel werden die Ergebniskarten der teilautomatisierten Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit mit Random Forest vorgestellt. Neben einer kleinmaßstäbigen Übersichtskarte werden repräsentative Beispiele für die Prognose der nFK aus dem Lösshügelland und aus dem Tafel- und Faltenjura detailliert dargestellt und diskutiert. Die Lage der drei Kartenausschnitte ist der Übersichtskarte (Abb. 39) zu entnehmen. Die Prognosekarten sind im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html vollständig einsehbar.

6.2.1 Übersicht zur Gesamtkarte

Abb. 39 zeigt die Ergebnisse der teilautomatisierten Prognose der nFK für das gesamte Untersuchungsgebiet. Für jedes Waldareal liefert die Prognosekarte zwei Informationen:

1. Merkmalsausprägung: Prognostizierte Klasse der nFK.
2. Aussagesicherheit: Einstufung auf Grundlage der *class probability estimates* (BREIMAN 2004). Sie entsprechen dem Häufigkeitsanteil der Entscheidungsbäume des RF, die für die Ausgabe der jeweiligen Klasse als Prognose gestimmt haben.

Die Ergebnisse geben in der Gesamttendenz eine räumliche Verteilung der nFK wieder, wie sie auch die wissensbasierte Modellvorhersage abbildet (Kap. 5.4.1):

- Hohe nFK (bläulich) in den Regionen des Lösshügellandes. RF weist damit für die riss- und wärmzeitlichen Lössse die erwartet hohen Wasserspeicherfähigkeitswerte plausibel aus.
- Überwiegend geringe nFK (blassgelb) auf Teilen der Plateauflächen im Tafeljura sowie verbreitet in den Hanglagen des Tafel- und Faltenjura.
- Größere Areale mit mittlerer nFK (grünlich) in den flacheren Hangbereichen und auf den Plateaus im Bereich anstehender Tonmergel sowie auf den Tafeljura-hochflächen einhergehend mit der Verbreitung von Decklehmen.

Daneben sind aber auch markante Unterschiede der teilautomatisierten Prognose mit RF im Vergleich zur wissensbasierten Vorhersage feststellbar:

- Für auffallend große Flächen auf den Plateaus prognostiziert RF eine sehr geringe nFK (rötlich). Dies entspricht nicht der Realität.
- RF prognostiziert auf den Plateaus und in den Hanglagen weit verbreitet mittlere nFK-Werte (grünlich) der Böden auf Kalk. Damit fällt die Vorhersage der nFK in Anbetracht der lokal vorherrschenden Substratbedingungen häufig zu hoch aus.
- Im Faltenjura weist RF v.a. für die in den steileren Hangbereichen verbreitet flachgründigen und skelettreichen Böden zu selten sehr geringe nFK-Werte (rötlich) aus.

Die Flächenbilanzierung zeigt, dass RF ebenso wie das wissensbasierte Modell für über 50 % der Waldfläche eine geringe oder sehr geringe Wasserspeicherfähigkeit der Böden prognostiziert (Abb. 41). Mittlere und hohe Werte der nFK werden zusammengenommen für etwa ein Drittel der Waldfläche vorhergesagt. Hier besteht ein deutlicher Unterschied zur wissensbasierten Vorhersage, die diese Werte nur für rund 10 % der Waldfläche ausweist.

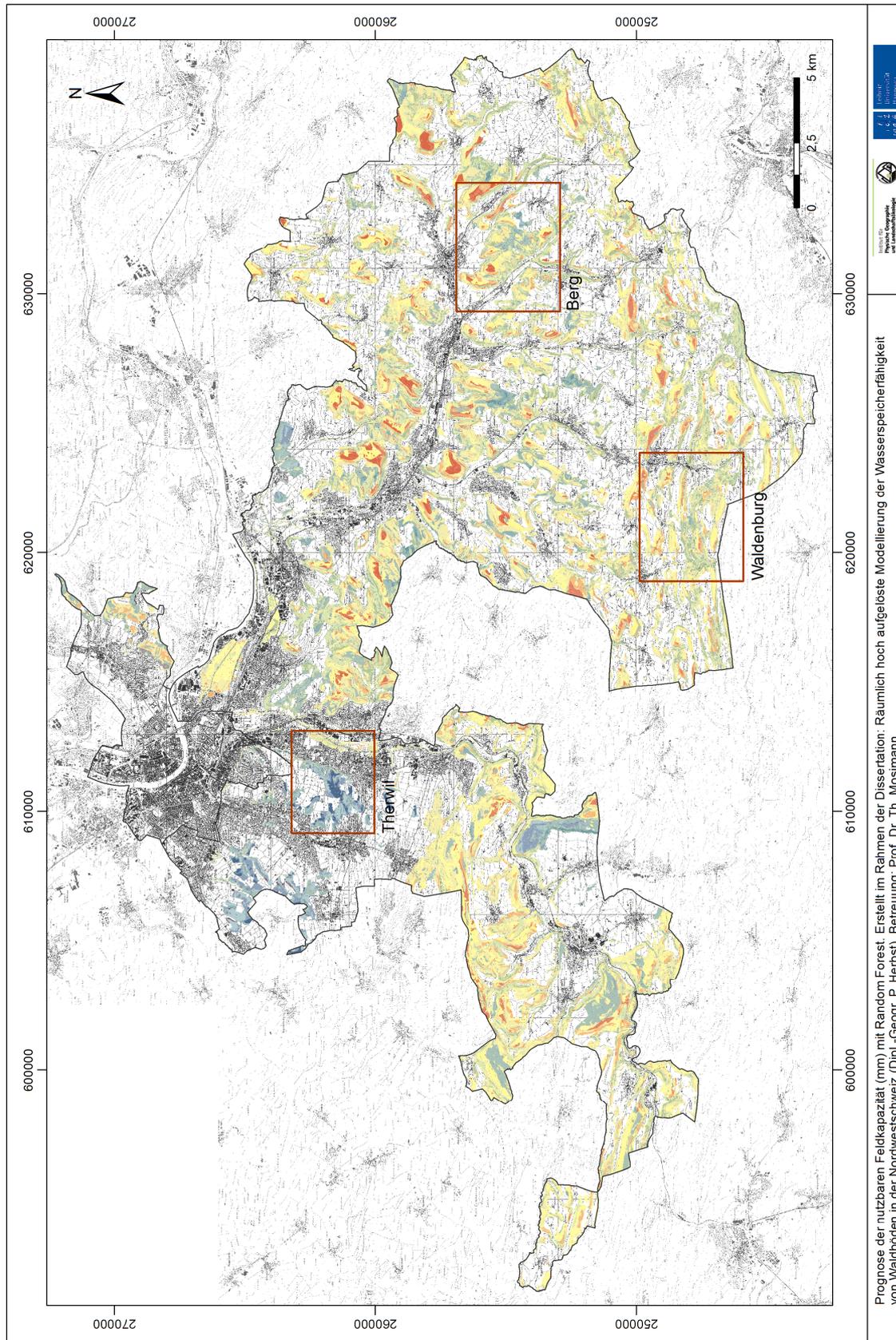


Abb. 39 Ergebniskarte der Prognose der nutzbaren Feldkapazität der Waldböden mit Random Forest in den Kantonen BL und BS. Die Legende (Abb. 40) wird auf der folgenden Seite dargestellt. Die roten Rahmen markieren die Lage der Kartenausschnitte der Abb. 43 u. 44. Die Gesamtkarte kann im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html in hoher Auflösung betrachtet werden. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000 (SWISSTOPO).

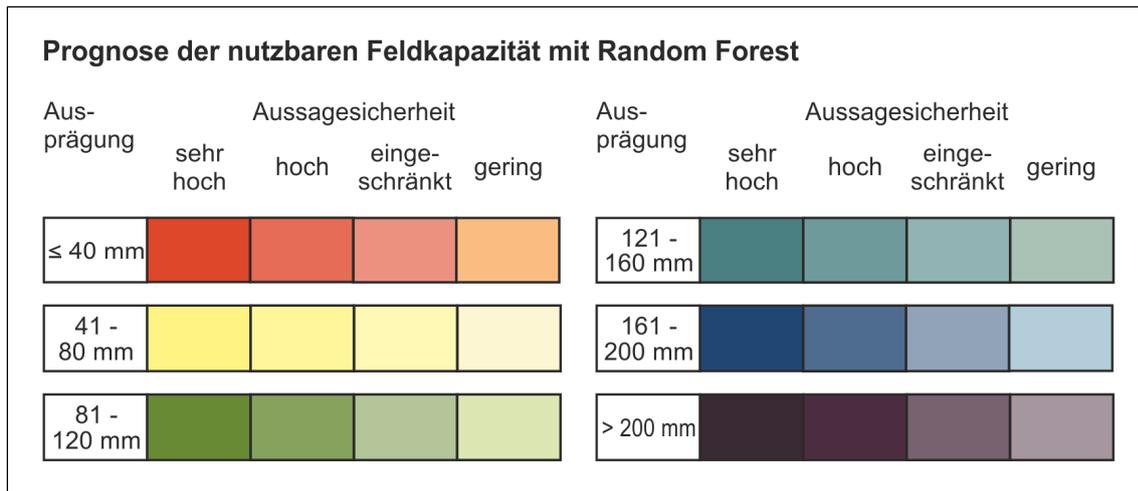


Abb. 40 Legende der Ergebniskarten der Prognose der nutzbaren Feldkapazität mit Random Forest.

Die Flächenanteile mit sehr hoher nFK sind bei beiden Modellprognosen identisch. RF weist im Gegensatz zum wissensbasierten Modell auch dann Prognosen aus, wenn die Einstufung der Wahrscheinlichkeit (*class probability estimates (CPE) < 50 %*) (BREIMAN 2004, LIAW & WIENER 2010) eine geringe Aussagesicherheit ergibt. Dies ist bei 65 % der Waldflächen der Fall und betrifft hauptsächlich die Klassen der mittleren und hohen nFK. Für diese Areale ist die Belastbarkeit der Prognose demnach unabhängig von der räumlichen Plausibilität gering.

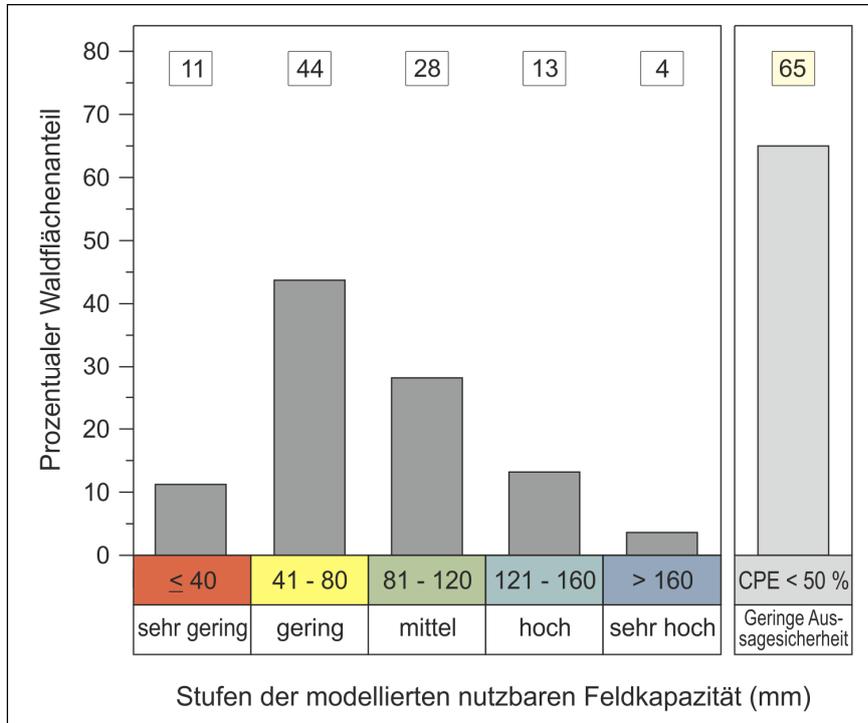


Abb. 41 Flächenanteile der Stufen der prognostizierten nutzbaren Feldkapazität (Random Forest-Prognose). In den weißen Kästen stehen die prozentualen Anteile der einzelnen Klassen bezogen auf die gesamte Waldfläche (rund 204 km²). Das hellgelb hinterlegte Feld gibt den prozentualen Waldflächenanteil an, bei dem die Prognosen eine geringe Aussagesicherheit aufweisen (*CPE < 50 %*). Die Angaben zur FK sind dem Anhang entnehmbar.

6.2.2 Prognosen der nFK in den drei Bodenregionen

Abb. 42 zeigt die Flächenbilanzen der prognostizierten nFK mit RF in den drei Bodenregionen. Die Unterschiede sind groß. Entsprechend der weitverbreiteten riss- und wärmzeitlichen Lössen weisen rund 90 % der Waldareale im Lösshügelland erwartungsgemäß eine hohe bis sehr hohe nFK auf. Im Jura treten die Prognosen mit einer sehr geringen und geringen nFK auf mehr als der Hälfte der Waldfläche auf. Dieser hohe Flächenanteil ist plausibel, da Böden mit geringem Wasserspeichervermögen auf den Plateauflächen und in den Hanglagen im Tafel- und Faltenjura weitverbreitet sind.

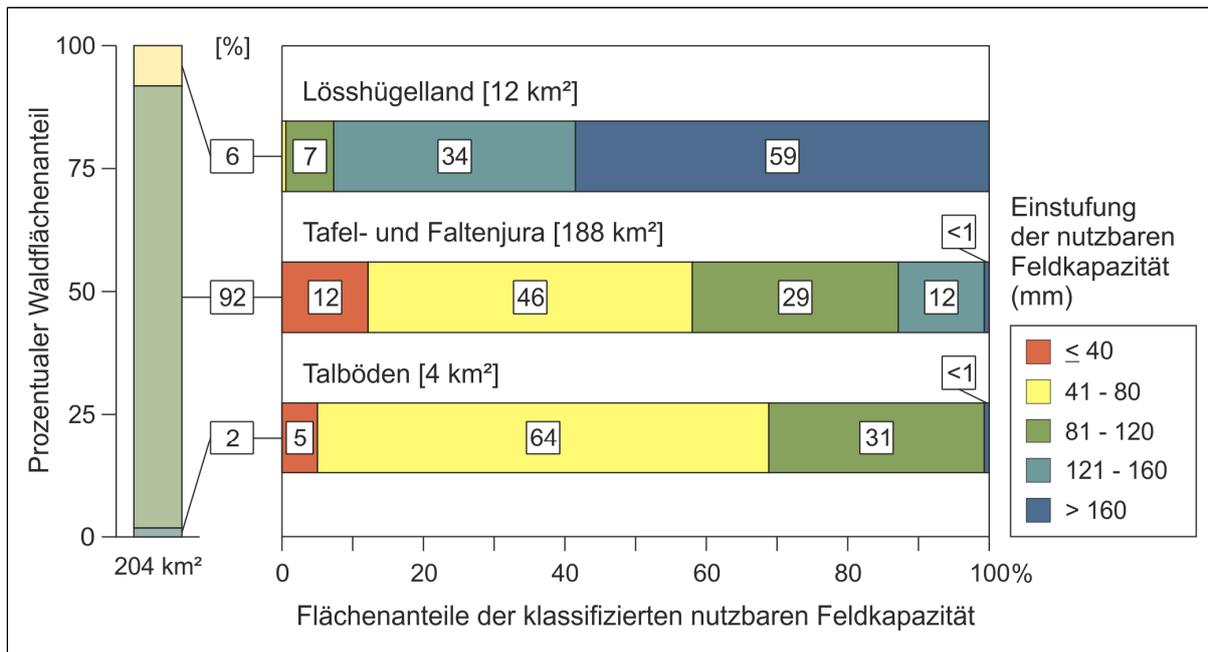


Abb. 42 Flächenbilanzen der nutzbaren Feldkapazität prognostiziert mit Random Forest in den Bodenregionen. Die Flächenbilanzen für die Feldkapazität sind im Anhang dokumentiert.

Hingegen prognostiziert RF für mehr als ein Drittel der Waldareale nFK-Werte über 80 mm. Dieser Flächenanteil ist auffallend hoch. Größere Areale mit mittlerem bis hohem Wasserspeichervermögen der Böden zeigen im Jura überwiegend die Lagen der Lössen und Decklehme auf den Hochflächen sowie die anstehenden Tonmergel und Tone auf den Plateaus und in den Hangbereichen. Laut geologischer Information stocken im Jura nur ca. 15 % der Wälder auf diesen Ausgangssubstraten der Bodenbildung. Damit ist der hohe Flächenanteil (41 %) der von RF prognostizierten mittleren und hohen nFK-Werte nicht nachvollziehbar.

Für rund 70 % der Talböden weist RF eine geringe bis sehr geringe nFK aus. Diese Einstufung ist aufgrund der vorherrschenden Schottersubstrate nachvollziehbar. Die Prognose von 81 - 120 mm nFK auf einem Drittel der Schotterebenen ist hingegen unerwartet hoch. Nur die Aufschüttungsböden speichern in den Schotterebenen viel Wasser. Die Angaben zu den Aufschüttungsböden sind in der geologischen Karte aber unsystematisch oder fehlen ganz. RF kann die Verbreitung der gestörten Böden der Schotterebenen nicht korrekt wiedergeben. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die prognostizierten nFK-Werte 81 - 120 mm für einen Teil der Fläche zu hoch ausfallen.

Beispielgebiet aus dem Lösshügelland (Hinteres Bruderholz)

Der Kartenausschnitt zeigt die Waldflächen des Bruderholzes östlich von Therwil (Abb. 43). Ausgehend von den Böden im Löss mit einer sehr hohen nFK auf den flachen Rücken (Flur Allmend), nehmen die nFK-Werte Richtung der Terrassenstufen tendenziell leicht ab. Die überwiegend steilen Hangbereiche der Terrassenstufen mit den dort auftretenden Schotterbändern und den mit Geröllen vermischten umgelagerten Lösslehmen zeichnen sich deutlich ab. Hier wird eine mittlere nFK prognostiziert. Die Verteilungsmuster sind plausibel.

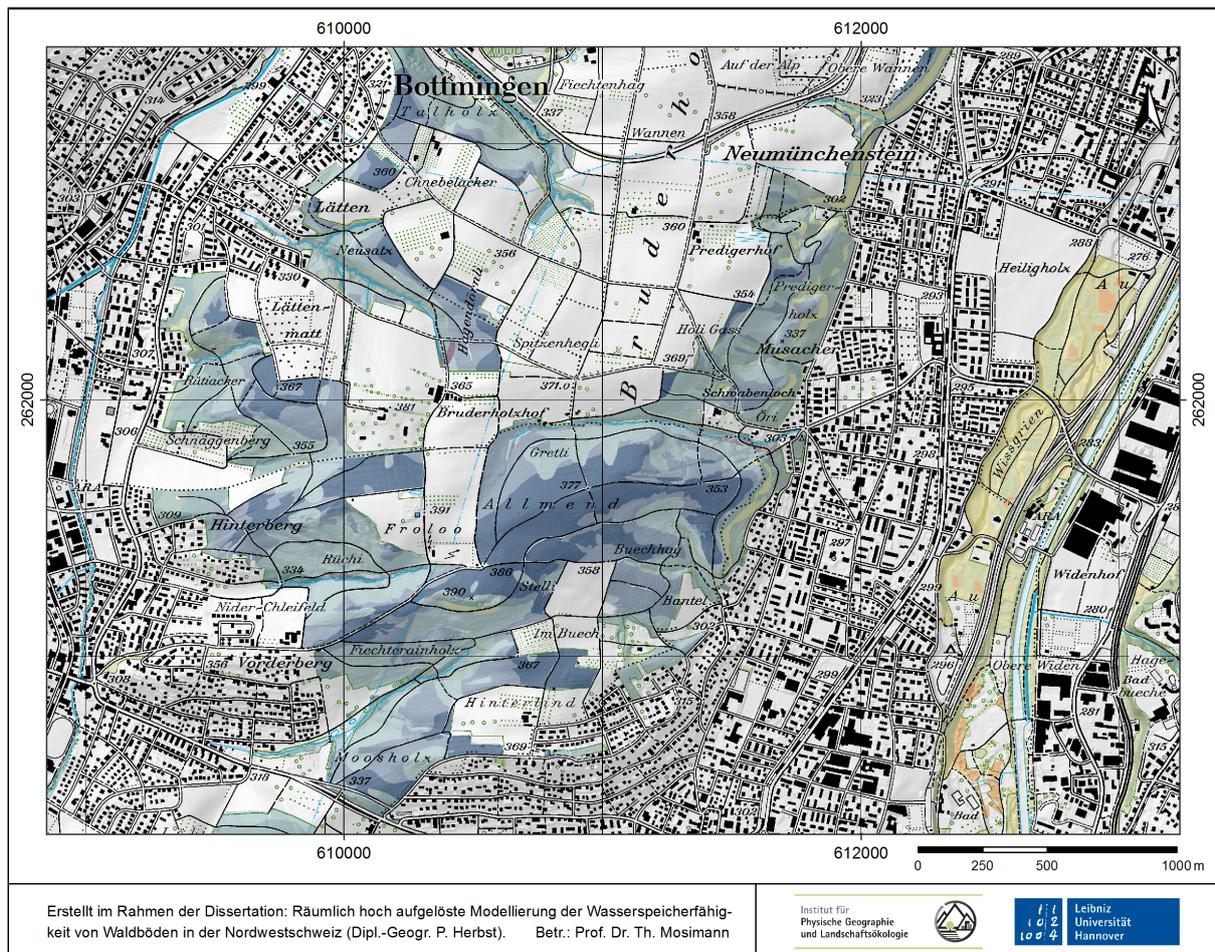


Abb. 43 Prognose der nutzbaren Feldkapazität mit Random Forest im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz. Die Legende wird in Abb. 40 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1067 Arlesheim (SWISSTOPO).

Desweiteren ist festzuhalten, dass RF auch für die Tiefenbereiche mittlere nFK-Werte modelliert. In den Tiefenbereichen sind auch kleinflächige Prognosen sehr hoher nFK (violett) erkennbar. Diese sind mit Hanglagen verortet, die ein starkes Gefälle aufweisen. Hierbei handelt es sich um Fehlprognosen, da in den steilen Hanglagen die Erosion der abtragsgefährdeten Löss- und Lösslehme in der Regel zu nFK-Werten unter 200 mm führt.

Weder die Reliefformtypen noch die tertiären Mergel oder die pflanzensoziologischen Feuchtestufen zeichnen sich deutlich in der räumlichen Differenzierung der Wasserspeicherfähigkeit ab. So werden die Divergenzbereiche mit ihrem reduzierten Wasserspeichervermögen von RF nicht mit einer geringeren nFK belegt. Auch die Waldböden auf tertiären

Mergeln gemäß geologischer Karte weisen trotz der lokal zu erwartenden geringeren Gründigkeit und erhöhten Steinanteile keine niedrigeren nFK-Werte als die Lösslagen auf. Die klassifizierte Hangneigung scheint in den Entscheidungsregeln des RF eine hohe Bedeutung zu haben. Der Übergang von sehr hoher zu hoher nFK in den flachen Hangbereichen, die Prognose mittlerer nFK in den steilen Hängen entlang der Terrassenstufen und die Differenzierung zwischen mittlerer, geringer und sehr geringer nFK bei den Böden auf den Schotterebenen des Birstales sind hierfür deutliche Hinweise. Diese Beobachtungen decken sich auch mit den *VIM* (Kap. 6.1.1, Abb. 38), welche die Hangneigung als wichtigen Prädiktor ausweisen. Damit differenziert RF näherungsweise kleinräumige Variationen der Wasserspeicherfähigkeit wobei mit zunehmender Hangneigung tendenziell geringere nFK-Werte abgeschätzt werden. Diese Differenzierung ist grundsätzlich nachvollziehbar.

Beispielgebiet aus dem Tafeljura (Diepflingen - Tecknau)

Im Tafeljura lassen sich anhand des Kartenausschnittes (Abb. 44) auf den Tafeljura-hochflächen und in den Hangbereichen folgende Grundmuster der RF Prognosen erkennen:

- Großflächige Prognosen sehr geringer nFK (rötlich) in den vorderen Bereichen der stark zerlappten Tafeljurahochflächen.
- Ausweisung geringer nFK (blassgelb) mit überwiegend geringer Aussagesicherheit beschränkt sich weitgehend auf die anstehenden Kalke auf den Plateaus.
- Vorhersage mittlerer (grünlich) bis hoher (grün-bläulich) nFK im Bereich anstehender Tonmergel und Decklehme auf den Hochflächen.
- Modellierung mittlerer nFK (grünlich) für den Großteil der Hanglagen, mit vereinzelt scharfen Wechseln hin zu bänderartigen Arealen mit sehr geringer nFK (rötlich).

Die Prognosen sehr geringer nFK auf den Tafeljurahochflächen und in einigen bänderartigen Hanglagen machen rund 15 % der Waldfläche des Kartenausschnittes aus (Abb. 45). Dieser Flächenanteil ist unrealistisch hoch. RF unterschätzt verbreitet das Wasserspeichervermögen der Böden auf den Plateaus. Ein möglicher Grund besteht darin, dass sich die Stichprobe der Bodenaufschlüsse im Kalk auf den Plateaus flachgründige Rendzinen enthält. RF ist damit auf eine Stichprobe mit einem hohen Häufigkeitsanteil sehr geringer nFK-Werte (≤ 40 mm) kalibriert, der aufgrund der Deckschichten aber nicht flächenrepräsentativ ist. Durch die Deckschichten und Kalkverwitterungsschichten ist auf einem hohen Flächenanteil der Plateaus eine nFK von 41 - 80 mm deutlich wahrscheinlicher als eine nFK unter 40 mm (Kap. 5.3.3).

Hingegen ist der Flächenanteil geringer nFK (41 - 80 mm) für weite Areale der Kalke und Kalkmergel auf den Plateaus nachvollziehbar. Dies gilt auch für die Prognose hoher nFK im Bereich der anstehenden Tonmergel und Decklehme. Aufgrund der überwiegend sehr geringen Skelettgehalte und der vorherrschenden schluffig-lehmigen bis tonigen Bodenarten können diese viel Wasser speichern. Hier decken sich die Ergebnisse im Wesentlichen mit denen der wissensbasierten Modellierung.

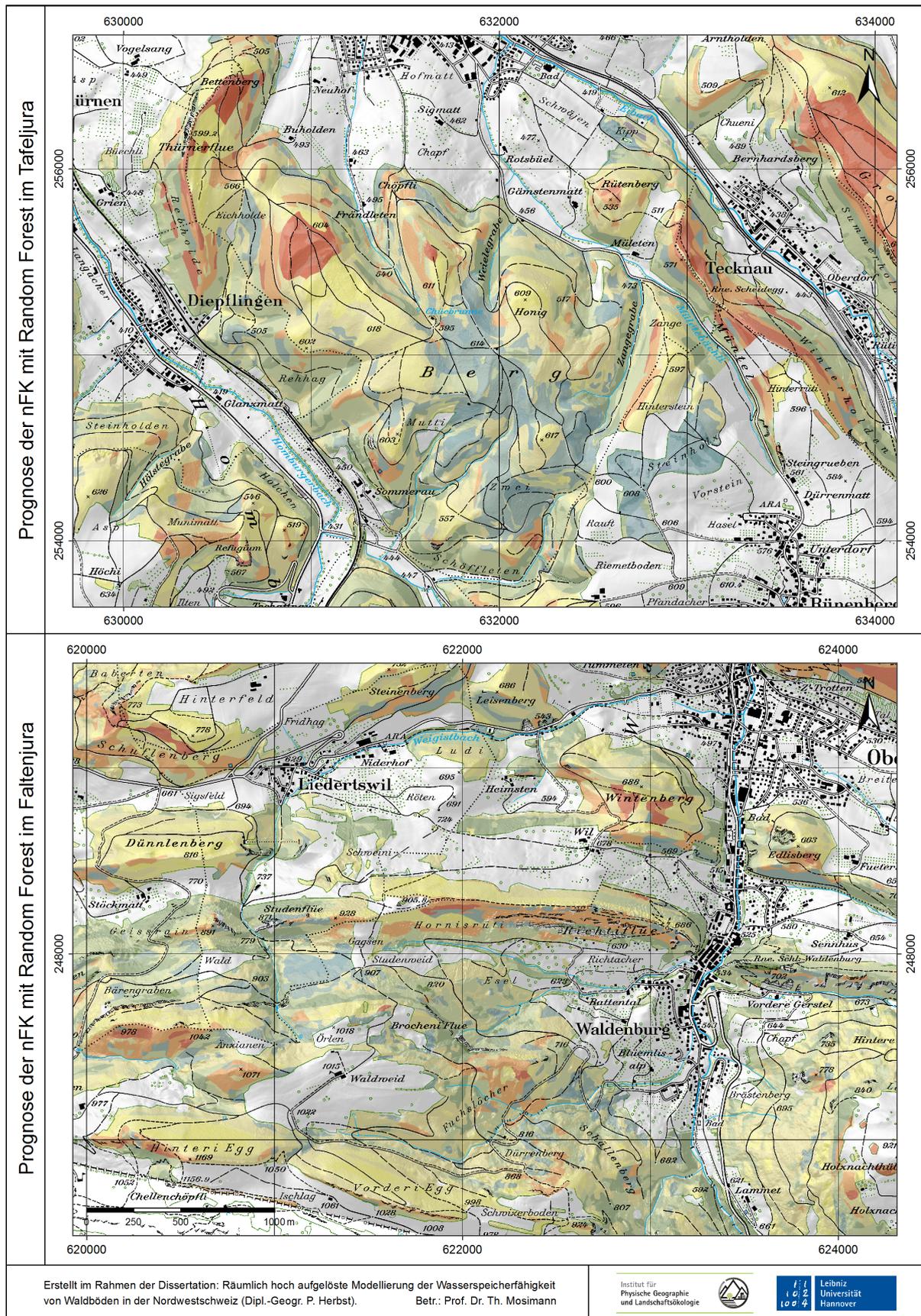


Abb. 44 Prognose der nutzbaren Feldkapazität mit Random Forest für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura). Die Legende wird in Abb. 40 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blätter 1068 und 1088 (SWISSTOPO).

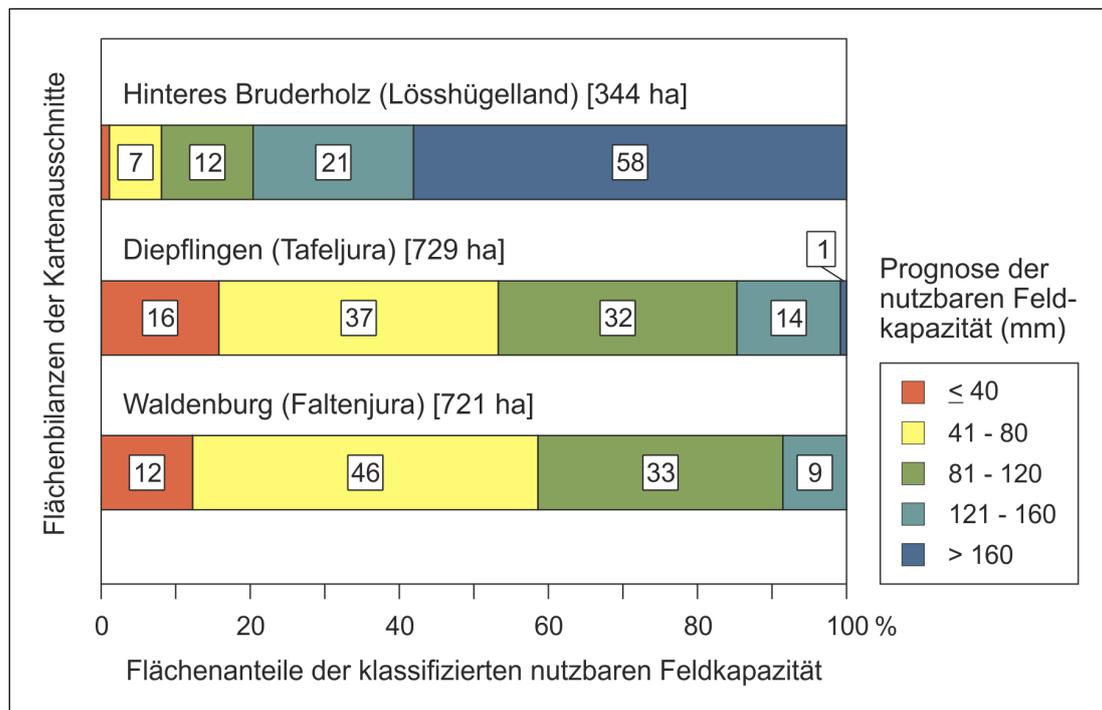


Abb. 45 Flächenbilanzen der prognostizierten nutzbaren Feldkapazität (Random Forest) für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura (Abb. 43, 44).

Die Steilhänge, die steileren Normalhänge (> 25 Grad) sowie die Schuttwälder unterhalb von Felsbändern sind zumeist mit einer mittleren nFK belegt. Hier ist in den überwiegenden Fällen von einer Überschätzung des Speichervermögens durch RF auszugehen. Das gilt auch für die modellierte hohe nFK in einzelnen Hanglagen. Flachgründige und skelettreiche Böden sind in diesen Hangbereichen weit verbreitet. Das geringe Feinbodenvolumen und die hohen Steingehalte bedingen hier in der Regel ein geringes Wasserspeichervermögen. Der Modellfehler kann für Steilhänge und Schuttwälder auf die Häufigkeitsverteilung der nFK-Werte in der Stichprobe zurückgeführt werden. Die Bodenprofile weisen überwiegend mittlere bis hohe nFK-Werte auf, obwohl in diesen Hanglagen mit flachgründigen Böden und hohen Steingehalten überwiegend geringe Wasserspeicherfähigkeitswerte zu erwarten sind. Hier bildet die Stichprobe die realen Bedingungen nur ungenügend ab. Darüber hinaus können bisher weder einzelne Stichprobenfälle noch bestimmte Prädiktorenkombinationen als Ursache für die verbreitete Überschätzung der nFK durch RF in den genannten Hangbereichen identifiziert werden.

Desweiteren sind in den Jurahängen unter variierenden Reliefbedingungen und Neigungsverhältnissen bänderartige Prognosen sehr geringer nFK (≤ 40 mm) feststellbar. Diese verlaufen zum Teil quer zur Gefällrichtung und wechseln mit Prognosen mittlerer (81 - 120 mm) und hoher nFK-Werte (121 - 160 mm). Hangrücken, Flachhänge, Hangverflachungen und Hangmulden sind Beispiele betroffener Reliefsituationen. Diese kleinräumigen Verteilungsmuster der RF-Vorhersagen variieren ohne erkennbaren Zusammenhang mit den Ausprägungen der Standortfaktoren und sind deshalb nicht nachvollziehbar.

Beispielgebiet aus dem Faltenjura (Waldenburg - Liedertswil)

Die Flächenbilanzierung der nFK zeigt zwischen Tafel- und Faltenjura keine markanten Unterschiede (Abb. 41). Prognosen sehr geringer nFK sind im Kartenausschnitt auf wenige Waldareale beschränkt. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Steilhänge, steilere Hanglagen (> 25 Grad) auf Kalk, Hangrücken und steile Scheitelbereiche. Diese Prognosen sind nachvollziehbar, umfassen aber nicht alle Hanglagen, bei denen eine sehr geringe nFK zu erwarten ist (z.B. Hangbereiche direkt unterhalb von Felsbändern). Mittlere und hohe nFK-Prognosen unterhalb von Felsen beim Bärengraben und an der Studenflüe sind demnach Beispiele für Modellfehler. Zudem liefern sie einen Hinweis auf nicht nachvollziehbare Variationen der RF-Vorhersagen unter sehr ähnlichen Standortbedingungen. Ein weiteres Beispiel ist die starke Variation der nFK zwischen sehr geringen und hohen Werten in Teilen der Steilhänge.

In den steileren Oberhängen der Bergeleiten dominieren auf großen Flächen geringe nFK-Werte. Diese Einstufung ist plausibel. In den mittleren Hanglagen und in den unteren Hangbereichen sind hingegen überwiegend Vorhersagen mittlerer nFK festzustellen. Diese hängen mit den dort anstehenden Tonmergeln und tiefgründigeren Deckschichten zusammen und sind deshalb nachvollziehbar. In steilen Hanglagen (> 25 Grad) auf Kalk weist RF mitunter mittlere Werte der nFK (81 - 120 mm) aus. In diesen Fällen wird das Wasserspeichervermögen von RF tendenziell überschätzt. Als Ursache für diese Inkonsistenz, können weder Ausreißer in der Stichprobe noch bestimmte Prädiktorenkombinationen ausgemacht werden.

6.2.3 Lagebezogene Übereinstimmung von Modellprognosen und Bodenprofilaten

Die teilautomatisierten Prognosen werden mit einer lagebezogenen Extraktion auf die untersuchten Bodenprofile übertragen. Ein punktueller Vergleich der prognostizierten nFK mit der beobachteten nFK und die Berechnung einfacher Gütemaße ist somit möglich (Tab. 18). Die Prognosen der nFK zeigen mit rund 75 % eine hohe lagebezogene Übereinstimmung mit dem Wasserspeichervermögen der Waldbodenprofile des Kantons Basel-Landschaft. Differenziert nach Bodenregion ist die Übereinstimmung im Lösshügelland am höchsten und bei den Talböden am geringsten. Desweiteren zeigen die Ergebnisse für *N1* und *P1* in allen Bodenregionen vergleichbare Werte und besonders im Jura fällt der systematische Fehler (*ME*) sehr gering aus. Damit zeigt die Auswertung der punktuellen Übereinstimmung keinen generellen Trend der Über- oder Unterschätzung der nFK durch RF.

In rund einem Viertel der Fälle weichen die Prognosen von den beobachteten nFK-Werten der Profile ab. Eine wesentliche Ursache liegt in der Variabilität der verbreiteten Deckschichten auf den Jurahängen, deren Lehm- und Steinanteile mitunter kleinräumig ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit schwanken. Zudem wird die Verbreitung dieser Deckschichten vom Prädiktor Gestein nur sehr eingeschränkt wiedergegeben (Kap. 4.2). Die lokalen Substratverhältnisse sind jedoch entscheidend für das Wasserspeichervermögen der erfassten Bodenprofile. Die Variabilität der Bodenverhältnisse im Meterbereich kann mit den

Modellregion	n	Gütemaße			
		RR (%)	N1 (%)	P1 (%)	ME (-)
Kanton Baselland	107	74,8	6,5	6,5	-0,04
Lösshügelland	11	90,1	-	-	-0,18
Jura	90	74,4	6,7	6,7	0,01
Talböden	6	50,0	16,6	16,6	-0,50

Tab. 18 Lagebezogene Übereinstimmung der Prognosen der nutzbaren Feldkapazität von Random Forest mit den klassifizierten Wasserspeichereffektivitätswerten der Waldbodenprofile. Die Profile sind Grundlage der Modellentwicklung. Die Ergebnisse liefern also Hinweise auf die Güte der Modellkalibrierung. Es handelt sich jedoch um keine Validierung anhand unabhängiger Testdaten. Abkürzungen: *RR*: Übereinstimmung (*Recall Ratio*) von Prognose (primäre Ausprägung) und Punktinformation, *N1*: Anteil der Fälle bei denen die Prognose eine nFK-Klasse niedriger ausfällt, *P1*: Anteil der Fälle bei denen die Prognose eine nFK-Klasse höher ausfällt, *ME*: Mean Error (Systematischer Fehler). *ME* zeigt an, um wieviel nFK-Klassen die Prognose im Mittel von denen der Bodenprofile abweicht. Positive und negative Abweichungen können sich ausgleichen.

flächenbezogenen Vorhersagen des RF-Modells aber nicht mehr ausreichend abgebildet werden (SCHOLTEN 2003). Die Stichprobe ist dafür zu klein und die räumliche Auflösung der Prädiktoren zu gering. Dies führt beispielsweise dazu, dass RF auf den Tafeljura-hochflächen die Wasserspeichereffektivität der Böden auf Kalk häufig unterschätzt, weil die verbreiteten Decklehme und Kalkverwitterungsschichten von der geologischen Karte nur unsystematisch und unvollständig wiedergegeben werden. Desweiteren setzt sich die Stichprobe der Bodenaufschlüsse mit sehr geringer nFK im Wesentlichen aus Rendzinen zusammen. Flachgründige Rendzinen sind für die Plateaus und Normalhänge aber nicht flächenrepräsentativ (MOSIMANN 2011). Dieser Zusammenhang kann von RF nicht erkannt werden. Auch aus diesem Grund wird in einigen Fällen die Wasserspeichereffektivität der Bodenprofile auf Kalk von RF unterschätzt, wenn sich die Böden in einer Deckschicht entwickelt haben.

Die bisherige Betrachtung der Ergebniskarten hat gezeigt, dass RF in einigen Hanglagen, wie beispielsweise Steilhängen, steileren Normalhängen (> 25 Grad), konvexen Hangbereichen oder Schuttwaldbereichen unterhalb von Felsbändern die Wasserspeichereffektivität in Anbetracht der dort vorherrschenden Substratbedingungen überschätzt (z.B. anstehendes Festgestein, flachgründige Hangschutte oder skelettreiche Hanglehme). Die Stichprobe der Bodenaufschlüsse in diesen Reliefbereichen weist ein breites Spektrum der nFK-Werte von kleiner 40 mm bis zu 160 mm auf. Dabei überwiegen die Bodenprofile mit mittleren bis hohen Speicherkapazitäten. Damit ist diese Stichprobe nicht flächenrepräsentativ, da flachgründige und skelettreiche Böden mit geringem Wasserspeichervermögen in diesen Hangbereichen wesentlich weiter verbreitet sind. Aufgrund dieser nicht repräsentativen Verteilungsfunktion weist RF auch auf Waldflächen, auf denen Bodenprofile mit geringen nFK-Werten (41 - 80 mm) vorkommen, höhere Wasserspeichereffektivitäten aus.

Insgesamt zeigt die hohe Übereinstimmung der prognostizierten Wasserspeicherkapazität mit den erfassten Bodenprofilen die gute Kalibrierung der RF-Modelle für die verfügbaren punktuellen Bodeninformationen. Daraus lassen sich aber keine belastbaren Aussagen über die flächenbezogene Plausibilität der Prognosen ableiten, da die Stichprobe die realen Verhältnisse des Wasserspeichervermögens für die vielfältigen naturräumlichen Gegebenheiten nur unvollständig und begrenzt wiedergibt. Wie in Kap. 5.4.3 bereits erläutert, muss der durchgeführte Vergleich von Punkt- mit Flächeninformationen sehr kritisch betrachtet werden (LAGACHERIE 2008). Eine quantitative Beurteilung der arealbezogenen Plausibilität von Prognosen mit einer punkthaften Überprüfung ist kaum möglich. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass eine flächenbezogene Prüfung der teilautomatisierten Prognosen noch mehr Standortbedingungen mit kritischen Vorhersagen aufzeigen wird. Die bisherige Betrachtung der Ergebniskarten hat bereits gezeigt, dass die räumliche Plausibilität der Verteilungsmuster, vor allem auf den Plateaus und in den Jurahängen, verbreitet geringer ausfällt als es die hohe Übereinstimmung der RF-Vorhersagen mit den nFK-Werten der Bodenprofile vermuten lässt.

6.2.4 Betrachtung kritischer Bereiche der teilautomatisierten Prognosen und deren mögliche Ursachen

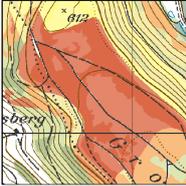
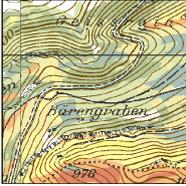
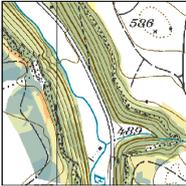
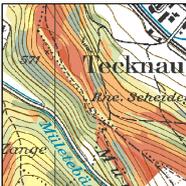
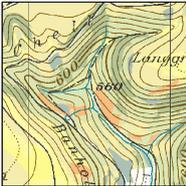
Die vorangegangenen Erläuterungen haben eine Reihe von Situationen offenbart, bei denen RF wenig plausible, teilweise auch falsche Prognosen liefert. In Tab. 19 werden die markantesten Ungenauigkeiten und Fehlprognosen zusammengestellt, der resultierende Fehlerbereich für die nFK-Werte angegeben und die möglichen Gründe sowie etwaige Verbesserungsmöglichkeiten angeführt.

Dabei lassen sich grundsätzlich drei Kategorien kritischer Bereiche der RF-Prognosen unterscheiden:

1. Fehlprognosen (z.B. sehr geringe nFK auf Plateaus, z.T. sogar auf Decklehmen).
2. Prognosen mit eingeschränkter räumlicher Plausibilität der Verteilungsmuster (z.B. bänderartige scharfe Wechsel der nFK-Werte im Hangverlauf).
3. Inkonsistenzen der Vorhersagen unter fast identischen Standortbedingungen (z.B. in Steilhängen und in Hangbereichen unterhalb von Felsbändern).

Die Gründe für die Ungenauigkeiten und Fehler der RF-Prognosen sind vielfältig, können aber in fünf Kategorien zusammengefasst werden:

1. Die geringe Punktdichte (0,6 Bodenprofile pro km²) führt dazu, dass nicht alle relevanten Standortbedingungen im Jura in der Stichprobe erfasst sind.
2. Die Stichproben geben die Realität der Wasserversorgungssituation für viele Prädiktorenkombinationen nur unvollständig oder begrenzt wieder und sind damit nicht flächenrepräsentativ.
3. Die Prädiktoren weisen teilweise Unschärfen der Informationen auf (v.a. zu den Deckschichten in den geologischen Karten)

Kartenausschnitt mit Situationsbeispiel	Ungenauigkeit oder Fehlprognose	Prognose nFK (mm) / Fehler-Bereich	Gründe	Verbesserung möglich
	Große Bereiche der Tafeljura-hochflächen mit einer sehr geringen Prognose der nFK.	≤ 40 / 1 Klasse, auf Deck-lehm bis 3 Klassen.	Heterogene Stichprobenverteilung. Rendzinen haben auf den Plateaus beim dominanten Gesteinstyp Kalk den größten Stichprobenanteil, sind aber nur für einen kleinen Teil der Tafeljurahochflächen repräsentativ.	Ja, durch gezielte Profilaufnahmen im Kalkstein mit Deckschichten.
	In Steilhängen und in Hängen unterhalb von Felsbändern schwanken die Prognosen stark.	41 - 80 bis 161 - 200 / bis zu 3 Klassen.	In beiden Fällen streuen die Werte der kleinen Stichproben stark und beinhalten Ausreißer. Die Punktdichte ist gering. RF liefert dadurch kleinräumig variierende und unsichere Prognosen, beeinflusst u.a. durch die Neigung.	Ja, durch gezielte Profilaufnahmen in Hängen unterhalb der Felsbänder.
	Für große Teile der Hänge auch unterhalb der Felsen werden unrealistisch hohe Werte der nFK modelliert.	81 - 120, seltener 121 - 160 / 2 Klassen, vereinzelt 3 Klassen.	Unterhalb der Felsen überwiegen durch Ausreißer die mittleren Werte der nFK in der flachen Stichprobenverteilung. RF kann Prädiktor Schuttwald nicht berücksichtigen, da Stichprobe zu klein ist. Sonst keine Ursache erkennbar.	Ja, aber nur durch umfangreiche Profilaufnahmen in großflächigen Hangbereichen.
	Bänderartige scharfe Wechsel der modellierten nFK verlaufen im Hang z.T. quer zur Gefällerrichtung.	≤ 40 bis 121 - 160 / 1 bis 2 Klassen.	In einigen Situationen zeichnet sich der Einfluss von Scheiteln, Steilhängen und der klassifizierten Hangneigung ab. Darüber hinaus sind keine Stichprobenfälle oder Prädiktorkombinationen als Ursache ermittelbar.	Nein. Es handelt sich offenbar um Inkonsistenzen der automatisierten Prognosen.
	RF gibt Vorhersagen für Flächen aus, für die laut wissensbasiertem Modell keine Aussage möglich ist.	Vorwiegend 41 - 80 und 81 - 120 / keine Aussage möglich.	RF erkennt nicht, für welche Flächen aufgrund fehlender Fälle, zu hohem Anteil an Ausreißern, nicht repräsentativer Häufigkeitsverteilungen oder wegen zu hoher Heterogenität der Böden keine Aussagen möglich sind.	Nein. Alternativ: Begrenzung der Prognosen auf wissensbasiert vorhersagbare Flächen.

Tab. 19 Gründe für problematische Fälle und Fehler bei der Modellierung mit Random Forest.

- Es werden nicht alle wichtigen Zusammenhänge zwischen den Prädiktoren und der nFK von den Trainingsdaten ausreichend wiedergegeben, so dass maßgebliche Prädiktoren (z.B. Schuttwald, Feuchtestufe *sehr trocken*) nicht in jeder Konstellation von RF erkannt werden.
- Die Klassifizierungsregeln der einzelnen Bäume des RF führen im vorliegenden Fall dazu, dass RF für sehr ähnliche Standortbedingungen schwankende Prognosen ausgibt, da die Mehrheitsentscheide des Ensembles bei den jeweiligen Prädiktorenkombinationen häufig knapp ausfallen (niedrige *CPE*).

Rund 65 % der Waldfläche weisen geringe *CPE*-Werte (BREIMAN 2004) auf (Kap. 6.2.1). Je geringer die *CPE*, desto weniger Entscheidungsbäume des RF haben beim Mehrheitsentscheid für die prognostizierte Klasse gestimmt. Niedrige *CPE* liefern damit einen deutlichen Hinweis darauf, dass hier aufgrund der Uneinigkeit des Ensembles die Aussage-

sicherheit der Prognose gering ist. In diesen kritischen Bereichen können die teilautomatisierten Prognosen nur durch eine gezielte Erhöhung der Anzahl an Bodenaufschlüssen verbessert werden, solange die Ungenauigkeiten nicht dem Algorithmus geschuldet sind (z.B. inkonsistente Prognosen unter nahezu identischen Standortbedingungen). Andernfalls kann in diesen kritischen Bereichen der RF-Prognosen letztendlich nur eine expertenbasierte Einschätzung über die Akzeptanz der räumlichen Plausibilität und der Verteilungsmuster der Prognosen entscheiden, sofern hierfür ausreichendes Erfahrungswissen vorhanden ist.

6.3 Fazit zur teilautomatisierten Modellierung mit Random Forest

Eine flächendeckend hoch aufgelöste Vorhersage der Wasserspeicherfähigkeit ist mit Random Forest in der Nordwestschweiz technisch möglich. Trotz der relativ hohen *OOB error* und der geringen Dichte an Bodenprofilen (0,6 pro km²), kann Random Forest für rund die Hälfte der Waldfläche in der Nordwestschweiz räumlich plausible Prognosen liefern. Die Ausweisung von Gestein, Neigung, Bodenregionen, Reliefformtypen und Feuchtestufen als wichtigste Prädiktoren durch die *VIM* (LIAW & WIENER 2002), bestätigt die grundsätzliche Plausibilität der Entscheidungsbäume des Ensembles für die Prognose der Wasserspeicherfähigkeit. Entsprechend geben die Vorhersagen in der Grundtendenz eine räumliche Verteilung der nFK-Werte wieder, wie sie auch die wissensbasierte Modellierung abbildet. Die teilautomatisierten Vorhersagen stimmen in rund 75 % der Fälle mit den beobachteten Werten von Bodenaufschlüssen lagebezogen überein.

RF liefert verbreitet räumlich plausible Werte und Verteilungsmuster der Wasserspeicherfähigkeit für das Lösshügelland, auf den Tafeljurahochflächen für die Waldböden mit geringer nFK, auf Decklehmen und Tonmergeln und im Faltenjura in den steileren Hanglagen und Oberhängen auf Kalk, Hangrücken und steilen Scheiteln. Starke Variationen der Prognosen in verschiedenen Hanglagen des Tafeljuras mit bänderartigen Wechseln zwischen sehr geringer und hoher nFK, inkonsistente Prognosen unterhalb von Feldbändern, Hangkanten und in Steilhängen sind hingegen Standortsituationen, bei denen RF nur sehr begrenzt nachvollziehbare Ergebnisse liefert. In diesen Bereichen kritischer Prognosen der Wasserspeicherfähigkeit bedarf es des Erfahrungswissens aus lokalen Feldaufnahmen, um die räumliche Plausibilität der Prognosen in Bezug auf die Standortbedingungen bewerten zu können. Dies gilt auch für die Waldflächen, auf denen RF die Prognosen nur mit einer geringen Aussagesicherheit (niedrige *CPE*-Werte) (BREIMAN 2004) abschätzen kann.

Die Ausweisung sehr geringer nFK auf den Plateaus und mittlerer bis hoher nFK unterhalb von Felsen und in Steilhängen, sind Beispiele eindeutiger Fehlprognosen. Insbesondere, da sie keinen erkennbaren Zusammenhang zu Hangneigungen und Feuchtestufen aufweisen. Hier scheitert die teilautomatisierte Prognose an den begrenzten und unvollständigen Stichproben, welche die Bodenverhältnisse und das Wasserspeichervermögen für diese Prädiktorenkombinationen nicht flächenrepräsentativ abbilden. Die Qualität der teilautomatisierten Prognosen wird in dieser Arbeit maßgeblich durch Lücken in der begrenzten Stichprobe und durch die unvollständige Abbildung der Zusammenhänge zwischen den Prädiktoren und dem Wasserspeichervermögen in den Trainingsdaten begrenzt.

Desweiteren kommt erschwerend hinzu, dass die teilweise eingeschränkte Aussagekraft der Prädiktoren (z.B. Deckschichtenproblematik) und die verbreitet große Vielfalt der Bodeneigenschaften (WALTHERT ET AL. 2004) auch innerhalb einheitlicher geologischer Formationen, der Prognostizierbarkeit der Wasserspeicherfähigkeit im Jura weitere Grenzen setzen.

Die Möglichkeiten die teilautomatisierten Prognosen zu verbessern sind allgemein begrenzt. An erster Stelle steht eine Erhöhung der Zahl der verfügbaren Bodenaufschlüsse für bestimmte Prädiktorenkombinationen. Dies ist im Fall der Wasserspeicherfähigkeit sehr aufwendig. Ungenauigkeiten und Fehlprognosen durch variierende Vorhersagen bei sehr ähnlichen Standortbedingungen sind dem Algorithmus geschuldet. Auch hier ist eine Verbesserung der Prognosen ohne eine deutliche Erhöhung der Anzahl an Trainingsdaten zur Abdeckung vielfältiger Prädiktorenkombinationen wohl nicht möglich. Die Neuaufnahme von Bodenprofilen ist aber sehr zeit- und kostenintensiv. RF stellt für einen vielfältigen Naturraum wie dem Jura eine hohe Anforderung an die Stichprobenzahl, die für hoch auflösende Prognosen kaum erfüllbar ist. Damit zeigt sich insgesamt, dass die vorliegende Datendichte von 0,6 Bodenprofilen pro km² nicht ausreicht, um eine voll automatisierte, flächendeckend hoch aufgelöste und belastbare Prognose durchzuführen.

7 Vergleich der wissensbasierten Prognosen mit den Ergebnissen der teilautomatisierten Modellierung

Es liegen flächendeckend wissensbasierte und teilautomatisierte Prognosen der Wasserspeicherfähigkeit vor. Diese Ergebnisse faktorenbasierter Modellierung werden im gesamten Untersuchungsgebiet lagebezogen miteinander verglichen. Hierdurch können mehr Erkenntnisse über die Belastbarkeit und räumliche Plausibilität der Modellvorhersagen gewonnen werden, als durch die stichprobenartige Prüfung anhand von Bodenprofildaten. Der Modellvergleich ermöglicht Flächenbilanzierungen von Übereinstimmungen und Abweichungen der Prognosen, die Analyse der räumlichen Verbreitung der Klassen der nFK und die lagebezogene Berechnung von Gütemaßen. Eine kritische Beurteilung der Modellvorhersagen und Schlussfolgerungen zu den Möglichkeiten und Grenzen für die Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit sind das Ziel dieses Vergleichs.

7.1 Grundlagen für die Vergleichbarkeit der Modellvorhersagen

Die wissensbasierte Modellierung und RF basieren grundsätzlich auf der Entwicklung von Entscheidungsbäumen, welche die Wasserspeicherfähigkeit klassifiziert vorhersagen. Auch die Datengrundlage der faktorenbasierten Modellierung ist in beiden Fällen identisch. Damit sind die Ergebnisse methodisch grundsätzlich miteinander vergleichbar.

Zwei maßgebliche methodische und inhaltliche Modelldifferenzen sind aber beim Vergleich zu berücksichtigen (HERBST & MOSIMANN 2008):

1. Die Angabe der Aussagesicherheit resultiert im wissensbasierten Modell bei genügend großer Stichprobe aus den Häufigkeitsverteilungen an den Endknoten der Entscheidungsbäume. Diese ermöglichen Schlussfolgerungen über die Sicherheit (Wahrscheinlichkeit) des Auftretens einer Merkmalsausprägung. Ist aus den in Kap. 2.3.1 genannten Gründen keine häufigkeitsstatistische Aussage möglich, beruht die Angabe der Aussagesicherheit auf einer rein empirischen Einstufung. Diese stützt sich bei kleinen Stichproben auf die Beurteilung der Häufigkeitsaussage, auf die Bewertung einzeln vorliegender Bodenprofilinformationen und auf umfangreiche Geländeerfahrung zur Abschätzung der Prognostizierbarkeit der Prädiktorenkombinationen (Kap. 5.2.5).
Bei RF erfolgt die Einstufung der Aussagesicherheit auf Basis der *CPE* (Kap. 2.4). Die *CPE* werden für jede Rasterzelle ermittelt und entsprechen dem Anteil der Entscheidungsbäume, welche diejenige nFK-Klasse prognostiziert haben, die vom Ensemble als Modellergebnis ausgewiesen wurde. Aufgrund dieser grundsätzlich unterschiedlichen methodischen Verfahrensweisen, sind die Angaben der Modelle zur Aussagesicherheit der Prognosen nicht direkt miteinander vergleichbar.
2. Von den wissensbasierten Modellen werden Flächen ausgewiesen, für die aus inhaltlichen oder technischen Gründen keine Aussage möglich ist. RF gibt hingegen für alle Waldflächen eine Prognose aus. Um die flächendeckende Vergleichbarkeit der Modellvorhersagen dennoch gewährleisten zu können, sind die RF-Prognosen auf den wissensbasiert nicht prognostizierbaren Flächen gesondert zu betrachten.

Für den Vergleich der Modellvorhersagen mit der Berechnung von Kontrast- und Gütemaßen werden die fünf nFK-Klassen von ≤ 40 mm bis > 160 mm durch die Stufenwerte 1 bis 5 ersetzt. Diese einfache ordinal skalierte Klassifizierung ermöglicht die Berechnung eines Kontrast-Index nach AMOS & WHITESIDE (1975). Der Index gibt für jede Rasterzelle des Untersuchungsgebietes an, um wie viele Klassen die teilautomatisierte Prognose mit RF von der wissensbasierten Vorhersage abweicht. Die Ergebnisse können so einfach bilanziert und Gütemaße der Modellübereinstimmung ermittelt werden.

7.2 Flächenbilanz der Übereinstimmung der beiden Modellierungsansätze

Die Flächenbilanzierung des Kontrast-Index zeigt, dass nur 40 % der Waldfläche des Untersuchungsgebietes identische Modellaussagen aufweisen (Abb. 46). Auf rund einem Viertel der Fläche weichen die RF-Prognosen um eine Klasse von der wissensbasierten Vorhersage ab. Hierbei überwiegt mit 18 % die lagebezogen höhere Schätzung der nFK durch RF. Im Lösshügelland fällt die Übereinstimmung der Prognosen mit rund 60 % deutlich höher aus als im Tafel- und Faltenjura. Dieses Resultat deckt sich mit den Ergebnissen von HERBST & MOSIMANN (2008) für die Prognose des Skelettgehalts. Der geringere Flächenanteil identischer Prognosen im Jura ist maßgeblich auf die deutlich größere Vielfalt der bodenbeeinflussenden Standortfaktoren zurückzuführen, die von den Modellen mit abweichenden Prädiktorenkombinationen erfasst und denen variierende nFK-Werte zugewiesen werden.

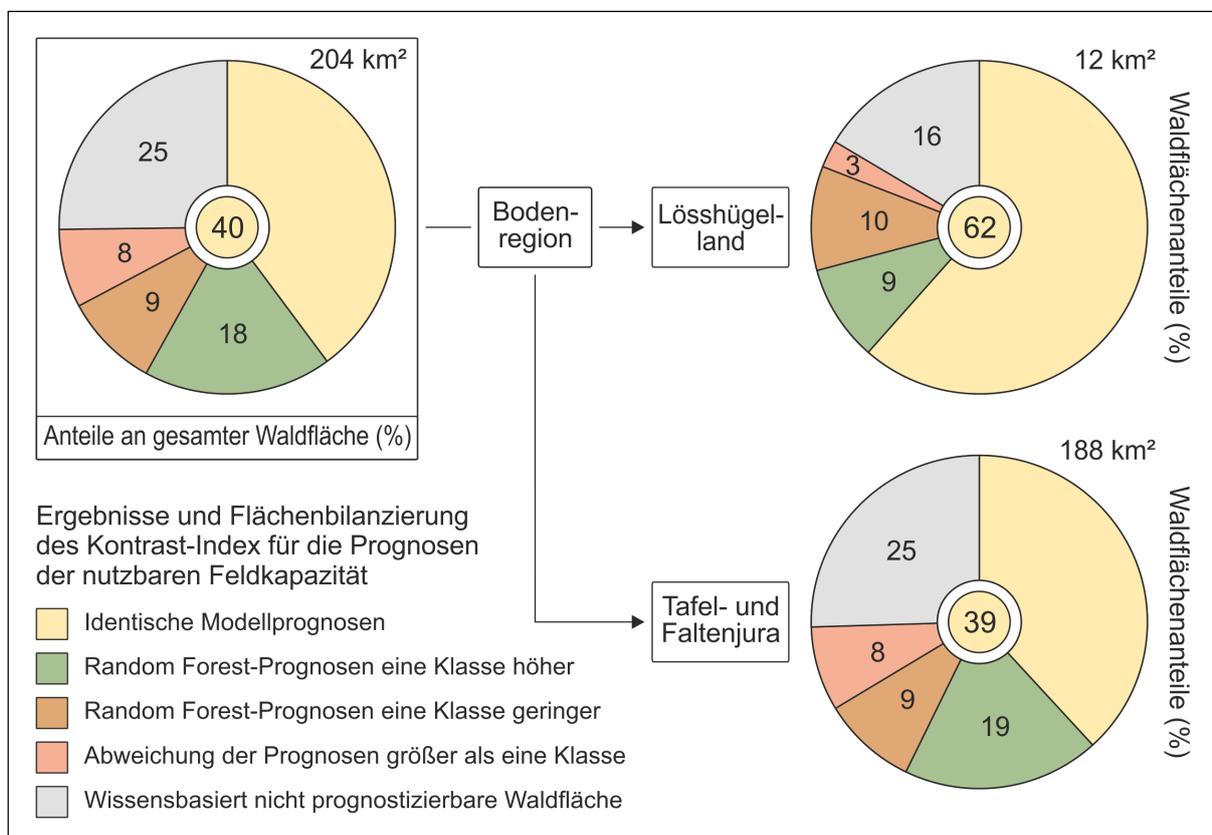


Abb. 46 Flächenanteile übereinstimmender und abweichender Prognosen der nutzbaren Feldkapazität mit wissensbasierten und teilautomatisierten Vorhersagen.

Tab. 20 schlüsselt Gütemaße des lagebezogenen Modellvergleichs für die wissensbasiert prognostizierbaren Waldflächen differenziert nach Modellregionen auf. Auch hier zeigt sich, dass die Übereinstimmung der Modellprognosen insgesamt relativ gering ist. Die Flächenanteile identischer Modellprognosen sind in der Bodenregion Talböden am größten. Im Lösshügelland stimmen die Modellprognosen auf drei Vierteln und im Jura nur noch auf rund der Hälfte der Waldfläche mit wissensbasierten Aussagen lagebezogen überein. Entsprechend fällt der *RMSE* mit 0,89 im Jura am höchsten aus. Der positive mittlere Fehler (*ME* = 0,3) und der Flächenanteil bei dem die RF-Prognose eine Klasse höher ausfällt (*P1* = 25 %) verdeutlichen, dass RF auf den wissensbasiert prognostizierbaren Waldflächen die nFK häufiger über- als unterschätzt. Weit verbreitete Hanglagen, in denen RF tendenziell zu hohe nFK-Werte modelliert, machen einen großen Teil der Flächen aus.

Auf den Plateaus im Tafeljura prognostiziert RF häufig nFK-Werte ≤ 40 mm. Das wissensbasierte Modell gibt für diese Waldareale hingegen Speicherfähigkeitswerte von 41 - 80 mm nFK aus. Diese Differenz der Modellprognosen macht im Jura den überwiegenden Anteil an der Waldfläche aus, bei denen die RF-Prognose eine Klasse geringer als die wissensbasierte Vorhersage ausfällt (*N1*). Nur auf rund 10 % der Waldfläche mit wissensbasierter Aussage sind die Abweichungen von RF größer als eine Klasse. Das Ergebnis der teilautomatisierten Modellierung ist auf diesen Flächen grundsätzlich unplausibel. Hierbei handelt es sich vorwiegend um die Hanglagen unterhalb von Felsbändern, für die RF deutlich zu hohe nFK-Werte modelliert.

Modellregion	Fläche (km ²)	Gütemaße				
		<i>RR</i> (%)	<i>N1</i> (%)	<i>P1</i> (%)	<i>ME</i> (-)	<i>RMSE</i> (-)
Gesamte Waldfläche	152,7	53,3	12,2	24,2	0,30	0,89
Lösshügelland	9,9	73,3	12,0	11,3	-0,01	0,61
Jura	140,4	51,3	12,4	25,4	0,33	0,92
Talböden	2,4	87,3	6,0	6,8	0,01	0,36

Tab. 20 Gütemaße des lagebezogenen Vergleichs der wissensbasierten Modellierung der nFK mit den Random Forest-Prognosen. Bezug: wissensbasiert prognostizierbare Waldflächen.

Die entsprechende Auswertung für die FK ist dem Anhang zu entnehmen. Abkürzungen: *RR*: Recall Ratio (Flächenanteil mit identischen Prognosen), *N1*: Flächenanteil, bei dem die RF-Prognose eine Klasse geringer ausfällt, *P1*: Flächenanteil, bei dem die RF-Prognose eine Klasse höher ausfällt, *ME*: Mean Error (Mittl. Fehler). *RMSE*: Root Mean Square Error (Quadratwurzel aus mittl. quadratischem Fehler). *ME* zeigt an, um wieviel Klassen die Modellprognosen im Mittel voneinander abweichen. Über- und Unterschätzung können sich ausgleichen Dies ist beim *RMSE* nicht der Fall und Ausreißer werden stärker gewichtet.

7.3 Lagebezogene Unterschiede der Modellprognosen und Bemerkungen zu den Gründen

Im Lösshügelland und den Talböden zeigen sich nur kleinflächige örtliche Differenzen der Modellaussagen. Sie beschränken sich vorwiegend auf Hänge am Rand von Tiefenbereichen und auf die Terrassenstufen. Die folgende Darstellung beschränkt sich deshalb auf den Jura. Eine Karte des Kontrast Index für die gesamte Waldfläche der Kantone BL und BS ist im Anhang angeführt und kann im Internet eingesehen werden (www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html). Die Kartenausschnitte aus den Beispielgebieten des Tafel- und Faltenjura (Abb. 47) zeigen typische Verteilungsmuster des berechneten Kontrast Index.

Identische Modellprognosen treten bei folgenden Standortsituationen auf:

- Im Tafeljura teilweise auf den Plateaus im Bereich der Kalke, Decklehme und Tonmergel.
- Im Tafel- und Faltenjura verbreitet in den Normalhängen außerhalb von Schuttwaldarealen auf Kalk, Kalkmergeln und Gehängeschuttdecken.

Bereiche in denen RF häufig höhere nFK-Werte als das wissensbasierte Modell ausweist:

- In Steilhängen und Hängen unterhalb von Felsbändern im Tafel- und Faltenjura.
- Im Faltenjura in den Unterhängen der großen Falten auf Tonmergeln.
- In allen Jurahängen kleinräumig und z.T. bänderartig wechselnd durch inkonsistente RF-Prognosen unter sehr ähnlichen Standortbedingungen (Kap. 6.2.4).

RF modelliert niedrigere nFK-Werte als das wissensbasierte Modell in folgenden Arealen:

- Im Tafeljura verbreitet auf Kalk in den vorderen Bereichen der stark zerlappten Plateaus.
- Im Tafeljura verbreitet im Bereich der Decklehme und Tonmergel auf den Hochflächen.
- In allen Jurahängen kleinräumig und z.T. bänderartig wechselnd durch inkonsistente RF-Prognosen unter sehr ähnlichen Standortbedingungen.

Auf den Waldflächen ohne wissensbasierte Aussage (25 %) weisen die RF-Prognosen vergleichbare Verteilungsmuster wie für den Rest der Waldfläche auf.

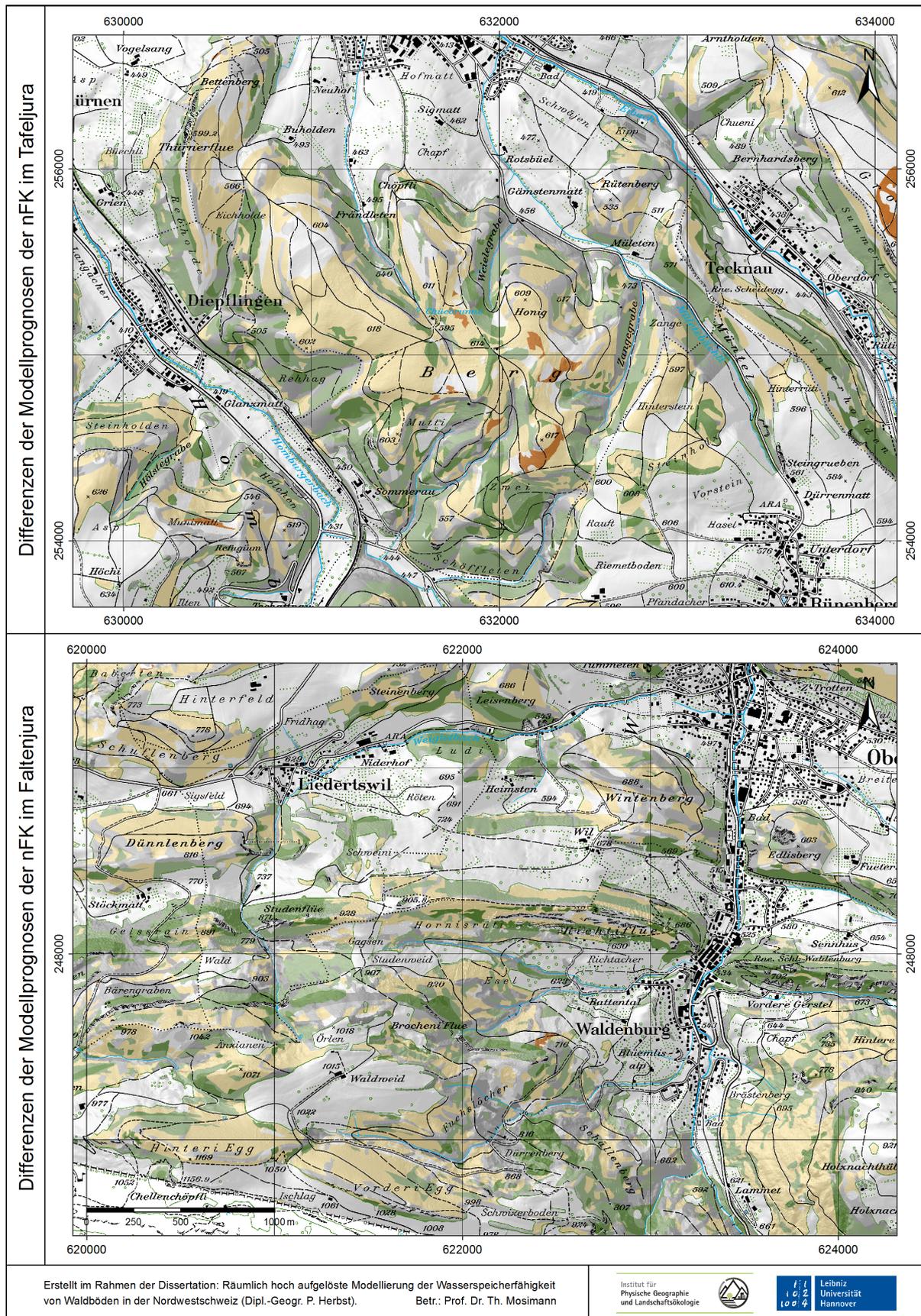


Abb. 47 Abweichungen der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage für die Beispielgebiete Diepfingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura). Die Legende wird auf der folgenden Seite dargestellt (Abb. 48). Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blätter 1068 und 1088 (SWISSTOPO).

Abweichungen der Prognose mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage					
Random Forest-Prognose der nFK im Vergleich zur wissensbasierten Vorhersage	Klassendifferenz zwischen Random Forest und wissensbasierter Prognose				
	keine	1	2	3	4
Höhere nFK					
Geringere nFK					
Identische nFK					

Wissensbasiertes Modellergebnis	Random Forest-Prognose der nutzbaren Feldkapazität (mm)				
	≤ 40	41 - 80	81 - 120	121 - 160	> 160
nFK nicht prognostizierbar					

Abb. 48
Legende der Karte der Abweichung der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage.

Abb. 49 schlüsselt die Flächenbilanzierung der Prognosedifferenzen für den Tafel- und Faltenjura auf. Zudem wird die Häufigkeitsverteilung der RF-Prognosen auf den wissensbasiert nicht prognostizierbaren Flächen angeführt.

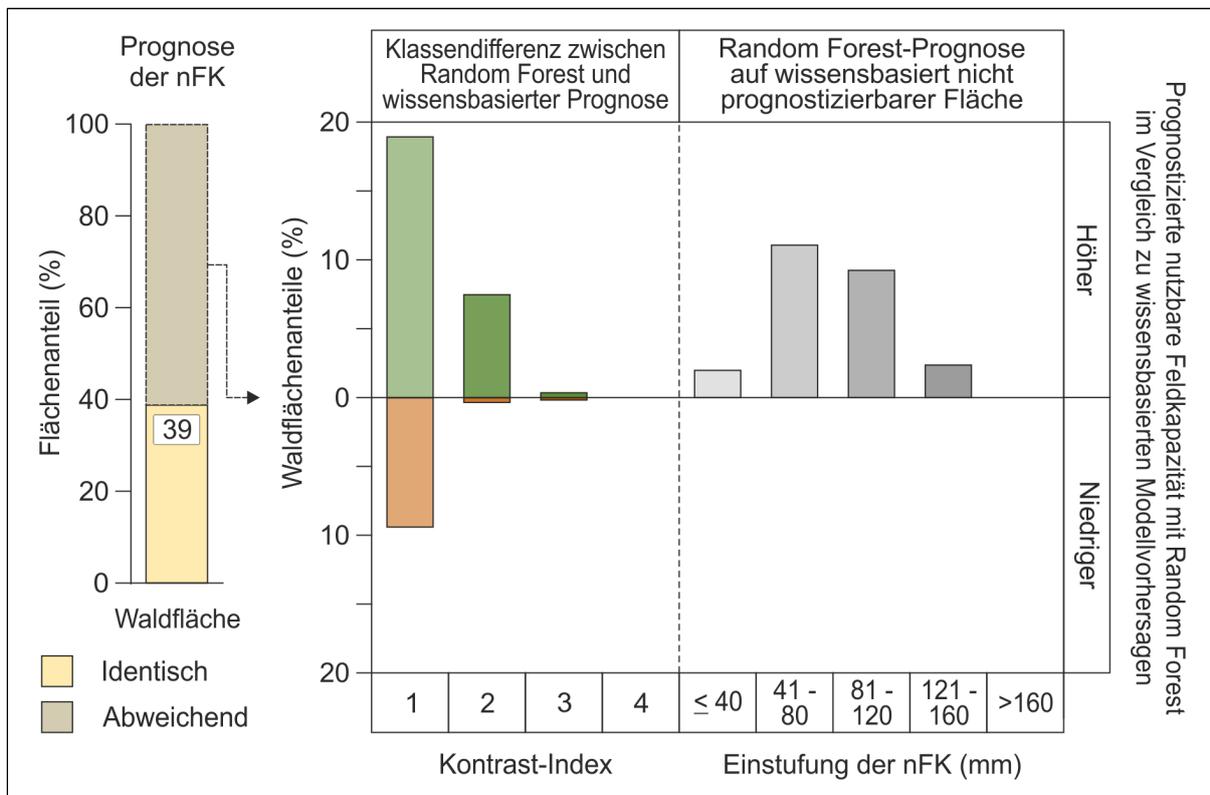


Abb. 49 Flächenbilanzierung abweichender nFK-Prognosen im Tafel- und Faltenjura (RF / Wissensbasiert). Die Flächenbilanzierung bezieht sich auf eine Waldfläche von ca. 188 km².

Folgende Ergebnisse sind bei der Betrachtung festzustellen:

- Der Flächenanteil identischer Einstufung ist mit rund 40 % gering.
- Die Differenz der Prognosen beträgt größtenteils eine nFK-Klasse.
- Bei abweichender Einstufung dominieren die Fälle in denen RF die nFK höher abschätzt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der lagebezogene Vergleich der Modellprognosen die Erkenntnisse aus dem vorherigen Ergebniskapitel (Kap. 6.2) stützt. Wenn RF für Standort-situationen naturräumlich nachvollziehbare nFK-Werte und Verteilungsmuster differenziert, stimmen die teilautomatisierten Prognosen in der Regel mit der wissensbasierten Vorhersage überein. Damit RF für Standortbedingungen plausible Ergebnisse liefern kann, die denen der wissensbasierten Modellierung entsprechen, muss für die jeweiligen Prädiktorenkombinationen eine annähernd flächenrepräsentative Stichprobe vorliegen. Dies trifft im Lösshügelland häufiger zu als im naturräumlich vielfältigeren Jura.

Im Jura weichen die RF-Prognosen auf dem überwiegenden Teil der Waldflächen von der wissensbasierten Modellierung ab. Zudem ist die Aussagesicherheit der teilautomatisierten Vorhersagen im Jura verbreitet gering ($CPE < 50\%$). Die Geländebereiche mit abweichenden Modellvorhersagen offenbaren die räumliche Verbreitung der Prädiktorenkombinationen, für die keine repräsentativen Stichproben zur standörtlichen Wasserversorgungssituation vorliegen. In den Waldarealen mit Prognosedifferenzen (z.B. bänderartige Wechsel der nFK-Werte im Hang, Hanglagen im Schuttlieferbereich von Felsbändern) schätzt RF daher häufig räumliche Verteilungen der Wasserspeicherfähigkeit ab, die für die örtlichen Relief- und Substratbedingungen nicht flächenrepräsentativ sind (z.B. $nFK \leq 40$ mm für Böden in Decklehmen). In Waldarealen mit teilautomatisierten Vorhersagen der nFK, deren Aussagesicherheit laut RF gering ist ($CPE < 50\%$) und die nicht mit der wissensbasierten Abschätzung lagebezogen übereinstimmen, sind die Ergebnisse der teilautomatisierten Modellierung deshalb zum Großteil falsch. Natürlich verursacht auch das wissensbasierte Modell mitunter Fehler bei der Abschätzung des standörtlichen Wasserspeichervermögens. So fällt beispielsweise im Faltenjura die Speicherfähigkeit in den Unterhängen der großen Falten auf Tonmergeln tendenziell höher aus (81 - 120 mm nFK) als die wissensbasierte Modellierung in einigen Bereichen vorhersagt. In diesen Fällen ist für die Waldbereiche mit Prognosedifferenzen von einer nFK-Klasse zu prüfen, ob RF die für die Standortbedingungen erwartungsgemäßen nFK-Werte ausweist.

Prognosedifferenzen von mehr als einer nFK-Klasse grenzen die Waldbereiche ab, bei denen die teilautomatisierte Prognose grundsätzlich nicht zutreffend ist. Die RF-Prognosen der nFK entsprechen hier nicht den naturräumlichen Gegebenheiten. Hierbei handelt es sich vorwiegend um die Hanglagen unterhalb von Felsbändern, in denen RF deutlich zu hohe nFK-Werte modelliert. Die Abschätzung sehr geringer nFK-Werte (≤ 40 mm) für Böden in Decklehmen auf den Plateaus sind ein Beispiel für die Geländebereiche, für die RF deutlich zu niedrige nFK-Werte abschätzt. Die Fehlprognosen sind auf zu kleine und nicht

repräsentative Stichproben für die Prädiktorenkombinationen und auf die Inkonsistenz der RF-Vorhersagen unter fast identischen Standortbedingungen zurückzuführen.

Dass RF auf den wissensbasiert prognostizierbaren Waldflächen die nFK häufiger über- als unterschätzt liegt maßgeblich an den weit verbreiteten Hanglagen, für die RF tendenziell zu hohe nFK-Werte modelliert. Die zumeist skelettreichen und flachgründigen Steilhänge und Hangbereiche unterhalb von Felsbändern mit unrealistischen Vorhersagen hoher nFK-Werte (81 - 120 mm, z.T. eine Stufe höher) sind als Beispiel zu nennen. Ebenso kleine Hangbereiche, in denen unplausibel hohe nFK-Werte ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit mit geringen nFK-Werten z.T. bänderartig wechseln. In diesen Waldbereichen weist RF durch die Überschätzung des standörtlichen Speichermögens Fehlprognosen aus. Deren maßgeblichen Gründe sind nicht flächenrepräsentative Häufigkeitsverteilungen, begrenzte oder unvollständige Stichproben für die Prädiktorenkombinationen, die unvollständige und unsystematische Abbildung der Deckschichten in den geologischen Karten sowie inkonsistente RF-Prognosen unter sehr ähnlichen Standortbedingungen.

Abschließend lässt der Modellvergleich mit der Erfahrung aus der wissensbasierten Modellentwicklung die Aussage zu, dass RF auf den nicht prognostizierbaren Waldflächen (25 %) keine belastbaren Ergebnisse liefern kann. In diesen Waldbereichen sind die kleinräumigen Variationen der Wasserspeicherfähigkeit zu groß, die Stichproben zu klein, sie geben die Realität eindeutig nicht repräsentativ wieder oder die Informationen einzelner Prädiktoren sind ungenügend, um das Wasserspeichervermögen der Waldböden abbilden zu können (Kap. 8.2).

Aus diesen Ergebnissen des lagebezogenen Modellvergleichs lassen sich Schlussfolgerungen für die Möglichkeiten und Grenzen der faktorenbasierten Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit ableiten. Diese methodischen Folgerungen werden im Kontext der Gesamtergebnisse dieser Arbeit im folgenden Kapitel erläutert.

8 Methodische Folgerungen

8.1 Wie beeinflusst die Auflösung der Prädiktoreninformationen die räumliche Prognose der Wasserspeicherfähigkeit?

Die Ergebniskapitel dieser Arbeit zeigen, dass mit einem wissensbasierten und mit einem teilautomatisierten Ansatz faktorenbasierter Modellierung eine hoch aufgelöste Abschätzung des Wasserspeichervermögens der Waldböden grundsätzlich möglich ist. Die folgende Auflistung verdeutlicht, wie die Prädiktoren die räumliche Plausibilität und die Genauigkeit der Vorhersagen unabhängig vom Modellansatz unterschiedlich stark beeinflussen:

- Restriktionen ergeben sich bei der detaillierten Reliefmodellierung teilweise durch Ungenauigkeiten im DGM. Sie resultieren überwiegend aus dem störenden Einfluss der Bäume beim Laser Scanning (HYYPÄ ET AL. 2005). Bei einer zu geringen Punktdichte mussten Glättungen und Interpolationen der Höhendaten vorgenommen werden, um Fehler bei der Berechnung von Neigungs- und Wölbungskriterien zu minimieren (ZHANG & GOODCHILD 2002). Dies ist einer der Gründe, warum die Modellierung kleinräumiger konvexer und konkaver Bereiche in den Normalhängen bisher noch nicht ausreichend differenziert werden konnte (Kap. 3.4).
- Im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes (östlich Rechtswert 620000) basieren die Informationen zum Gestein auf der geologischen Karte im Maßstab 1:100.000. Kleinräumige Wechsel der stratigraphischen Gesteinstypen sowie viele Deckschichten werden aufgrund des hohen Generalisierungsgrades der Karte nicht erfasst. Daher zeichnet sich die geologische Karte 1:100.000 durch größere Areale mit einheitlichen Prognosen der nFK in den Ergebniskarten ab. Durch eine detailliertere geologische Karte (Maßstab 1:25.000) ist hier zukünftig allein durch die Verbesserung der Datenbasis ein deutlich höherer räumlicher Differenzierungsgrad der Modellprognosen erreichbar.
- Eine hoch aufgelöste Modellierung benötigt vielfältige Prädiktoren mit möglichst guten Zeigereigenschaften. Es hat sich gezeigt, dass das Wasserspeichervermögen von beiden Modellansätzen umso sicherer prognostiziert werden kann, je weiter sich die Ausprägungen der Prädiktoren in den Randbereichen ihrer jeweiligen Wertespektren bewegen. So basiert die Modellierung der Reliefformtypen auf morphometrischen Reliefparametern (z.B. Neigung, Wölbung). Je mehr die morphometrischen Merkmalsausprägungen einzelner Reliefformtypen dem mittleren Wertespektrum entsprechen (z.B. Normalhänge mit mittlerer Neigung und geringer Wölbung), desto höher ist dort die Variabilität der Bodeneigenschaften. Im Vergleich dazu weisen Formtypen mit Neigungs- oder Wölbungswerten in den Randbereichen der Wertespektren (z.B. Steilhänge, Kämme, Scheitel, Hangrücken) häufiger homogene Bodenverhältnisse auf. Hier hat keine Ab- oder Umlagerung von Verwitterungsmaterial stattgefunden. Es dominieren daher gesteinsbestimmte Böden, deren Eigenschaften sich für die verschiedenen petrographischen Gesteinsklassen gut abschätzen lassen.

- Auf den Jurahängen sind Deckschichten weit verbreitet. Das Wasserspeichervermögen der Böden auf Deckschichten variiert im Hang kleinräumig. Die Ursache sind vielfältige Variationen in der Schichtung und beim Skelettgehalt der unterschiedlich mächtigen Hangschutte und Hanglehme. Sie treten auch im Bereich einheitlicher Gesteinstypen gemäß geologischer Karte auf. Zudem sind die Informationen in den geologischen Karten zu den Deckschichten häufig unsystematisch und unvollständig (Kap. 4.2). Im Bereich von Deckschichten kann das Ausgangssubstrat der Bodenbildung völlig von der Information in der geologischen Karte abweichen. Aus dieser Unschärfe der geologischen Information resultieren potenzielle gesteinsbestimmte Modellierungsfehler. Bei beiden Modellansätzen besteht hier eines der größten Probleme, welches der räumlich differenzierten Prognose plausibler nFK-Werte in den Jurahängen deutliche Grenzen setzt und in Teilbereichen scheitern lässt (Kap. 8.2). Eine Verbesserung der Vorhersage ist hier außer durch detailliertere geologische Karten für den östlichen Teil des Kantons BL, nur durch die lokale Auskartierung der Verbreitung und Eigenschaften der Deckschichten möglich.
- Die Integration der pflanzensoziologischen Feuchtestufen *sehr trocken* und *trocken* verbessert bei der wissensbasierten Modellierung die räumliche Differenzierung kleinräumiger Variationen der Substratverhältnisse in den Jurahängen. Dies ermöglicht in einigen Hangbereichen die Abgrenzung von Böden mit sehr geringer Wasserspeicherfähigkeit (≤ 40 mm nFK). Die Zusammenhänge zwischen den pflanzensoziologischen Feuchtestufen in den Randbereichen des Ökogramms und den geringen Wasserspeicherkapazitäten der Böden werden von der Stichprobe aber nur unvollständig wiedergegeben. Damit ist es für den RF-Algorithmus nicht möglich, das Ensemble auf diesen Zusammenhang zu kalibrieren. Die Verbreitung der Böden mit sehr geringer nFK in den Hangbereichen kann RF deshalb nicht so räumlich differenziert abbilden wie das wissensbasierte Modell. Dieses Beispiel zeigt, wie der Einfluss der einzelnen Prädiktoren auf die räumliche Prognose der Wasserspeicherfähigkeit nicht nur von ihrer räumlichen Auflösung und Schärfe des Informationsgehalts abhängt, sondern auch maßgeblich von der Konsistenz und räumlichen Repräsentativität der Stichprobe beeinflusst wird (HARTEMINK ET AL. 2008).

8.2 Grenzen für die Modellierung des Wasserspeichervermögens

Beim wissensbasierten Modell zeigen die nicht prognostizierbaren Flächen deutlich die Grenzen der Modellierbarkeit an. Für rund 25 % der Waldfläche ist derzeit keine Aussage zur Wasserspeicherfähigkeit möglich (Kap. 5.4.1). Die Ursachen für die Ausweisung nicht prognostizierbarer Flächen sind vielfältig. Sie lassen sich in inhaltliche und technische Gründe differenzieren, wobei die inhaltlichen Gründe überwiegen (Tab. 21).

Inhaltliche Gründe für Flächen ohne Prognose

Auf rund 15 % der Waldfläche scheitert die Prognose der nFK an der hohen Variabilität und dem kleinräumigen Wechsel der Bodeneigenschaften. Dies kommt auch innerhalb einheitlicher Reliefformtypen und geologischer Formationen vor. Maßgebliche Ursachen sind:

- Die bisher ungenügende Differenzierung der Normalhänge des Jura mit Neigungen zwischen 5 - 25 Grad (z.B. mit Neigungs- und Wölbungskriterien). Die näherungsweise Abbildung kleinräumiger Variationen in der Zusammensetzung und Mächtigkeit der Hangschutte und Hanglehme wird hierdurch in vielen Bereichen verhindert.
- Die weit verbreiteten Deckschichten (Hanglehme und Hangschutte) auf den Jurahängen. Wegen ihres sehr unterschiedlichen Aufbaus variieren die Lehm- und Skelettanteile und dadurch bedingt auch die Wasserspeicherfähigkeit mitunter ohne erkennbare räumliche Abhängigkeiten (MOSIMANN ET AL. 2011).
- Die gesteinspezifische Heterogenität innerhalb petrographischer Klassen. Hierzu zählen beispielsweise kleinräumige Wechsel von anstehendem Kalk und Kalkmergel sowie die räumliche Variabilität der petrographischen Zusammensetzung der vielfältigen Tonmergelschichten (Mergelkalk bis tonreiche Mergel).
- Die Ableitung der Bodenfeuchtesituation aus den Zeigereigenschaften der Waldgesellschaften unterliegt Fehleinschätzungen und die Areale der Waldgesellschaften stimmen nicht immer mit bodensystemischen Kriterien überein (FRIEDRICH 2001). Dies führt dazu, dass die Einstufungen der Feuchtesituation im mittleren Bereich des Ökogramms nahezu keinen Zusammenhang mit der räumlichen Variation der Bodenverhältnisse und der standörtlichen Wasserversorgungssituation erkennen lassen.

An der Oberfläche anstehendes Festgestein (Felsbänder) sowie in den Schotterebenen durch Umlagerungen, Aufschüttungen oder Materialauftrag gestörte Böden sind weitere inhaltliche Gründe für Waldflächen ohne wissensbasierte Aussage. Hiervon ist aber nur ein sehr geringer Flächenanteil im Untersuchungsgebiet betroffen. Das gilt auch für die Waldflächen mit Prädiktoreninformationen, deren Kombinationen in der naturräumlichen Realität des Untersuchungsgebietes nicht vorkommen. Hierzu zählen z.B. Prädiktorenkombinationen nach deren Aussage Buntsandstein in den Jurahängen ansteht oder Löss auf Steilhängen sowie Decklehme auf den Hängen im nördlichen Tafeljura liegen.

Waldflächen ohne Prognose			Prädiktorenkombination mit größtem Flächenanteil	
Gründe	Bemerkung zur Modellierung	Anteil (%)	Standortbedingungen	Anteil (%)
Inhaltliche Ursachen	Heterogenität zu groß	14,9	Konvex geformter Hangbereich, Gestein Kalk und Kalkmergel, Feuchtestufe trocken bis feucht.	4,1
	Anstehendes Gestein	1,1	Felsen stehen an Oberfläche an (z.B. Felsbänder), kein Waldboden vorhanden.	1,1
	Anthropogener Boden	0,2	Böden der Schotterebenen verändert durch Umlagerungen, Aufschüttungen und Materialauftrag.	0,2
	Kommt nicht vor	< 0,1	Flachhang im nördlichen Tafeljura mit Decklehmen.	< 0,1
Technische Ursachen	Prädiktor fehlt oder ist unplausibel / nicht zuordbar	4,5	Normalhänge im Jura auf petrographisch nicht zuordenbaren oder unplausiblen Gesteinen.	0,9
	Stichprobe zu klein	4,3	Steilhänge, die nicht Kalk, Kalkmergel oder Gehängeschuttdecken als Gesteinstyp aufweisen.	0,7
	Kein Wald	< 0,1	Pflanzensoziologische Waldgesellschaften, die laut Waldlayer außerhalb der Modellgrenzen liegen.	< 0,1

Tab. 21 Gründe für die Ausweisung von Flächen ohne Prognose beim wissensbasierten Modell. Die prozentualen Flächenanteile beziehen sich auf die gesamte Waldfläche (204 km²).

Technische Gründe für Flächen ohne Prognose

Fehlende oder unplausible Prädiktoren/-kombinationen sowie zu kleine Stichproben sind zu etwa gleichen Teilen die technischen Ursachen für fehlende Prognosen. Dies trifft auf rund 9 % der Waldfläche zu. Zu den wichtigsten Gründen für fehlende oder unplausible Informationen zu den Prädiktoren zählen:

- Einzelne stratigraphische Formationen, die keinem Gesteinstyp zugeordnet werden können. Dies ist der Fall, wenn die räumliche und zeitliche Vielfalt der stratigraphischen Formation keine eindeutige petrographische Charakterisierung zulässt.
- Fehlende Angaben zu den Pflanzengesellschaften auf einzelnen Flächen. Diese können fehlen, wenn einzelne Geometrien der kantonalen Waldflächen (entsprechen dem gültigen Modellbereich) nicht vom Vektordatensatz der Waldgesellschaften abgedeckt werden. Für diese einzelnen Waldareale liegen dann keine Informationen zu den pflanzensoziologischen Feuchtestufen vor.

Wie in Kap. 5.2.3 bereits erläutert, ist die vorliegende Stichprobe bei einer Punktdichte von 0,6 Bodenprofilen pro km² für viele Prädiktorenkombinationen im Untersuchungsgebiet unvollständig und/oder zu begrenzt um die standörtliche Wasserversorgungssituation flächenrepräsentativ abbilden zu können. Im Tafel- und Faltenjura befinden sich beispiels-

weise nur drei Bodenaufschlüsse in den verbreiteten Steilhängen, zwei Profile in steilen Tiefenlinien und nur eine Bodenaufnahme in einem Hangkantenbereich. Auf rund 4 % der Waldfläche scheidet die Abschätzung des Wasserspeichervermögens an kleinen und nicht repräsentativen Stichproben. Die wenigen vorhandenen Punktinformationen zu den Standortfaktoren und den Bodenverhältnissen können in diesen Bereichen bisher nicht mit ausreichenden standortkundlichen Kenntnissen oder lokaler Kartiererfahrung bewertet und kombiniert werden.

Grenzen der Modellierbarkeit mit Random Forest

Die Grenzen der Modellierbarkeit mit RF lassen sich nicht so deutlich bestimmen, wie bei der wissensbasierten Modellierung. RF gibt für die gesamte Waldfläche Prognosen aus, auch wenn aus inhaltlichen und technischen Gründen (v.a. unvollständige oder fehlende Stichprobendaten) eine flächenrepräsentative Vorhersage der nFK nicht möglich ist. Nur geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten (*CPE*) der RF-Prognosen liefern in den Karten einen Hinweis darauf, in welchen Bereichen die Aussagesicherheit gering ist. Mit Hilfe des Schwellenwertes *CPE* = 50 % besteht daher die Möglichkeit, sich den Grenzen der RF-Prognosen zu nähern. Aus Abb. 50 geht hervor, dass nur auf 35 % der Waldfläche die *CPE* der teilautomatisierten Vorhersage über 50 % betragen. Die Häufigkeitsverteilung der prognostizierten nFK-Werte nähert sich hier zudem der Werteverteilung der wissensbasierten Modellierung an. Hingegen sind die geringen *CPE*-Werte auf rund 65 % der Waldfläche ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Modellierung mit RF bei der gegebenen Datengrundlage, unabhängig von der lagebezogenen Plausibilität der Prognosen an ihre Grenzen stößt. Jedoch sind nicht alle RF-Prognosen mit *CPE* unter 50 % grundsätzlich falsch. Um hier eine genauere Differenzierung vornehmen zu können, bedarf es des in Kap. 7 erläuterten lagebezogenen Vergleiches mit den wissensbasierten Vorhersagen der Wasserspeicherfähigkeit.

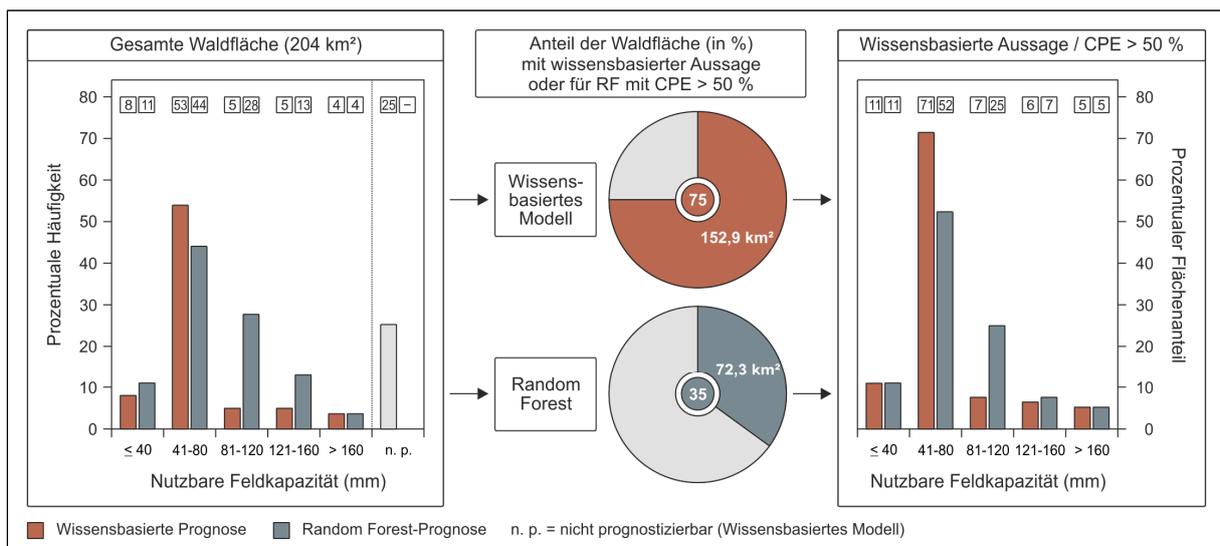


Abb. 50 Häufigkeitsverteilungen der Modellprognosen der nFK auf der gesamten Waldfläche im Vergleich mit den Häufigkeitsverteilungen auf den Flächen mit wissensbasierter Aussage und mit einer *CPE* über 50 % (Random Forest). Die Auswertung für die FK ist im Anhang angeführt.

Erst dieser Modellvergleich ermöglicht eine deutliche Abgrenzung der Waldbereiche, in denen die RF-Prognosen der Wasserspeicherfähigkeit für den Großteil der Flächen falsch sind. Hierzu zählen:

1. Eindeutig erkennbare Fehlprognosen durch RF (z.B. sehr geringe nFK in Decklehmen).
2. Prognosen auf den Waldflächen, für die wissenschaftlich keine Aussage möglich ist.
3. Waldflächen, bei denen die Prognose der nFK um mehr als eine Klasse von der wissenschaftlichen Vorhersage abweicht.
4. Waldareale mit Prognosen der nFK, deren *CPE* < 50 % beträgt und die nicht mit der wissenschaftlichen Vorhersage übereinstimmen.

Unter Annahme dieser Kriterien werden auf etwa 50 % der Waldfläche des Untersuchungsgebietes, die Grenzen der Modellierbarkeit des Wasserspeichervermögens mit RF erreicht.

8.3 Gesamtbewertung und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit erfolgt die hoch aufgelöste Prognose der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden mit wissenschaftlicher und teilautomatisierter Modellierung. Die Modellergebnisse werden lagebezogen miteinander verglichen. Dieses Vorgehen liefert eine flächendeckende Abschätzung der nFK für das Untersuchungsgebiet und zudem wichtige Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Wasserspeichervermögens von Waldböden in der Nordwestschweiz.

Die entwickelte Reliefmodellierung ist auf die Vorhersage von Waldbodeneigenschaften ausgerichtet. Sie weist damit im Vergleich zu automatischen Klassifizierungsverfahren (DRAGUT & BLASCHKE 2006, ARRELL ET AL. 2007, EHSANI & QUIEL 2008) einen stärkeren Bezug zu den Bodeneigenschaften auf. Die Reliefformtypen und Positionsparameter haben sich daher in beiden Modellansätzen als sehr wichtige Vorhersagegrößen für die Wasserspeicherfähigkeit erwiesen.

Die räumlich differenzierte Abschätzung des Wasserspeichervermögens erfolgt mit einem faktorenbasierten Modellierungsansatz. Bei der wissenschaftlichen Modellierung werden empirisch-statistische Analysen mit Expertenwissen kombiniert. Die Ergebnisse belegen insgesamt die Machbarkeit für die Nordwestschweiz. Damit bestätigen sie die Aussage von MOSIMANN ET AL. (2011), wonach die wissenschaftliche Modellierung funktioniert und neue Möglichkeiten für die Bereitstellung von Bodeninformationen schafft. Im Gegensatz zu geostatistischen und automatisierten Modellansätzen können durch die wissenschaftliche Vorgehensweise auch für Bereiche mit geringem Stichprobenumfang hoch aufgelöste Prognosen erzielt werden, solange die Zusammenhänge durch Erfahrungswissen bekannt, bodenkundlich ableitbar oder aus anderen Räumen übertragbar sind (FRACEK & MOSIMANN 2012). Aufgrund der geringen Datendichte (0,6 Bodenprofile pro km²), haben sich detaillierte Geländekenntnisse und Feldebodenkunde für die Entwicklung der wissenschaftlichen Modelle als unverzichtbar erwiesen.

Eine wissensbasierte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit ist in der Nordwestschweiz für 75 % der Waldfläche möglich. Das Modell liefert für die vielfältigen Standortbedingungen des Untersuchungsgebietes weitgehend räumlich plausible Prognosen der Wasserspeicherfähigkeit. Die Differenzierung der Vorhersagen in fünf nFK-Klassen, die Angaben der Aussagesicherheit zu jeder Prognose und die gesonderte Ausweisung von Flächen ohne wissensbasierte Aussage zur Wasserspeicherkapazität, ermöglichen grundsätzlich die Anwendung der Modellierungsergebnisse für weiterführende ökologische Fragestellungen (z.B. Trockenheitsrisiko). Für 25 % der Waldfläche sind aus verschiedenen inhaltlichen oder technischen Gründen keine detaillierten Aussagen zur Wasserspeicherfähigkeit möglich. Hier zeigen sich deutlich die Grenzen für die Modellierung.

Bei den technischen Gründen (v.a. Stichprobe zu klein, fehlende Prädiktorinformationen) kann nur durch die Verbesserung der Datengrundlage die Prognose zukünftig auf bis zu 9 % der Waldfläche verbessert werden. Für die Standortbedingungen, bei denen aus inhaltlichen Gründen keine Prognose möglich ist, gestaltet sich die Situation schwieriger. Eine verbesserte morphographische Differenzierung der Hänge und weitere Bodenaufnahmen zur gezielten Ergänzung der Stichprobe, können zu einer Verbesserung der Modellprognosen beitragen. Die gezielte Nachkartierung von Deckschichten in Hanglagen ist eine weitere Möglichkeit, um die substratbedingten Fehlerquellen bei der Modellierung der Wasserspeicherfähigkeit zukünftig zu reduzieren.

Die modellgestützten Prognosekarten schließen eine wichtige Informationslücke zum räumlichen Auftreten der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden in der Nordwestschweiz. Im GIS lassen sich Kartenausschnitte bis zu einem Maßstab von 1:5.000 erstellen. Die kleinsten Areale sind etwa 0,1 ha groß. Der räumliche Differenzierungsgrad der Modellprognosen ist hoch und entspricht der bestmöglichen Auflösung gemäß der verfügbaren Datenbasis und der regionsspezifisch erreichbaren Modellkalibrierung.

Die Ergebnisse der teilautomatisierten Modellierung zeigen, dass mit Random Forest eine flächendeckend hoch aufgelöste Vorhersage von Bodeneigenschaften technisch grundsätzlich möglich ist (GRIMM ET AL. 2008, WIESMEIER ET AL. 2011, LIEß ET AL. 2012). Die räumliche Analyse der Ergebnisse und der flächendeckende Vergleich der teilautomatisierten Modellierung mit den wissensbasierten Prognosen belegen jedoch, dass RF nur auf etwa der Hälfte der Waldfläche die Wasserspeicherfähigkeit für die Standortbedingungen räumlich plausibel differenzieren kann. In den übrigen Waldbereichen des Untersuchungsgebietes offenbart die teilautomatisierte Modellierung verbreitete Fehlprognosen, nicht nachvollziehbare Verteilungsmuster der nFK-Werte im Hang, inkonsistente Vorhersagen unter fast identischen Standortbedingungen und eine überwiegend geringe Aussagesicherheit (*CPE*) der Prognosen. Zudem weist RF falsche Prognosen auf den Waldflächen aus, für die aus inhaltlichen und technischen Gründen keine flächenrepräsentativen Aussagen zur Wasserspeicherfähigkeit der Böden möglich sind.

Die vorliegende Datenbasis von 0,6 Bodenprofilen pro km² reicht für RF nicht aus, um in einem vielfältigen Naturraum wie dem Jura flächendeckend räumlich plausible Prognosen der nFK liefern zu können. Es ist einzusehen, dass bei dieser Punktdatendichte geostatistische Regionalisierungsverfahren (BORUVKA ET AL. 2007, KELLER ET AL. 2011) und

vollautomatisierte Ansätze (BEHRENS ET AL. 2005, ALAVI ET AL. 2010) zu keiner Ergebnisverbesserung führen würden. Vielmehr ist deren Anwendbarkeit bei der vorliegenden Punktdichte im Jura nach aktuellem methodischen Kenntnisstand grundsätzlich auszuschließen.

Die teilautomatisierte Modellierung stößt bei vielen Prädiktorenkombinationen durch die unvollständige und begrenzte Stichprobe an ihre Grenzen. Die RF-Prognosen sind hier auf dem überwiegenden Teil der betroffenen Waldflächen falsch. Zusammenhänge zwischen den bodenbeeinflussenden Faktoren und der Wasserspeicherfähigkeit werden nur unvollständig abgebildet. Damit bestätigen sich die Ergebnisse früherer Untersuchungen (HERBST & MOSIMANN 2009, 2010), wonach die Konsistenz der Stichprobe und die Punktdatendichte gerade für *machine learning methods* wie RF von zentraler Bedeutung für die Qualität der Prognosen sind (HARTEMINK ET AL. 2008). Je geringer der Trainingsdatenumfang ausfällt, desto wichtiger sind die Konsistenz der Fälle und die Vollständigkeit der Abbildung der vielfältigen Zusammenhänge zwischen den Prädiktoren und der standörtlichen Wasserversorgungssituation. Ist diese Voraussetzung nicht gegeben, kommt es unabhängig von der Qualität des Algorithmus unweigerlich zu Fehlprognosen der Zielgröße. Die Möglichkeiten die Prognosen in den kritischen Bereichen zu verbessern und die Flächenanteile offensichtlicher Fehlprognosen zu reduzieren, sind beim teilautomatisierten Ansatz begrenzt. Letztendlich könnte nur eine Ergänzung der Stichprobe um mindestens 20 - 25 Bodenprofile, nach erster Schätzung, zu einer besseren Abdeckung der vielfältigen Prädiktorenkombinationen beitragen. Die Neuaufnahme von Bodenprofilen ist aber sehr zeit- und kostenintensiv. RF stellt für das Untersuchungsgebiet eine hohe Anforderung an die Stichprobenzahl, die für hoch aufgelöste Prognosen kaum erfüllbar ist.

Der lagebezogene Modellvergleich hat sich als unerlässlich erwiesen. Die Ergebnisse stützen die Erkenntnis, dass die Prognosen der wissensbasierten Modellierung den teilautomatisierten Vorhersagen grundsätzlich vorzuziehen sind. Das wissensbasierte Modell liefert für einen deutlich höheren Anteil der Waldflächen (75 %) räumlich plausibel differenzierte Verteilungen der nFK-Werte und die Aussagesicherheit der Prognosen ist insgesamt höher als bei RF. Dies gilt insbesondere für die Waldböden mit kritischen nFK-Werten unter 80 mm. Desweiteren ermöglicht der Modellvergleich eine räumlich differenzierte Beurteilung der RF-Prognosen. Ohne diese Vorgehensweise oder umfangreiches regionales feldbodenkundliches Erfahrungswissen sind kritische und falsche Ergebnisse der teilautomatisierten Modellierung in den Ergebniskarten häufig nicht erkennbar (HERBST & MOSIMANN 2008). Zudem liefern die lagebezogene Übereinstimmung beider Modellvorhersagen und die Ausweisung wissensbasiert nicht prognostizierbarer Flächen wichtige Informationen für eine solide Abschätzung des Wasserspeichervermögens. Deshalb ist bei der gegebenen Datendichte im naturräumlich vielfältigen Untersuchungsgebiet letztendlich nur eine Verwendung der teilautomatisierten RF-Prognosen als Grundlage für weiterführende ökologische Fragestellungen (BRANG ET AL. 2011, WESSELS 2012) denkbar, wenn diese zuvor mit den wissensbasierten Vorhersagen überprüft wurden.

Der Anwendbarkeit und der Übertragbarkeit der entwickelten Modelle auf andere Regionen und größere Gebiete (z.B. gesamter Jura) sind Grenzen gesetzt. Das Kernproblem besteht darin, dass für geostatistische (BORUVKA ET AL. 2007) und automatisierte Modellierungen (ALAVI ET AL. 2010) nach aktuellem Kenntnisstand Datendichten von mindestens 0,5 - 2 Bodenprofilen pro km² erforderlich sind. Eine solche Informationsdichte wird in der Schweiz nur in wenigen kleinen Gebieten erreicht (EGLI ET AL. 2005).

Ein ausschließlich geostatistischer oder vollautomatisierter Ansatz scheidet damit für eine flächendeckende Modellierung von Bodeneigenschaften in großen Gebieten aus. Nach den Erfahrungen aus der Nordwestschweiz kommt hier letztendlich nur ein kombinierter Ansatz faktorenbasierter Modellierung in Frage. Ein möglicher hybrider Modellansatz könnte darin bestehen, die RF-Prognosen auf die Waldflächen zu begrenzen, deren Standortbedingungen weit verbreitet sind und die durch eine möglichst große Stichprobe abgedeckt werden. Parallel dazu erfolgt für die übrigen Waldflächen die Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit mit der wissenschaftlichen Vorgehensweise. Eine solche Verfahrensweise kann natürlich nicht ohne eigene Feldaufnahmen und umfangreiche Geländeerfahrung über die Zusammenhänge zwischen den Standortbedingungen und den örtlichen Bodenverhältnissen durchgeführt werden.

Die Erstellung einer räumlich hochauflösenden Karte der Wasserspeicherfähigkeit für weitere Waldgebiete, schließt deshalb methodische Forschung zur Übertragbarkeit bestehender Modelle und der Kombination verschiedener Ansätze der modellgestützten Bodenvorhersage mit ein. Dabei lassen sich die wichtigsten offenen methodischen Forschungsfragen abschließend wie folgt zusammenfassen:

- Wie hoch muss die Punktdatendichte in Abhängigkeit vom Landschaftstyp mindestens sein, damit eine faktorenbasierte Modellierung des Wasserspeichervermögens durchführbar ist?
- Wie beeinflussen die Qualität und die räumliche Auflösung der verfügbaren Eingangsdaten (Bodenprofile u. Prädiktoren) die regionsspezifischen Prognosemöglichkeiten?
- Wie lassen sich unterschiedliche methodische Ansätze der digitalen Bodenkartierung miteinander kombinieren (z.B. empirisch wissenschaftliche Modellierung und *machine learning* Verfahren)?
- Wie gut sind bestehende, mit höheren Stichprobendichten entwickelte wissenschaftliche Modelle auf größere Gebiete und Regionen mit geringerer Punktdichte übertragbar?
- In welcher räumlichen und inhaltlichen Auflösung ist die Wasserspeicherfähigkeit in größeren Gebieten modellierbar?

9 Ausblick

Die hoch aufgelöste Abschätzung der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden liefert eine wichtige Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Charakterisierung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten (GAUER ET AL. 2011, RUSS & RIEK 2011). Die räumlich differenzierte Ermittlung der Böden mit begrenzter Wasserspeicherkapazität als Ausgleichsmedium für diskontinuierliche Niederschläge (KÖLLING & FALK 2010), ermöglicht die Abschätzung von Waldleistungen verschiedener Areale unter sich ändernden Umwelt- und Klimabedingungen. Mit den sich bereits abzeichnenden und zu erwartenden Klimaänderungen (CH2011 2011), kommen dabei weiterführenden Modellierungen zu ökologischen Fragestellungen, wie der Trockenheitsgefährdung von Waldstandorten (HAMMEL & KENNEL 2001, MÜLLER 2007, RIEK 2010), in der Waldbewirtschaftung eine immer größere Bedeutung zu (HANGEN 2009, BRANG ET AL. 2011). Hierfür haben sich die wissenschaftlichen Prognosen der nFK dieser Arbeit bereits als hinreichend genaue und belastbare Datengrundlage der Modellierung erwiesen (WESSELS 2012).

In der Arbeit von WESSELS (2012) dient die wissenschaftliche Modellierung der nFK als Eingangsparameter für die flächendeckende Abschätzung des Trockenheitsrisikos von Waldstandorten in der Nordwestschweiz. Hierfür wurde ein hoch aufgelöstes Modell entwickelt, welches das Trockenheitsrisiko auf Basis des jahreszeitlichen Verlaufs der relativen Bodenwasserverfügbarkeit abschätzt. Das Modell setzt die Wasserspeicherfähigkeit und die klimatische Wasserbilanz miteinander in Beziehung. Die prognostizierte nFK hat sich als wichtige Eingangsgröße der Modellierung erwiesen. Die Modellergebnisse zeigen, dass mit steigender Wasserspeicherfähigkeit das Trockenheitsrisiko grundsätzlich abnimmt. Standorte mit sehr hohem Trockenheitsrisiko beschränken sich ausschließlich auf Waldflächen für die sehr geringe nFK-Werte prognostiziert wurden.

Die Auflösung der prognostizierten nFK in fünf Klassen gewährleistet generell die Anwendbarkeit für weiterführende ökologische Fragestellungen (z.B. Trockenheitsrisiko, Klimasensitivität von Waldstandorten). Dies insbesondere, da die Waldböden mit kritischen nFK-Werten < 80 mm sicherer als das gesamte Spektrum abgebildet werden können. Eine höher aufgelöste Klassifikation ist mit der vorliegenden Datengrundlage nicht vertretbar. Die Stichprobe ist dafür zu begrenzt und unvollständig. Zudem reichen die Zeigereigenschaften der Prädiktoren nicht aus, um die Zusammenhänge zwischen den Merkmalsausprägungen der Standortfaktoren und der örtlichen Wasserspeicherfähigkeit der Waldböden im mittleren Spektrum der nFK-Werte differenzierter abbilden zu können. Die kleinräumige Variabilität und Amplitude der Wasserspeicherkapazität ist dafür besonders in den Jurahängen weit verbreitet zu groß. Desweiteren würde eine geringere Klassenbreite im Bereich der Fehlerspanne liegen, die sich aus der informationalen Unschärfe bei der Abschätzung der nFK mit der verwendeten PTF ergibt.

Die Genauigkeit der Abschätzung der Wasserspeicherkapazität könnte zukünftig durch die Berücksichtigung der zusätzlich verfügbaren Wassermengen in klüftigem Ausgangsgestein verbessert werden. Dies gilt insbesondere für die flachgründigeren Waldböden mit nFK-Werten unter 80 mm. Mit der Durchwurzelung von Klüften im anstehenden Gestein sind die

für die Bäume effektiv verfügbaren Wassermengen mitunter höher als die Vergleichswerte für 100 cm Bodentiefe (RAISSI ET AL. 2009). Nach einer groben Schätzung von MOSIMANN (2011) beträgt diese zusätzlich verfügbare Wassermenge im nordwestschweizerischen Jura auf anstehendem Kalk etwa 10 bis 30 mm nFK. Zunächst müssen jedoch umfangreiche Feldaufnahmen durchgeführt werden (DACHROTH 2002), um für die verschiedenen petrographischen Gesteinstypen solide Angaben zur variierenden Klüftigkeit und den daraus resultierenden zusätzlichen verfügbaren Wassermengen machen zu können. Desweiteren bedarf es noch der methodischen Forschung, über welchen Prädiktor diese ergänzenden Wasserreserven, beispielsweise als Korrekturfaktoren, in die flächendeckende Modellierung der Wasserspeicherkapazität der Waldböden eingebunden werden können.

Für die Schweiz existieren bisher nur wenige Karten zu den Waldbodeneigenschaften. Es ist deshalb empfehlenswert, den finanzierbaren Aufwand für Kartierungen dafür zu nutzen, um gezielte Bodenaufnahmen zur Verdichtung der Stichprobe in Gebieten mit wenigen Informationen zu den Waldböden durchzuführen (MOSIMANN ET AL. 2011). Hierin besteht eine große Chance, in absehbarer Zeit modellgestützte Vorhersagen wichtiger Waldbodeneigenschaften und der standörtlichen Wasserversorgungssituation auf größeren Waldflächen für die waldbauliche Entwicklungsplanung, den Umwelt- und Gewässerschutz sowie für die Klimafolgenforschung verfügbar zu machen.

10 Quellenverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover, 438 S.
- AKS - ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Einteilung, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6. Aufl., Eiching, 352 S.
- ALAVI, A.H., GANDOMI, A.H., MOLLAHASSANI, A., HESHMATI, A.A. & RASHED, A. (2010): Modeling of maximum dry density and optimum moisture content of stabilized soil using artificial neural networks. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, S.368-379.
- AMOS, D.F. & WHITESIDE, E.P. (1975): Mapping accuracy of a contemporary soil survey in an urbanizing area. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 39, S. 942-973.
- AMT FÜR WALD BEIDER BASEL (2012): Wichtige Kennziffern der Basler, Baselbieter und Schweizer Wälder. URL www.baselland.ch/kennziffern-htm.301593.0.html
- ARRELL, K.E., FISHER, P.F., TAE, N.J. & BASTIN, L. (2007): A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. *Computers & Geosciences* 33, S. 1366-1381.
- BARSCHE, D. (1969): Studien zur Geomorphogenese des zentralen Berner Juras. *Basler Beiträge zur Geographie*, H.9, Basel, 221 S.
- BECK, J., DIETZ, E., FALK, W. & KÖLLING, C. (2009): Ein neuartiges, forstliches, digitales Standortinformationssystem - anpassungsfähig an Ansprüche des Nutzers und geänderte Umweltbedingungen. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2009, Bonn. *Berichte der DBG*, 3 S. Online-Publikation. URL http://eprints.dbges.de/308/1/Beitrag_Bericht_JB.pdf
- BEHRENS, T., FÖRSTER, H., SCHOLTEN, T., STEINRÜCKEN, U., SPIES, E.-D. & GOLDSCHMITT, M. (2005): Digital soil mapping using artificial neural networks. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, S. 21-33.
- BEHRENS, T. & SCHOLTEN, T. (2006): Digital soil mapping in Germany – a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, S. 434-443.
- BEHRENS, T. & SCHOLTEN, T. (2007): A comparison of data-mining techniques in predictive soil mapping. LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. & VOLTZ, M. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping. Developments in Soil Science*, Vol. 33, Amsterdam, S. 353-364.
- BEHRENS, T., ZHU, A., SCHMIDT, K. & SCHOLTEN, T. (2010): Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma* 155, S. 175-185.
- BENITO GARZÓN, M., BLAZEK, R., NETELER, M., SÁNCHEZ DE DIOS, R., SAINZ OLLERO, H. & FURLANELLO, C. (2006): Predicting habitat suitability with machine learning models: The potential area of *Pinus sylvestris* L. in the Iberian Peninsula. *Ecological Modelling* 197, S. 383-393.
- BERK, R.A. (2008a): Classification and Regression Trees (CART). BICKEL, P., DIGGLE, P., FIENBERG, S., GATHER, U., OLKIN, I. & ZEGER, S. [HRSG.]: *Statistical Learning from a Regression Perspective*, Springer Series in Statistics, New York, S. 103-167.
- BERK, R.A. (2008b): Random Forests. BICKEL, P., DIGGLE, P., FIENBERG, S., GATHER, U., OLKIN, I. & ZEGER, S. [HRSG.]: *Statistical Learning from a Regression Perspective*, Springer Series in Statistics, New York, S. 193-255.
- BFS - BUNDESAMT FÜR STATISTIK (2012): Statistischer Atlas der Schweiz - Anteil der bestockten Flächen (Wald und Gehölz) an der Gesamtfläche 1992/1997. URL www.atlas.bfs.admin.ch/core/projects/13/de-de/viewer.htm?13.0.de
- BGS - BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ (2010): Waldboden – Boden des Jahres 2011. Medienmitteilung. URL www.boden-des-jahres.ch/2011/doku/medien_loccallandnews.pdf
- BISCHOFF, N. (2011): Entwicklung eines Modellansatzes zur räumlich hochauflösenden Abschätzung des Waldbrandrisikos in der Nordwestschweiz. Diplomarbeit, Inst. f. Phys. Geogr. u. Lök. Leibniz Universität Hannover, 137 S.

- BITTERLI-BRUNNER, P. & FISCHER, H. (1988): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25.000 Blatt 1067 Arlesheim – Erläuterungen. LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE [HRSG.], Bern.
- BLUME, H.P., BRÜMMER, G.W., SCHWERTMANN, U., HORN, R., KÖGEL-KNABNER, I., STAHR, K., AUERSWALD, K., BEYER, L., HARTMANN, A., LITZ, N., SCHEINHORST, A., STANJEK, H., WELP, G. & WILKE, B.-M. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl., Heidelberg, 593 S.
- BMELV (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2007): Zielsetzung und Konzeption der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald. Konzeptpapier, Berlin, 83 S.
- BOCK, M., BÖHNER, J., CONRAD, O., KÖTHE, R. & RINGELER, A. (2007): Methods for creating Functional Soil Databases and applying Digital Soil Mapping with SAGA GIS. HENGL, T., PANAGOS, P., JONES, A. & TÓTH, G. [HRSG.]: Status and prospect of soil information in south-eastern Europe: soil databases, projects and applications. JRC Scientific and Technical Reports, Luxembourg, S. 149-189.
- BÖHNER, J. (2011): Modelle und Modellierungen. GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U. & REUBER, P. [HRSG.]: Geographie - Physische Geographie und Humangeographie, 2. Aufl., Heidelberg, S. 144-149.
- BÖHNER, J & KÖTHE, R. (2003): Bodenregionalisierung und Prozessmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. Petermanns Geographische Mitteilungen 147, 2003/3, S. 72-82.
- BOETTINGER, J.L., HOWELL, D.W., MOORE, A.C., HARTEMINK, A.E. & KIENAST-BROWN, S. [HRSG.] (2010): Digital Soil Mapping - Bridging Research, Environmental Application and Operation. Progress in Soil Science 2, Dordrecht, 440 S.
- BONO, R. (1985): Lössböden im Niederen und Hohen Sundgau. MOSIMANN, T. [HRSG.]: Böden der Region Basel. Basler Beiträge zur Physiogeographie. H. 8., Basel, S. 17-28.
- BORUVKA, L., MLÁDKOVÁ, L., PENIZEK, V., DRÁBEK, O. & VASAT, R. (2007): Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. Geoderma 140, S.374-382.
- BOU KHEIR, R., BOCHER, P.K., GREVE, M.B. & GREVE, M.H. (2010): The application of GIS based decision-tree models for generating the spatial distribution of hydromorphic organic landscapes in relation to digital terrain data. Hydrol. Earth Sci. 14, S. 847-857.
- BRANG, P., BORN, J., AUGUSTIN, S., KÜCHLI, C., PAULI, B., THÜRIG, E., WERMELINGER, B., WOHLGEMUTH, T. & ZIMMERMANN, N.E. (2011): Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Synthese der ersten Programmphase 2009 - 2011. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf und Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 51 S.
- BREIMAN, L. (1996): Bagging Predictors. Machine Learning 24, S. 123-140.
- BREIMAN, L. (2001): Random Forests. Machine Learning 45, S. 5-32.
- BREIMAN, L. (2004): Manual on setting up, using and understanding Random Forests V4.0. Berkeley, 33 S. URL http://oz.berkeley.edu/users/breiman/Using_random_forests_v4.0.pdf
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J., OLSHEN, R. & STONE, C. (1984): Classification and Regression Trees. Belmont, CA, 358 S.
- BREIMAN, L. & CUTLER, A. (2007): Random Forests. Online Tutorial, GNU General Public License. URL www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm
- BRUBAKER, S.C., JONES, A.J., FRANK, K. & LEWIS, D.T. (1994): Regression Models for Estimating Soil Properties by Landscape Position. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 58, S. 1763-1767.
- BRUIN, DE S. & STEIN, A. (1998): Soil-landscape modelling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a Digital Elevation Model. Geoderma 83, S. 17-33.
- BUI, E.N., BRENT, L.H. & VIERGEVER, K. (2006): Knowledge discovery from models of soil properties developed through data mining. Ecological Modelling 191, S. 431-446.

- BURNAND, J. & HASSPACHER, B. (1999): Waldstandorte beider Basel. Kommentar zur vegetationskundlichen Standortkartierung der Wälder. Quellen und Forschungen zur Geschichte und Landeskunde des Kanton-Basel-Landschaft, Bd. 72, Liestal, 266 S.
- BURROUGH, P.A. & McDONELL, R.A. (1998): Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York, 190 S.
- BURROUGH, P.A., VAN GAANS, P.F.M. & MACMILLAN, R.A. (2000): High resolution landform classification using fuzzy k-means. Fuzzy Sets and Systems 113, S. 37-52.
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. C2SM, METEOSWISS, ETH, NCCR CLIMATE & OCCO [HRSG.], Zürich, 88 S. URL www.ch2011.ch
- CHEN, C., LIAW, A. & BREIMAN, L. (2004): Using Random Forest to learn imbalanced data. Dept. of Statistics, UC Berkeley, 12 S. URL <http://oz.berkeley.edu/users/chenchao/666.pdf>
- COLE, N.J. & BOETTINGER, J.L. (2007): Pedogenic understanding raster classification methodology for mapping soils, Powder River Basin, Wyoming, USA. LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. & VOLTZ, M. [HRSG.]: Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective. Developments in Soil Science, Vol. 33, S. 377-388.
- CONRAD, O. (2002): DiGeM – Software for Digital Terrain Analysis. URL <http://www.geogr.uni-goettingen.de/pg/saga/digem/>
- CONRAD, O. (2006): SAGA - Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen. Dissertation, Göttingen, 233 S.
- COOK, S.E., CORNER, R.J., GREALISH, G., GESSLER, P.E. & CHARTRES, C.J. (1996): A rule-based system to map soil properties. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 60, S. 1893-1900.
- CUTLER, D.R., EDWARDS, T.C., BEARD, K.H., CUTLER, A., HESS, K.T., GIBSON, J. & LAWLER, J.J. (2007): Random Forests for Classification in Ecology. Ecology 88 (11), S. 2783-2792.
- DACHROTH, W.R. (2002): Handbuch der Baugewandte Geologie und Geotechnik. Springer, Heidelberg, 681 S.
- DAHINDEN, C. (2007): An Improved Random Forests Approach with Application to the Performance Prediction Challenge Datasets. Sem. f. Statistik, ETH Zürich, 6 S. URL <http://stat.ethz.ch/~dahinden/Paper/Bookchapter.pdf>
- DE'ATH, G. & FABRICIUS, K.E. (2000): Classification and Regression Trees: A Powerful Yet Simple Technique for Ecological Data Analysis. Ecology 81, Nr.11, S. 3178-3192.
- DENG, Y. (2007): New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation and classification. Progress in Physical Geography 31 (4), S. 405-419.
- DEUMLICH, D., SCHMIDT, R. & SOMMER, M. (2010): A multiscale soil-landform relationship in the glacial-drift area based on digital terrain analysis and soil attributes. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, S. 843-851.
- DIETZ, E., FALK, W., BECK, J., HÄRING, T., OSENSTETTER, S. & KÖLLING, C. (2009): Flächenhaftes Prognosemodell für Stauwasserböden unter Wald aus Bodenparametern, DGM, Klima und Vegetation. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2009, Bonn. Berichte der DBG, 4 S. Online-Publikation. URL http://eprints.dbges.de/346/1/DBG_2009_Dietzetal.pdf
- DIKAU, R. & SCHMIDT, J. (1999): Georeliefklassifikation. SCHNEIDER-SLIWA, R., SCHAUB, D. & GEROLD, G. [HRSG.]: Angewandte Landschaftsökologie – Grundlagen und Methoden, Berlin Heidelberg, S. 217-244.
- DIN 19683-1 (1973): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung. Ersetzt durch DIN ISO 11277:2002-08.
- DIN 19683-2 (1973): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat. Ersetzt durch DIN ISO 11277:2002-08.

- DOBOS, E. & HENGL, T. (2009): Soil Mapping Applications. HENGL, T. & REUTER, H.I. [HRSG.]: Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science 33, Amsterdam, S. 461-479.
- DRAGUT, L. & BLASCHKE, M. (2006): Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81, S. 330-344.
- EBERHARDT, E. (2011): Bodenkundliche Kartenwerke. Handbuch der Bodenkunde, 35. Erg. Lfg. 09/11, Wiley-VCH, Weinheim, 16 S.
- EGLI, M., HÄFLIGER, S. & ACKERMANN, M. (2004): Modellierung von Bodenkarten: Ansätze zur Verbesserung der bestehenden Grundlagen. *Bulletin BGS* 27, S.45-48.
- EGLI, M., MARGRETH, M., VÖKT, U., FITZE, P., TOGNINA, G. & KELLER, F. (2005): Modellierung von Bodentypen und Bodeneigenschaften im Oberengadin (Schweiz) mit Hilfe eines geographischen Informationssystems (GIS). *Geographica Helvetica*, Jg.60, H.2, S. 87-96.
- EHSANI, A.H. & QUIEL, F. (2008): Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. *Geomorphology* 99, S. 1-12.
- ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5. Aufl., Stuttgart, 1095 S.
- ESRI (2011): World Imagery Map Service. URL <http://services.arcgisonline.com/arcgis/services>
- FALK, W. & DIETZ, E. (2009): Wassermangelvorhersage mittels digitaler Standortskarten in Bayern - Methoden und erste Ergebnisse im Projektgebiet Nordostbayern. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 82, S.135-144.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2011): State of the world's forests. Rom, 164 S. URL www.fao.org/docrep/013/2000e/2000e00.htm
- FLORINSKY, I.V. (2012): Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam, 379 S.
- FÖRSTER, H., BEHRENS, T. & SCHOLTEN, T. (2005): Übertragbarkeit von Bodenformengesellschaften des Pfälzer Waldes in das mittlere Saaletal mit Künstlichen Neuronalen Netzen. *Mitt. Dt. Bodenk. Ges.* 106, S.71-72.
- FRACEK, K. & MOSIMANN, T. (2012): Wissensbasierte Modellierung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereichs in den Waldböden des Kantons Basel-Landschaft (Nordwestschweiz). *Waldökologie, Landschaftsforschung u. Naturschutz, AFSV*, 12 S. (*im Druck*)
- FRIEDRICH, C. (2001): GIS-basierte Regionalisierung und Quantifizierung unscharfer Bodeninformationen mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie. *Boden und Landschaft*, Bd. 35, Gießen, 206 S.
- FVA - FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG [HRSG.] (2009): Bedeutung des Klimawandels für Bodenprozesse. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, H. 82, Freiburg, 226 S.
- GAUER, J. (2009): Böden als Waldstandorte. Handbuch der Bodenkunde, 32. Erg. Lfg. 06/09, Wiley-VCH, Weinheim, 80 S.
- GAUER, J., FEGER, K.-H. & SCHWÄRZEL, K. (2011): Erfassung und Bewertung des Wasserhaushalts von Waldstandorten in der forstlichen Standortskartierung: Gegenwärtiger Stand und künftige Anforderungen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, H.12, S.7-16.
- GEITNER, C., TUSCH, M., MEIßL, G., KRINGER, K. & WIEGAND, C. (2011): Der Einfluss des Reliefs auf die räumliche Verteilung der Böden: Grundsätzliche Überlegungen zu Wirkungszusammenhängen und Datengrundlagen anhand von Beispielen in den Ostalpen. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 55, Suppl. 3, S. 127-146.
- GRIMM, R., BEHRENS, T., MÄRKER, M. & ELSENBEEER, H. (2008): Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island – Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma* 146, S. 102-113.

- GRUNWALD, S. (2009): Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma* 152, S.195-207.
- GUTERSOHN, H. (1969): *Geographie der Schweiz, Band 1: Jura*. Bern, 267 S.
- HAMMEL, K. & KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München*, Nr. 185/2001, 135 S.
- HAMZA, M. & LAROCQUE, D. (2005): An empirical comparison of ensemble methods based on classification trees. *J. Statistical Computation and Simulation*, Vol.75, Nr. 8, S.629-643.
- HANGEN, E. (2009): Nutzbare Feldkapazität in Forstböden Bayerns - Abschätzung von Klimaeffekten. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 82, S.145-159.
- HANGEN, E. & SCHERZER, J. (2004): Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushaltes. Studie im Auftrag des BMVEL, Ranschbach, 68 S.
- HANGEN, E. & SCHERZER, J. (2005): Einfluss von Waldstrukturen auf Kennwerte des Wasserhaushaltes in Rein- und Mischbeständen – Modellierung des Wasserhaushaltes in Waldbeständen. *Literaturstudie im Auftrag des BFH*, Neustadt, 102 S.
- HÄRING, T. & SCHRÖDER, B. (2010): A review of model-error in digital soil mapping: Confronting statistical soil landscape models with large field validation data. *Geophysical Research Abstracts*, Vol.12. URL <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-12757.pdf>
- HARTEMINK, A.E., MCBRATNEY, A. & MENDOCA-SANTOS, M.L. [HRSG.] (2008): *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer, 445 S.
- HENGL, T. (2009): *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*. Amsterdam 290 S.
URL <http://spatial-analyst.net/book/>
- HENGL, T. & MACMILLAN, R.A. (2009): *Geomorphometry - A Key to Landscape Mapping and Modelling*. HENGL, T. & REUTER, H.I. [HRSG.] (2009): *Geomorphometry – Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33, Amsterdam, S. 433-479.
- HENGL, T. & REUTER, H.I. [HRSG.] (2009): *Geomorphometry – Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33, Amsterdam, 765 S.
- HERBST, P. & MOSIMANN, T. (2008): Prognose der Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden in der Nordwestschweiz – Entwicklung einer Pedotransferfunktion und Vergleich der Vorhersage mit halbautomatisierten Random Forest-Modellen und wissensbasierten Modellen. *Geosynthesis online*, Bd. 4, Hannover, 125 S.
URL www.phygeo.uni-hannover.de/publikationen/download/geoo4.pdf
- HERBST, P. & MOSIMANN, T. (2009): Hochauflösende Vorhersage von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2009, Bonn. *Berichte der DBG*, 4 S. Online-Publikation. URL <http://eprints.dbges.de/400/>
- HERBST, P. & MOSIMANN, T. (2010): Prognose ökologisch wichtiger Waldbodeneigenschaften mit Random Forest in der Nordwestschweiz – Vergleich der Vorhersagen mit wissensbasierter empirisch-statistischer Modellierung. *Geomatik Schweiz*, H.4/2010, S. 140-144.
- HERBST, P., GROSS, J., MEER, U. & MOSIMANN, T. (2012): Geomorphographic terrain classification for predicting forest soil properties in Northwestern Switzerland. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 56, H.1, S. 1-22.
- HOFMANN, M., ENGELHARDT, S., HUWE, B. & STUMPP, C. (2009): Regionalizing soil properties in a catchment of the Bavarian Alps. *Eur. J. Forest Res.* 128, S. 597-608.
- HYYPPÄ, H., YU, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., KAASALAINEN, S., HONKAVAARA, E. & RÖNNHOLM, P. (2005): Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser scanning 2005*. Enschede, S. 85-90.

- JENNY, H. (1941): Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York, 281 S.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. (1988): Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11), S. 1593-1600.
- JORDAN, A. & GLATZEL, S. (2008): GIS-gestützte Regionalisierung der Bodenatmung auf Basis des Regression Kriging. *GIS.Science* 4 (2008), S. 4-11.
- KELLER, A., REHBEIN, K., SCHWIERZ, C. & PAPRITZ, A. (2011): Robuste geostatistische Methoden zur räumlichen Analyse und Kartierung von Bodeneigenschaften. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2011, Berlin. Mitteilungen der DBG, 4 S. Online-Publikation.
URL http://eprints.dbges.de/805/1/Mittlg_DBG_Keller2011.pdf
- KLINGEISEN, B., METTERNICHT, G. & PAULUS, G. (2008): Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environmental Modelling & Software* 23, S. 109-121.
- KÖLLING, C. & FALK, W. (2010): Heute reichlich, morgen knapp: Wasser im Wald. *LWF aktuell* 78/2010, S.15-17.
- KÖNIG, M.A. (1972): Der Schweizer Jura. *Kleine Geologie der Schweiz*, Thun, S. 108-121.
- KÖTHE, R & LEHMEIER, F. (1996): SARA – System zur Automatischen Relief-Analyse. User Manual, 2. Ed., Göttingen.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. & SCHWERDTFEGER, G. (1994): *Bodenkunde*. 5. Aufl., Stuttgart, 424 S.
- LABHART, T.P (2001): Das Juragebirge. *Geologie der Schweiz*, Thun, S. 40-52.
- LAGACHERIE, P. (2008): Digital Soil Mapping: A State of the Art. HARTEMINK, A.E., MCBRATNEY, A. & MENDOCA-SANTOS, M.L. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping with Limited Data*, S 3-14.
- LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. & VOLTZ, M. [HRSG.] (2007): *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science*, Vol. 33, Amsterdam, 600 S.
- LI, Z., ZHU, Q. & GOLD, C. (2005): *Digital Terrain Modeling - Principles and Methodology*. Boca Raton, 323 S.
- LIAW, A. & WIENER, M. (2002): Classification and Regression by randomForest. *R News*, Vol. 2/3, S.18-22.
- LIAW, A. & WIENER, M. (2010): Breiman and Cutler's random forests for classification and regression. Documentation for package randomForest Version 4.5-36, R port. 27 S.
URL <http://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/randomForest.pdf>
- LIEß, M., GLASER, B. & HUWE, B. (2012): Uncertainty in the spatial prediction of soil texture - Comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma* 170, S. 70-79.
- LWF - BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2011): Karten für die Zukunft - KLIP4. Online Projektbeschreibung.
URL www.lwf.bayern.de/waldoekologie/standort-bodenschutz/projekte/35139/index.php
- MACMILLAN, R.A. (2008): Experience with Applied DSM: Protocol, Availability, Quality and Capacity Building. HARTEMINK, A.E., MCBRATNEY, A. & MENDOCA-SANTOS, M.L. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping with Limited Data*, S 113-135.
- MACMILLAN, R.A., PETTAPIECE, W.W., NOLAN, S.C. & GODDARD, T.W. (2000): A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems* 113, S. 81-109.
- MACMILLAN, R.A., MOON, D.E. & COUPÉ, R.A. (2007): Automated predictive ecological mapping in a Forest Region of B.C., Canada, 2001-2005. *Geoderma* 140, S. 353-373.
- MACMILLAN, R.A. & SHARY, P.A. (2009): Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. HENGL, T. & REUTER, H.I. [HRSG.]: *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* 33, Amsterdam, S. 227 - 254.

- MCBRATNEY, A.B. & ODEH I.O.A. (1997): Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decision. *Geoderma* 77, S. 85-113.
- MCBRATNEY, A.B., MENDOCA SANTOS, M.L. & MINASNY, B. (2003): On digital soil mapping. *Geoderma* 117, S. 3-52.
- McKENZIE, N.J. & GALLANT, J.C. (2007): Digital Soil Mapping with improved environmental predictors and models of pedogenesis. LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. & VOLTZ, M. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science*, Vol. 33, S. 327-352.
- MEERSMANS, J., DE RIDDER, F., CANTERS, F., DE BEATS, S., & VAN MOLLE, M. (2008): A multiple regression approach to assess the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma* 143, S. 1-13.
- MERTENS, M., NESTLER, I. & HUWE, B. (2002): GIS-based regionalization of soil profiles with Classification and Regression Trees (CART). *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, S. 39-43.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. & LANDSON, A.R. (1991): Digital Terrain Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5, S. 3-30.
- MOSIMANN, T. (1985): Böden der Region Basel (südlicher Oberrheingraben und Tafeljura) mit einem Beitrag zur Bodenerosionsproblematik. *Basler Beiträge zur Physiogeographie*. H. 8., Basel, 66 S.
- MOSIMANN, T. (2005): *Waldböden des Kantons Basel-Landschaft*, Bd. 1. *Geosynthesis Sonderband*, Inst. f. Phys. Geogr. u. Lök. Hannover, 119 S.
- MOSIMANN, T. (2011): *Waldböden im Kanton Basel-Landschaft (NW-Schweiz) – Vielfalt, ökologische Eigenschaften und Verbreitung*. In: *Mitt. Naturf. Ges. beider Basel* 13, S. 43-66.
- MOSIMANN, T., FRACEK, K., HERBST, P. & SCHUTT, M. (2006): *Waldböden des Kantons Basel-Landschaft*, Bd. 2. *Geosynthesis Sonderband 2*, Inst. f. Phys. Geog. u. Lök. Hannover, 269 S.
- MOSIMANN, T., FRACEK, K., HERBST, P., PAUL, G., SCHAUER, R. & SCHUTT, M. (2009): *Waldböden des Kantons Basel-Landschaft*, Bd. 3. *Geosynthesis Sonderband 4*, Inst. f. Phys. Geogr. u. Lök. Hannover, 181 S.
- MOSIMANN, T., HERBST, P., GABRIEL, M. & WESSELS, J. (2010): *Waldböden des Kantons Basel-Stadt*. *Geosynthesis Sonderband 5*, Inst. f. Phys. Geog. u. Lök. Hannover, 71 S.
- MOSIMANN, T., HERBST, P., GROß, J. & MEER, U. (2011): Wissensbasierte Modellierung von Waldbodeneigenschaften - Möglichkeiten, Grenzen, Herausforderungen. *Bulletin BGS* 32, S. 43-50.
- MÜLLER, J. (2007): Auswirkung von Trockenheit auf den Waldzustand - Ansätze zur Bewertung der Trockenheitsgefährdung von Waldstandorten. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, Irdning, S. 113-116.
- O'CALLAGHAN, J.F. & MARK, D.M. (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Bd.28, Nr.3/4, S. 323-344.
- OSENSTETTER, S., FALK, W., DIETZ, E., KÖLLING, C. & ZIMMERMANN, L. (2009): Einflüsse der Pedotransferfunktionen auf Ergebnisse bodenhydrologischer Modellierung an Waldstandorten. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2009, Bonn. *Berichte der DBG*, 4 S. Online-Publikation. URL <http://eprints.dbges.de/195/>
- PACHEPSKY, J.A. & RAWLS, W.J. [HRSG.] (2004): Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. *Developments in Soil Science*, Vol. 30, Amsterdam, 512 S.
- PARK, S.J., MCSWEENEY, K., LOWERY, B. (2001): Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. *Geoderma* 103, S. 249-272.
- PAUL, G. (2010): *Wasserversorgung der Waldböden in der Nordwestschweiz. Abschätzung der standörtlichen Wasserversorgung unter dem Einfluss der Wasserspeicherung im Boden sowie den aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen*. Diplomarbeit, Inst. f. Phys. Geogr. u. Lök. Leibniz Universität Hannover, 153 S.

- PENNOCK, D.J., ZEBARTH, B.J. & DE JONG, E. (1987): Landform Classification and Soil Distribution in Hummocky Terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 40, S. 297-315.
- PETERS, J., DE BEATS, B., VERHOEST, N.E.C., SAMSON, R., DEGROEVE, S., DE BECKER, P. & HUYBRECHTS, W. (2007): Random Forests as a tool for ecohydrological distribution modelling. *Ecological Modelling* 207, S. 304-318.
- PRASAD, A., IVERSON, L. & LIAW, A. (2006): Newer Classification and Regression Tress Techniques: Bagging and Random Forests for Ecological Prediction. *Ecosystems* 9, S. 181-199.
- RAISSI, F., MÜLLER, U. & MEESENBURG, H. (2009): Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. 4. Aufl., *Geofakten* 9, Hannover, 7 S.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Wien. URL www.R-project.org
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G. & ZACHARIAS, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. *Bodenökologie und Bodengenese* 40, Berlin, S. 5-51.
- REUTER, H.I., WENDROTH, O. & KERSEBAUM, K.C. (2006): Optimisation of relief classification for different levels of generalization. *Geomorphology* 77, S.79-89.
- RIEK, W. (2010): Regionale und standortsbedingte Unterschiede zu den Auswirkungen des Klimawandels. MIL [HRSG.] (2010): Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 44, S. 38 - 48.
- ROMANO, N. & CHIRICO, G.B. (2004): The Role of Terrain Analysis in Using and Developing Pedotransfer Functions. PACHEPSKY, J.A. & RAWLS, W.J. [HRSG.]: Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. *Developments in Soil Science*, Vol. 30, Amsterdam, S. 273-294.
- RUETTE V., J., PAPRITZ, A., LEHMANN, P., RICKLI, C. & OR, D. (2011): Spatial statistical modeling of shallow landslides – Validating predictions for different landslide inventories and rainfall events. *Geomorphology* 133, S. 11-22.
- RUSS, A. & RIEK, W. (2011): Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des norddeutschen Tieflands. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, H.11, S.5-17.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. & STAHR, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum: eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insb. Land- u. Forstwirte und f. Geowissenschaftler*. Pareys Studentexte 81, Hamburg, 295 S.
- SCHMASSMANN, H. (1959): *Geologischer Bau, Bodenbeschaffenheit und Bodennutzung im Kanton Baselland*. STOECKLE, F.: Die Entwicklung der basellandschaftlichen Waldwirtschaft 1899-1954. Liestal, S.42-62.
- SCHMIDT, K., BEHRENS, T. & SCHOLTEN, T. (2008): Instance selection and classification tree analysis for large spatial datasets in digital soil mapping. *Geoderma* 146, S. 138-146.
- SCHOLTEN, T. (2003): Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen. *Relief Boden Paläoklima*, Bd. 19, Berlin Stuttgart, 149 S.
- SCHRAMM, D., SCHULTZE, B. & SCHERZER, J. (2006): Validierung von Pedotransferfunktionen zur Berechnung von bodenhydraulischen Parametern als Grundlage für die Ermittlung von Kennwerten des Wasserhaushaltes im Rahmen der BZE II. Projektbericht, Freiberg, 169 S. URL <http://download.ble.de/04HS067.pdf>
- SCHULTZE, B., KÖLLING, C., DITTMAR, C., RÖTZER, T. & ELLING, W. (2005): Konzept für ein neues quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern: Modellierung - Regression - Regionalisierung. *Forstarchiv*, 76 Jg., S.155-163.
- SCHULZ, K. (1997): Modellierung von Unsicherheiten bodenphysikalischer und hydrochemischer Prozesse mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie - Theorie und Anwendungen. Shaker, Aachen, 142 S.

- SCULL, P., FRANKLIN, J., CHADWICK, O.A. & MCARTHUR, D. (2003): Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography* 27, Nr. 2, S. 171-197.
- SCULL, P., FRANKLIN, J. & CHADWICK, O.A. (2005): The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Ecological Modelling* 181, S. 1-15.
- SEIBERT, J., STENDAHL, J. & SØRENSEN, R. (2007): Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma* 141, S. 139-148.
- SKIDMORE, A.K., WATFORD, F., LUCKANANURUG, P. & RYAN, P.J. (1996): An Operational GIS Expert System for Mapping Forest Soils. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, Nr. 5, S. 501-511.
- SPIELVOGEL, S., PRIETZEL, J., AUERSWALD, K. & KÖGEL-KNABNER, I. (2009): Site-specific spatial patterns of soil organic carbon stocks in different landscape units of a high elevation forest including a site with forest dieback. *Geoderma* 152, S. 218-230.
- STROBL, C., BOULESTEIX, A.-L., ZEILEIS, A. & HOTHORN, T. (2007): Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution. *BMC Bioinformatics* 2007, Bd. 8:25, 21 S.
- STUM, A.K., BOETTINGER, J.L., WHITE, M.A. & RAMSEY, R.D. (2010): Random Forests Applied as a Soil Spatial Predictive Model in Arid Utah. BOETTINGER, J.L., HOWELL, D.W., MOORE, A.C., HARTEMINK, A.E. & KIENAST-BROWN, S. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping - Bridging Research, Environmental Application and Operation*. *Progress in Soil Science* 2, Dordrecht, S. 179-190.
- SWISSTOPO (2005): DTM-AV. Bundesamt für Landestopographie, Wabern, 4 S.
URL www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dom_dtm-av.html
- TARBOTON, D.G., BRAS, R.L. & RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1991): On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes* 5, S. 81-100.
- TEEPE, R., DILLING, H. & BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, S. 111-119.
- THOMAS, A.L., KING, D., DAMBRINE, E., COUTURIER, A. & ROQUE, J. (1999): Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma* 90, S. 291-305.
- TIMLIN, D.J., WILIAMS, R.D., AHUJA, L.R. & HEATHMAN, G.C. (2004): Simple Parametric Methods to Estimate Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity. PACHEPSKY, J.A. & RAWLS, W.J. [EDS.]: *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. *Developments in Soil Science*, Vol. 30, Amsterdam, S. 71-94.
- UN - UNITED NATIONS (2011): United Nations International Year of Forests 2011.
URL www.un.org/en/events/yof2011/
- VAVRUCH, S. (1985): Bodenformen des Tafeljuras. MOSIMANN, T. [HRSG.]: *Böden der Region Basel*. *Basler Beiträge zur Physiogeographie*. H. 8., Basel, S. 29-42.
- VETTERLEIN, E. (1983): Beziehung zwischen hydraulischer Leitfähigkeit und Bodenwassergehalt in Sandlehm-, Lehm- und Tonsubstraten. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde* 27, H.7, Berlin, S. 417-426.
- VOLTZ, M., LAGACHERIE, P. & LOUCHART, X. (1997): Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *Eur. J. Soil Sci.* 48, S. 19-30.
- WACKERNAGEL, H. (2003): *Multivariate Geostatistics – An Introduction with Applications*. 3.Ed., Berlin, 387 S.
- WALTER, C., LAGACHERIE, P. & FOLLAIN, S. (2007): Integrating Pedological Knowledge into Digital Soil Mapping. LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. & VOLTZ, M. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*. *Developments in Soil Science*, Vol. 33, S. 281-300.

- WALTHERT, L., ZIMMERMANN, S., BLASER, P., LUSTER, J., LÜSCHER, P. (2004): Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura. Birmersdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, 768 S.
- WEBSTER, R. & OLIVER, M.A. (2007): Geostatistics for Environmental Scientists. 2. Ed. SENN, S., SCOTT, M. & BARNETT, V. [HRSG.]: Statistics in Practice, Wiley & Sons, 315 S.
- WEISS, A.D. (2001): Topographic Position and Landforms Analysis. Conference Poster, ESRI Int. User Conference, San Diego.
- WESSELS, J. (2012): Hochauflösende Abschätzung des Trockenheitsrisikos von Waldstandorten in der Nordwestschweiz. Entwicklung und Anwendung eines GIS-basierten Modells. Diplomarbeit, Inst. f. Phys. Geogr. u. Lök. Leibniz Universität Hannover, 119 S.
- WIESMEIER, M., BARTHOLD, F., BLANK, B. & KÖGEL-KNABNER, I. (2011): Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. *Plant Soil* (2011) 340, S.7-24.
- WILSON, J.P. & GALLANT, J.C. [HRSG.] (2000): Terrain Analysis: Principles and applications. New York, 479 S.
- WÖSTEN, J.H.M., PACHEPSKY, J.A. & RAWLS, W.J. (2001): Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251, S.123-150.
- WSL - EIDG. FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALD, SCHNEE UND LANDSCHAFT: Langfristige Waldökosystem-Forschung. Online Projektbeschreibung.
URL www.wsl.ch/dienstleistungen/inventare/lwf/index_DE
- ZADEH, L.A. (1965): Fuzzy sets. *Information and Control* 8/3, S. 338-353.
- ZEIDLER, J. (1999): Unscharfe Entscheidungsbäume. Dissertation, Fakultät für Informatik TU Chemnitz, 106 S.
- ZEVENBERGEN, L.W. & THORNE, C.R. (1987): Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12, S. 47-56.
- ZHANG, J. & GOODCHILD, M. (2002): Uncertainty in Geographical Information. FISHER, P. & RAPER, J. [HRSG.]: *Research Monographs in Geographic Information Systems*, London, 266 S.
- ZHU, A.X., YANG, L., LI, B., QIN, C., ENGLISH, E., BURT, J.E. & ZHOU, C. (2008): Purposive sampling for Digital Soil Mapping for areas with limited data. HARTEMINK, A.E., MCBRATNEY, A. & MENDOCA-SANTOS, M.L. [HRSG.]: *Digital Soil Mapping with Limited Data*, S. 233-245.
- ZIRLEWAGEN, D. (2003): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. *Freiburger Forstliche Forschung* 19, Freiburg, 154 S.

Bemerkung: Auf sämtliche Internetquellen wurde letztmalig am 08.10.2012 zugegriffen.

Anhangsverzeichnis

Abbildungen

Abb. A1	Ergebniskarte der wissensbasierten Prognose der Feldkapazität der Waldböden in den Kantonen BL und BS	150
Abb. A2	Legende der Ergebniskarten der wissensbasierten Modellierung der Feldkapazität	151
Abb. A3	Flächenanteile der wissensbasiert prognostizierten Stufen der Feldkapazität	152
Abb. A4	Flächenbilanzen der wissensbasiert prognostizierten Feldkapazität in den Bodenregionen	152
Abb. A5	Wissensbasierte Prognose der Feldkapazität im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz	153
Abb. A6	Wissensbasierte Prognose der Feldkapazität für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura)	154
Abb. A7	Flächenbilanzen der wissensbasiert prognostizierten Feldkapazität für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura (A. 5, A. 6)	155
Abb. A8	Verlauf des OOB error für die Prognose der FK-Klassen und für den gesamten Random Forest in Abhängigkeit von der Anzahl an Entscheidungsbäumen im Ensemble	156
Abb. A9	Variable importance measures des kalibrierten Random Forest-Modells für die Prognose der FK	156
Abb. A10	Ergebniskarte der Prognose der Feldkapazität der Waldböden mit Random Forest in den Kantonen BL und BS	157
Abb. A11	Legende der Ergebniskarten der Prognose der Feldkapazität mit Random Forest	158
Abb. A12	Flächenanteile der Stufen der prognostizierten Feldkapazität (Random Forest - Prognose)	158
Abb. A13	Flächenbilanzen der Feldkapazität prognostiziert mit Random Forest in den Bodenregionen	159
Abb. A14	Prognose der Feldkapazität mit Random Forest im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz	159
Abb. A15	Prognose der Feldkapazität mit Random Forest für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura)	160
Abb. A16	Flächenbilanzen der prognostizierten Feldkapazität (Random Forest) für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura (A. 15, 16)	161
Abb. A17	Abweichungen der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage in den Kantonen BL und BS	162
Abb. A18	Abweichungen der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz	163

Abb. A19	Legende der Karte der Abweichung der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage	163
Abb. A20	Flächenanteile übereinstimmender und abweichender Prognosen der Feldkapazität mit wissensbasierten und teilautomatisierten Vorhersagen	164
Abb. A21	Abweichungen der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage in den Kantonen BL und BS	165
Abb. A22	Abweichungen der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz	166
Abb. A23	Legende der Karte der Abweichung der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage	166
Abb. A24	Abweichungen der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage für die Beispielgebiete Diepflingen – Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura)	167
Abb. A25	Flächenbilanzierung abweichender nFK-Prognosen im Lösshügelland (Random Forest / Wissensbasiert)	168
Abb. A26	Flächenbilanzierung abweichender FK-Prognosen im Lösshügelland (Random Forest / Wissensbasiert)	168
Abb. A27	Flächenbilanzierung abweichender nFK-Prognosen im Tafel- und Faltenjura (Random Forest / Wissensbasiert)	169
Abb. A28	Flächenbilanzierung abweichender FK-Prognosen im Tafel- und Faltenjura (Random Forest / Wissensbasiert)	169
Abb. A29	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Modellprognosen der FK auf der gesamten Waldfläche mit den Häufigkeitsverteilungen beschränkt auf die Waldflächen mit wissensbasierter Aussage oder bei RF mit einer <i>CPE</i> der Prognosen über 50 %.	170

Tabellen

Tab. A1	Feldkapazität von Teilstichproben der Waldböden im Lösshügelland differenziert nach modellrelevanten Reliefeinheiten und Substratbedingungen	149
Tab. A2	Feldkapazität der ungestörten und der gestörten Waldböden auf den Schotterebenen in der Bodenregion Talböden	149
Tab. A3	Lagebezogene Übereinstimmung der statistisch-begründeten Modellprognosen der FK mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile	155
Tab. A4	Lagebezogene Übereinstimmung der Prognosen der Feldkapazität von Random Forest mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile	161
Tab. A5	Gütemaße des lagebezogenen Vergleichs der wissensbasierten Modellierung der FK mit den Random Forest-Prognosen - Bezug: wissensbasiert prognostizierbare Waldflächen	164

Prädiktor	n	Feldkapazität (mm)				
		Min	Max	Spannweite	\bar{x}	Häufigste FK-Klasse
Bodenregion Lösshügelland	11	220	390	170	350	321-400
Reliefeinheit Divergenzbereich	4	220	390	170	341	321-400
Reliefeinheit Plateaubereich	3	350	387	37	371	321-400
Reliefeinheit Tiefenbereich	4	315	370	55	343	321-400
Gesteinstyp Löss / Decklehm	6	365	390	25	379	321-400
Gesteinstyp (Decken-)Schotter	4	220	350	130	301	241-320

Tab. A1 Feldkapazität von Teilstichproben der Waldböden im Lösshügelland differenziert nach modellrelevanten Reliefeinheiten und Substratbedingungen. Die Bodenprofile werden jeweils einer Reliefeinheit und einem Gesteinstyp zugeordnet. Die Selektion der Bodenaufschlüsse ist damit redundant.

Waldböden der Schotterebenen	n	Feldkapazität (mm)				
		Min	Max	Spannweite	\bar{x}	Häufigste FK-Klasse
Ungestörte Böden	3	98	115	17	114	81-160
Gestörte Böden	5	45	290	245	198	241-320

Tab. A2 Feldkapazität der ungestörten und der gestörten Waldböden auf den Schotterebenen in der Bodenregion Talböden. Die gestörten Böden wurden durch frühere Nutzungen, Umlagerungen, Aufschüttungen und oberflächlichen Auftrag von fremdem Material verändert.

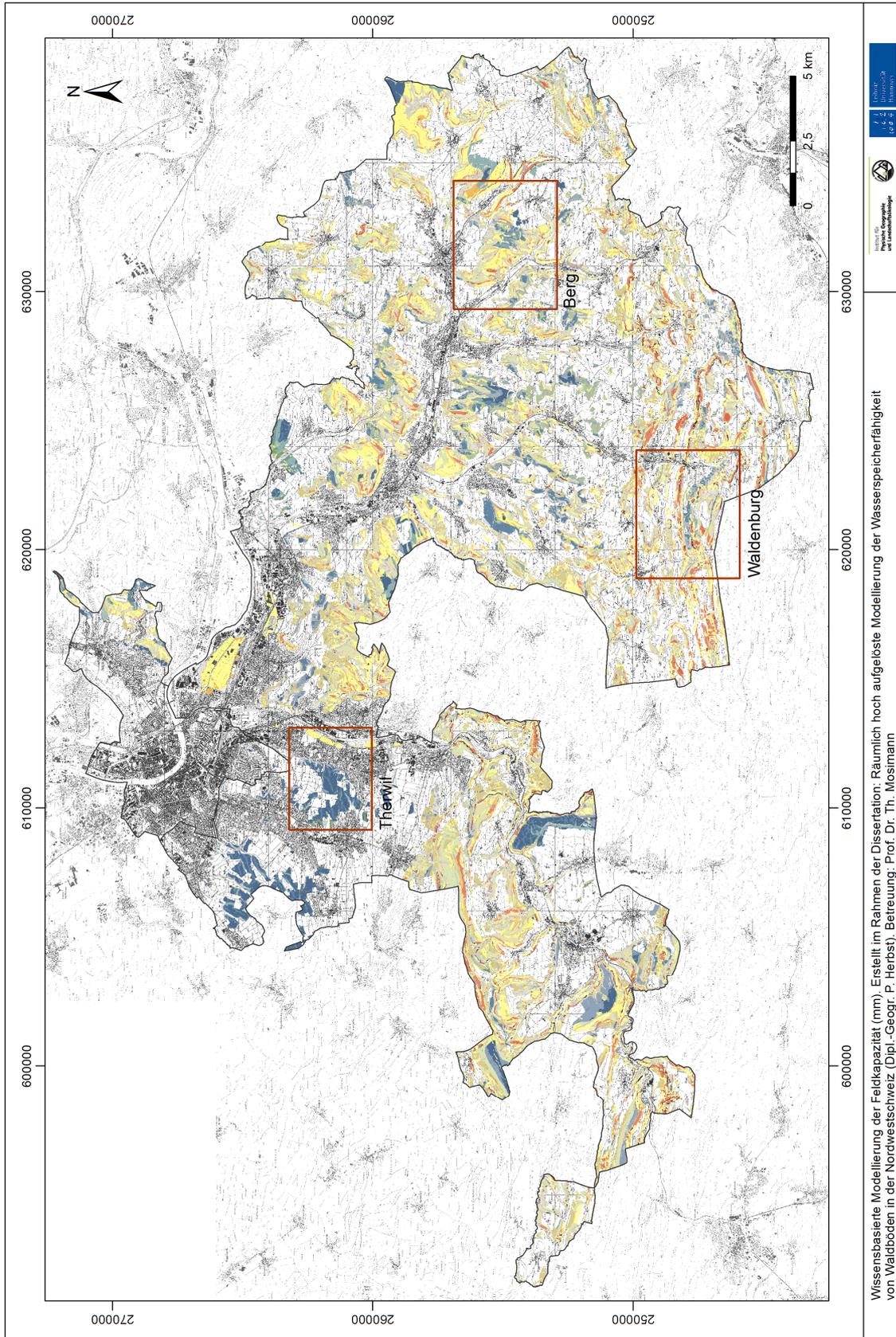


Abb. A1 Ergebniskarte der wissenschaftlichen Prognose der Feldkapazität der Waldböden in den Kantonen BL und BS. Die Legende wird auf der folgenden Seite dargestellt (Abb. A2). Die roten Kästen markieren die Lage der Kartenausschnitte der Abb. A.5 u. A.6. Die Gesamtkarte kann im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html in hoher Auflösung betrachtet werden. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000 swisstopo).

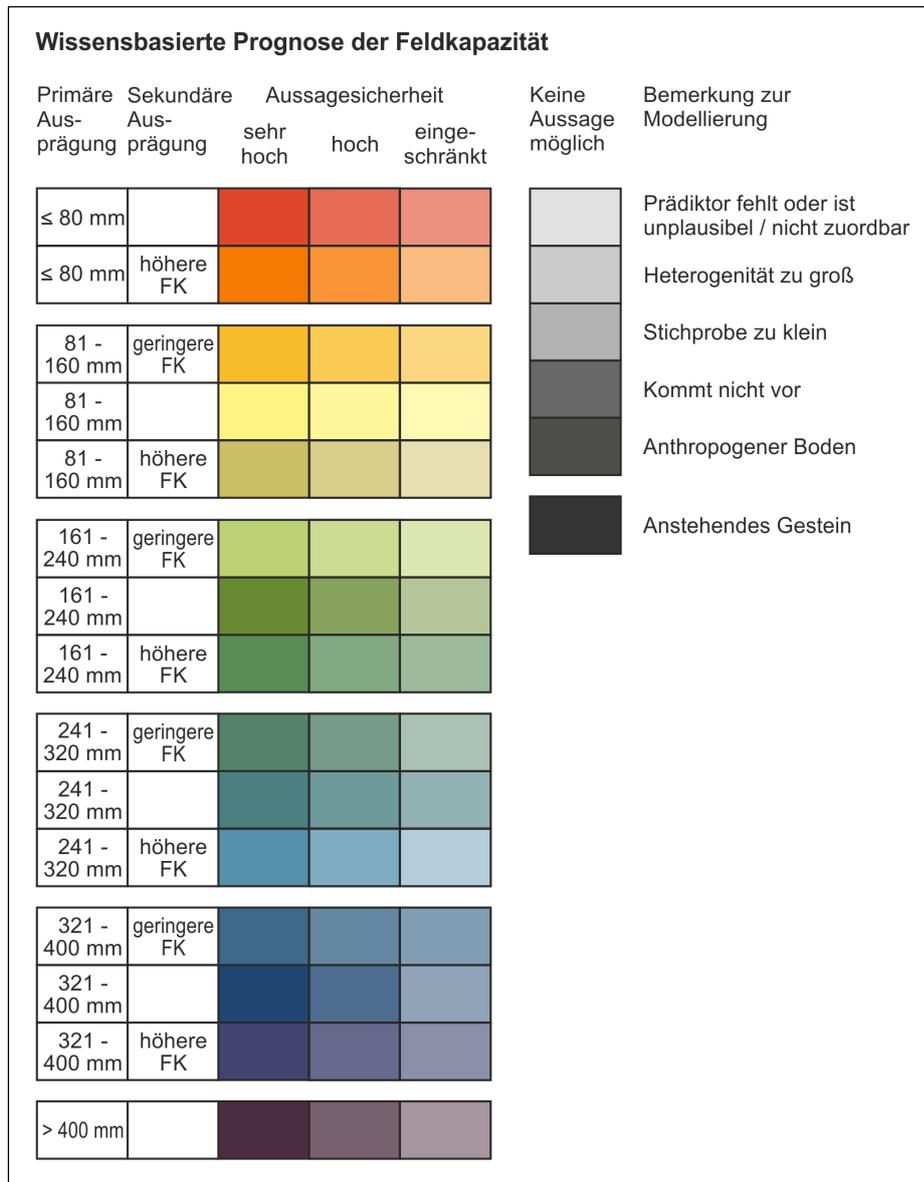


Abb. A2
 Legende
 der Ergebniskarten
 der wissensbasierten
 Modellierung der
 Feldkapazität.

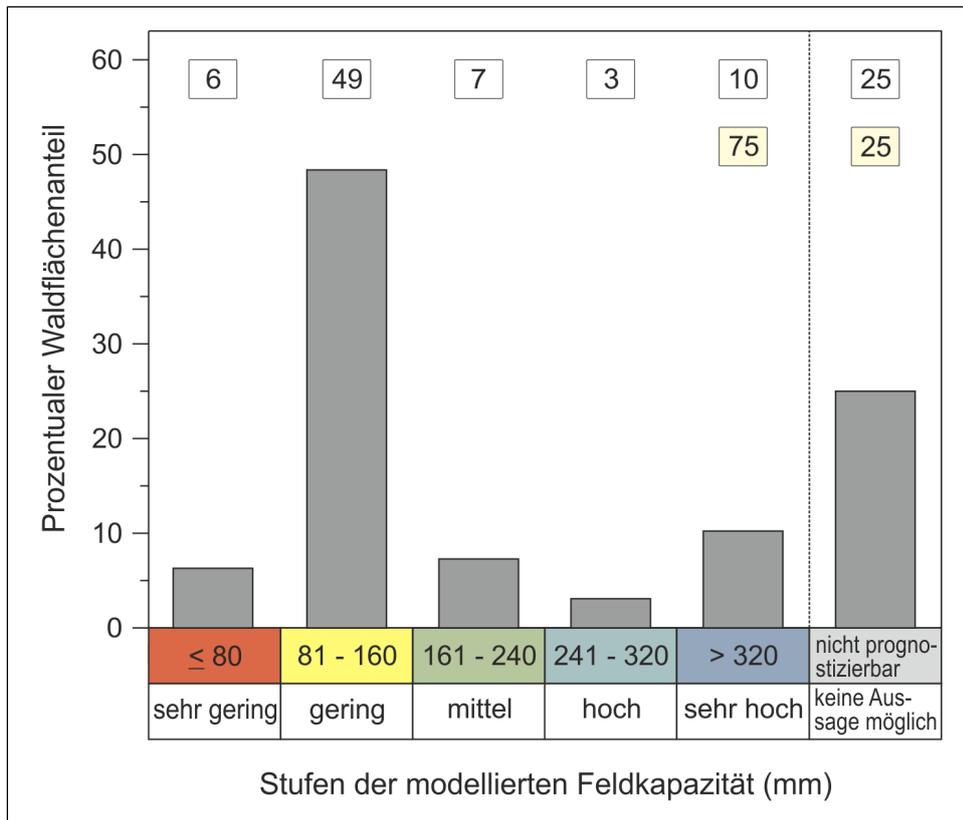


Abb. A3 Flächenanteile der wissenschaftlich prognostizierten Stufen der Feldkapazität. In den weißen Feldern stehen die prozentualen Flächenanteile der einzelnen Klassen. Die hellgelb hinterlegten Felder geben den prozentualen Anteil der prognostizierbaren und der nicht prognostizierbaren Waldflächen an. (Gesamte Waldfläche: 204 km²)

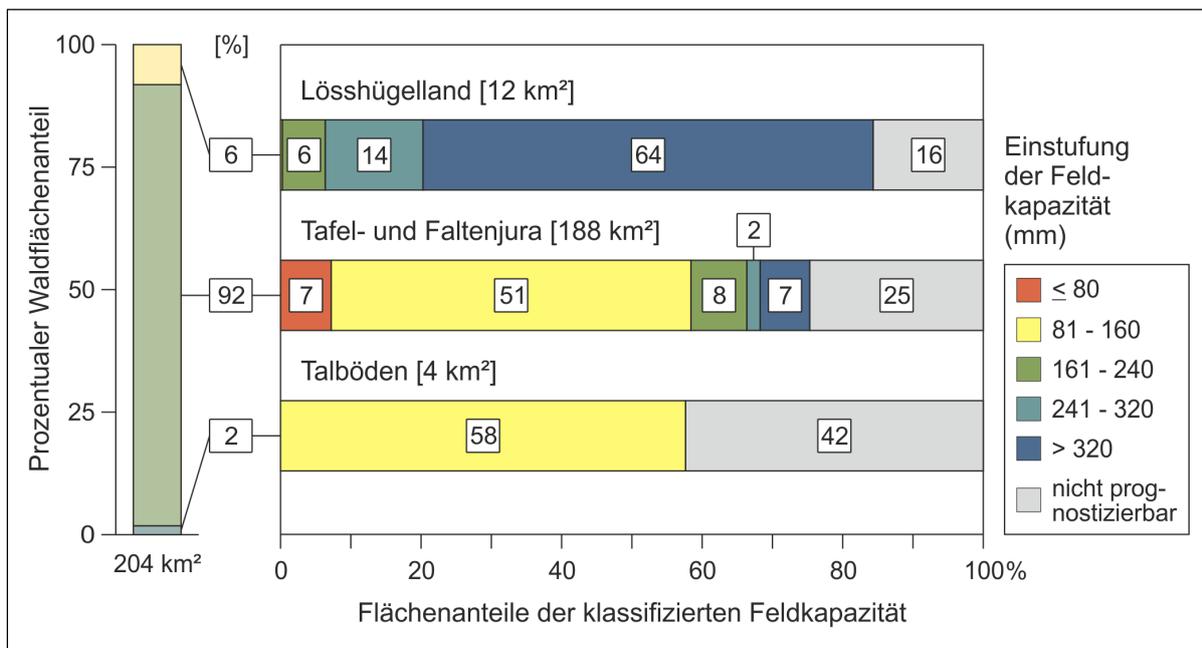


Abb. A4 Flächenbilanzen der wissenschaftlich prognostizierten Feldkapazität in den Bodenregionen. In der Bodenregion Talböden sind von Deckschichten überprägte Schotterareale weit verbreitet. Für Böden auf Aufschüttungen ist derzeit noch keine Vorhersage der FK möglich. Der Flächenanteil für den keine Aussage möglich ist fällt deshalb bei den Talböden hoch aus.

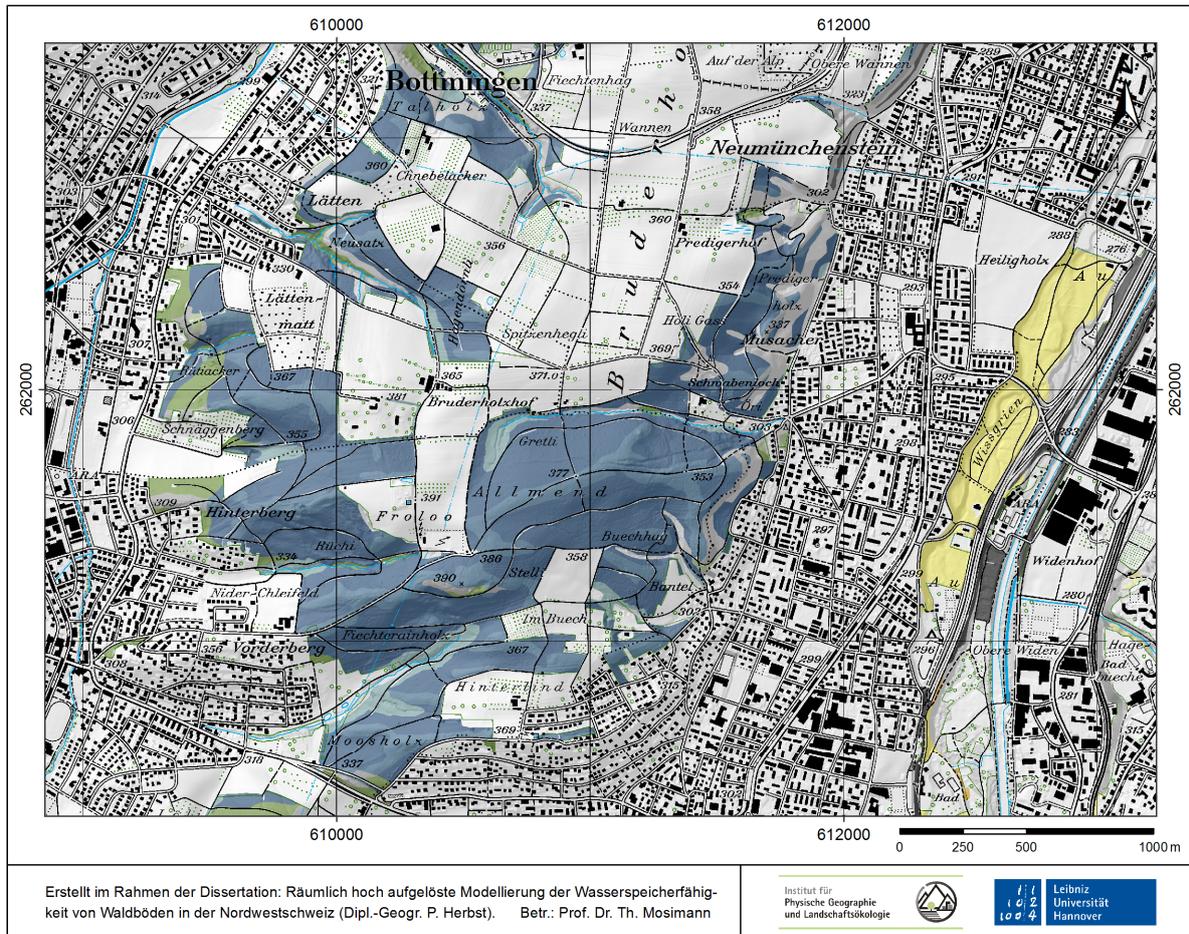


Abb. A5 Wissensbasierte Prognose der Feldkapazität im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz. Die Legende wird in Abb. A2 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1067 Arlesheim (SWISSTOPO).

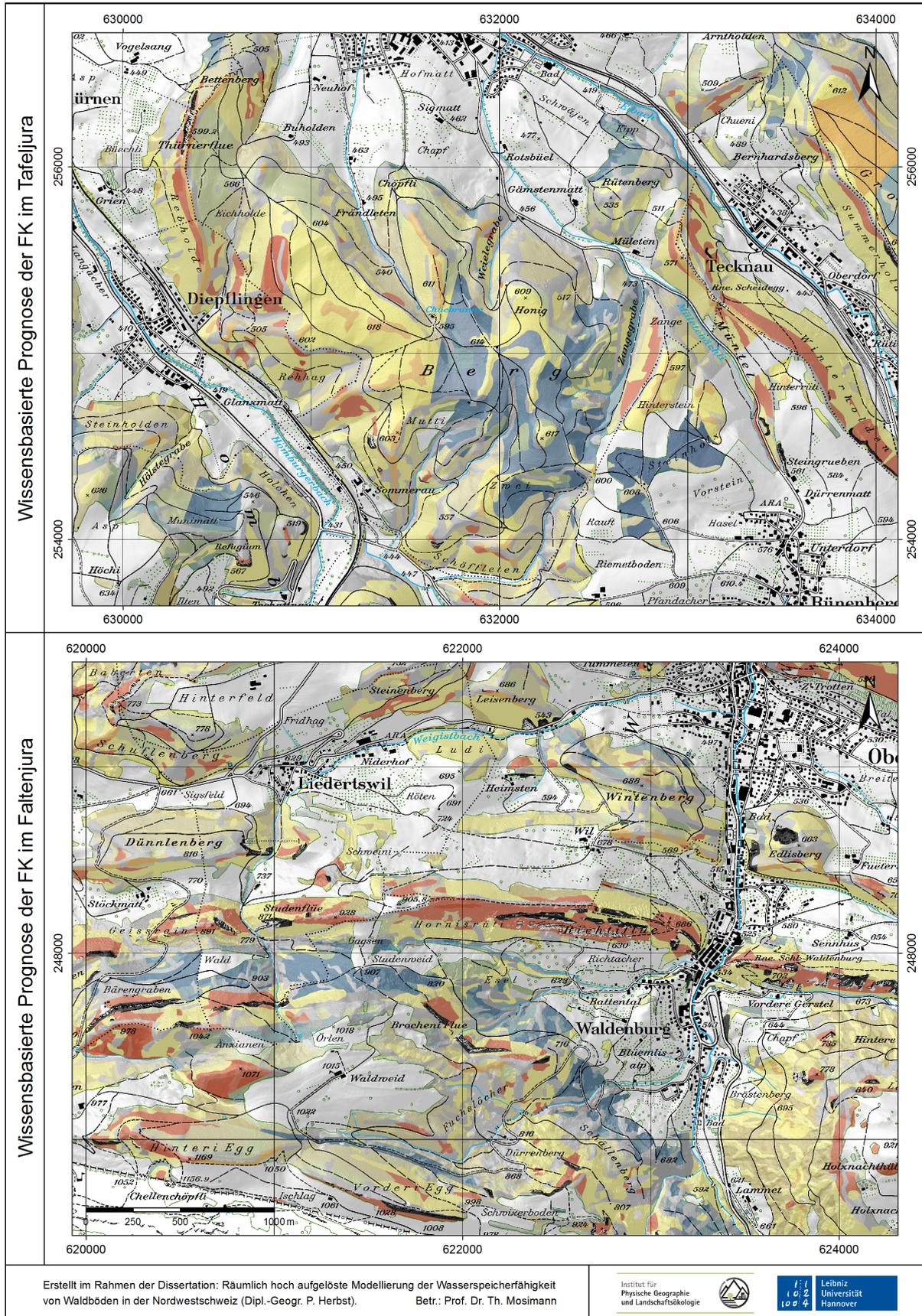


Abb. A6 Wissensbasierte Prognose der Feldkapazität für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura). Die Legende wird in Abb. A2 dargestellt. Topographische Grundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blätter 1068 und 1088 (swisstopo).

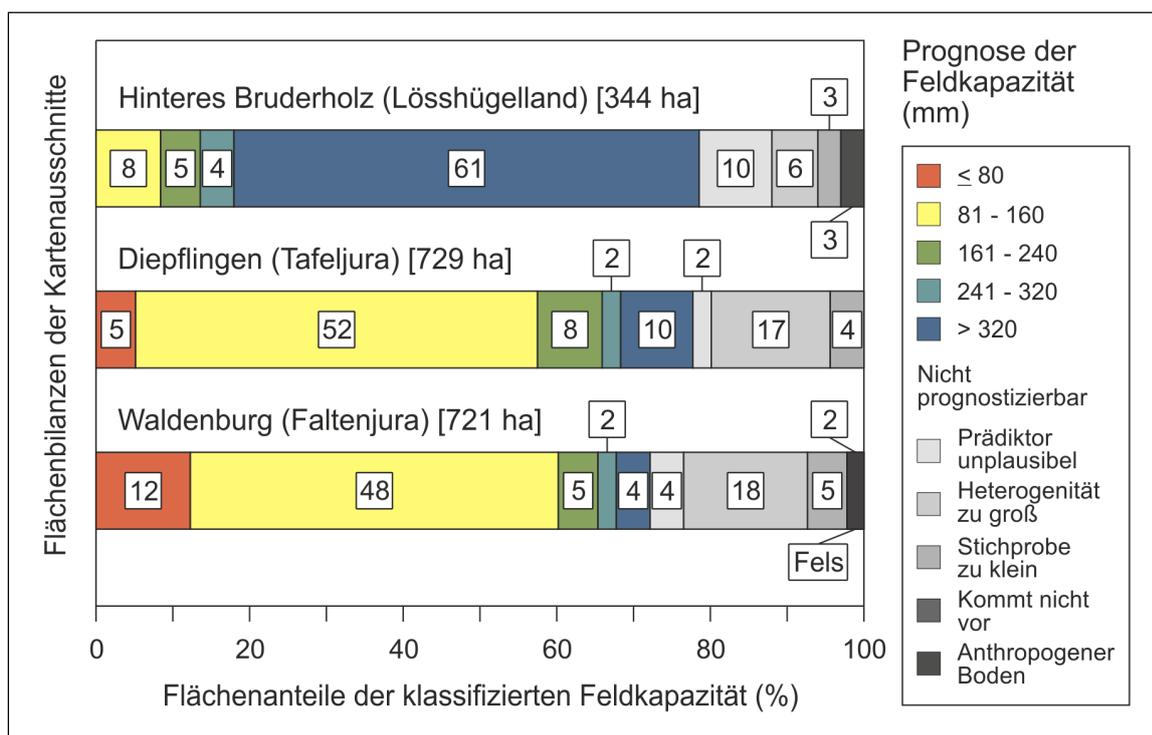


Abb. A7 Flächenbilanzen der wissenschaftlich prognostizierten Feldkapazität für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura (Abb. A 5 u. A6).

Modellregion	n	Gütemaße				ME (-)
		RR (%)	RR-S (%)	N1 (%)	P1 (%)	
Kanton Baselland	39	61,5	74,4	15,4	7,7	- 0,2
Lösshügelland	10	70,0	70,0	30,0	-	- 0,3
Jura	29	58,6	75,8	10,3	10,3	- 0,2

Tab. A3 Lagebezogene Übereinstimmung der statistisch-begründeten Modellprognosen der FK mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile. Die Auswertung bezieht sich nur auf die Waldflächen mit Modellprognosen, die ausschließlich auf den statistischen Verteilungsfunktionen basieren. Dieser Fall kommt in den Talböden nicht vor. Die Talböden fehlen deshalb in der Auswertung. Die Profile sind Grundlage der Modellentwicklung. Die Ergebnisse liefern also Hinweise auf die Güte der Modellkalibrierung. Es handelt sich jedoch um keine Validierung anhand unabhängiger Testdaten. Abkürzungen: RR: Übereinstimmung (*Recall Ratio*) von Prognose (primäre Ausprägung) und Punktinformation, RR-S: Übereinstimmung von Prognose (primäre und sekundäre Ausprägung) und Punktinformation, N1: Anteil der Fälle bei denen die Prognose eine nFK-Klasse niedriger ausfällt, P1: Anteil der Fälle bei denen die Prognose eine nFK-Klasse höher ausfällt, ME: Mean Error (Mittl. Fehler oder systematischer Fehler). ME zeigt an, um wie viel nFK-Klassen die Prognose im Mittel von denen der Bodenprofile abweicht.

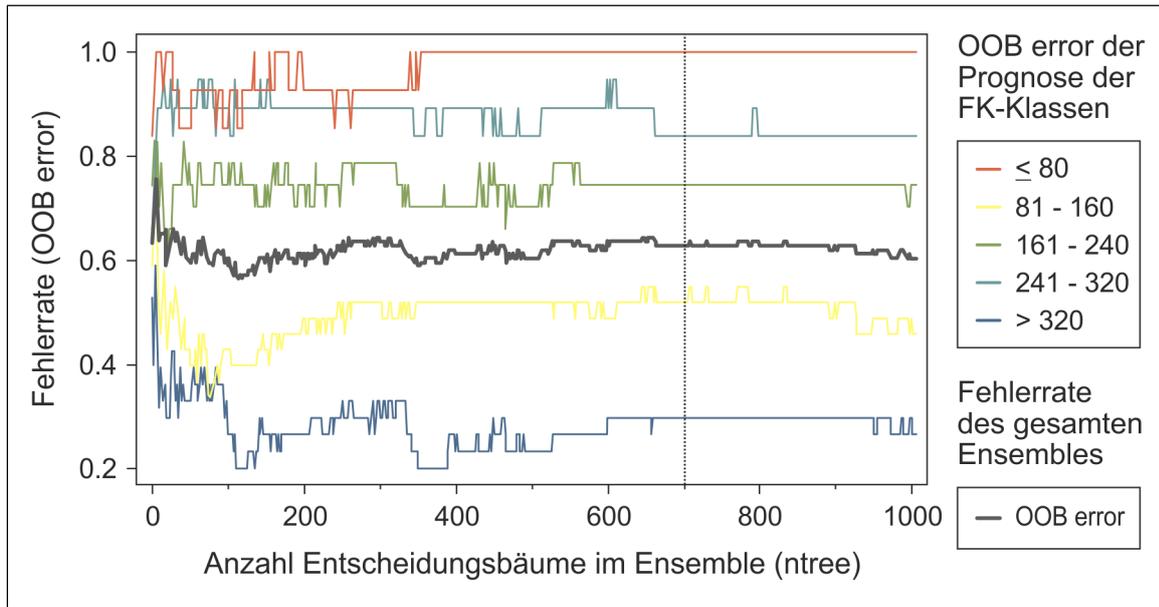


Abb. A 8 Verlauf des OOB error für die Prognose der FK-Klassen und für den gesamten Random Forest in Abhängigkeit von der Anzahl an Entscheidungsbäumen im Ensemble.

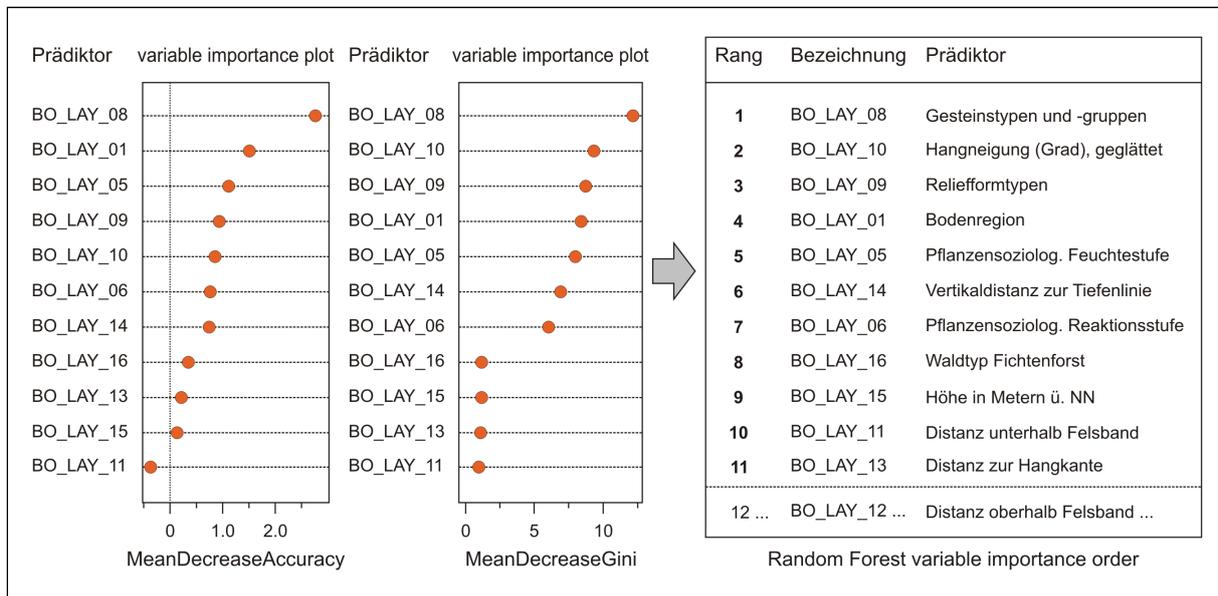


Abb. A9 Variable importance measures des kalibrierten Random Forest-Modells für die Prognose der FK.

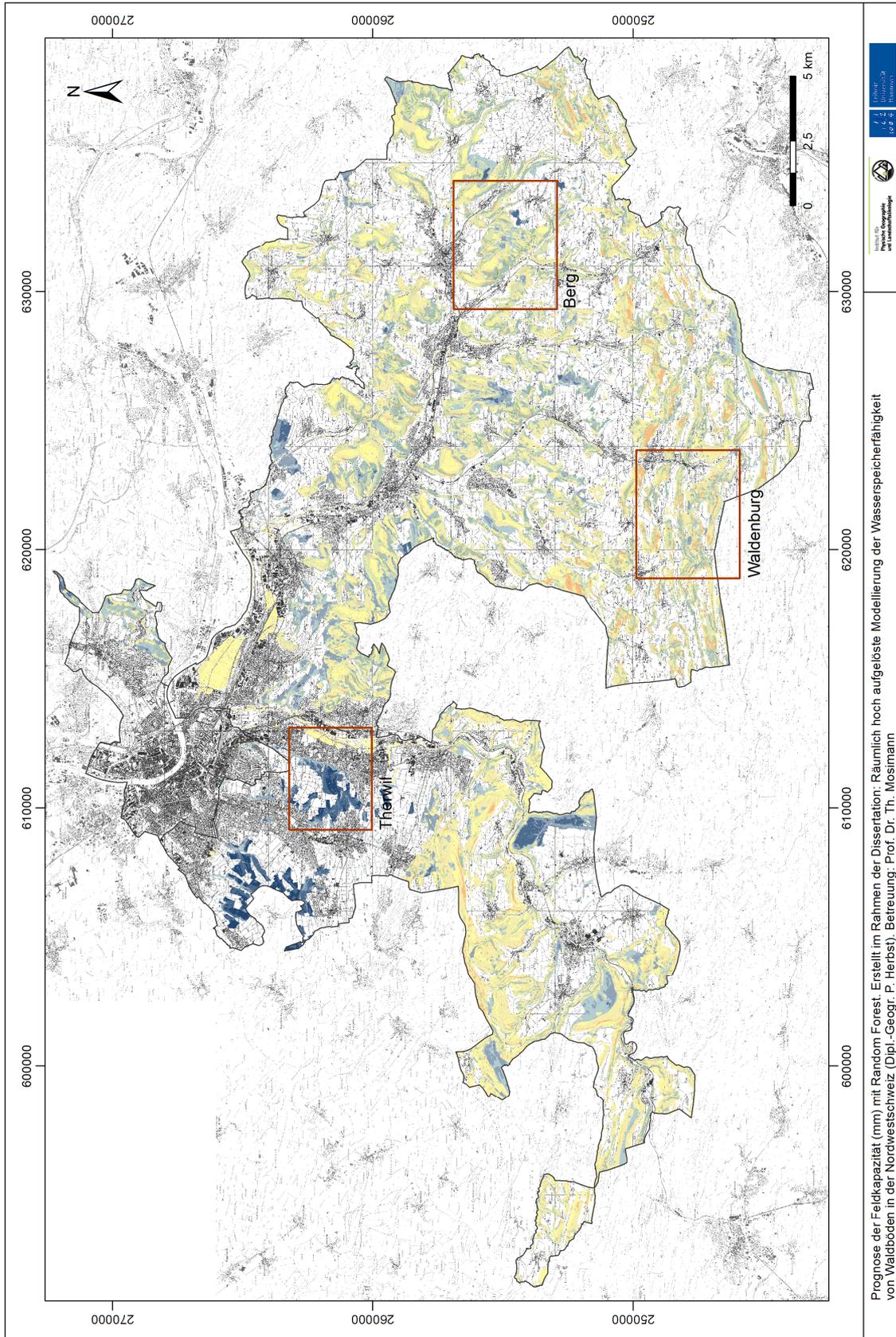


Abb. A10 Ergebniskarte der Prognose der Feldkapazität der Waldböden mit Random Forest in den Kantonen BL und BS. Die Legende (Abb. A11) wird auf der folgenden Seite dargestellt. Die roten Rahmen markieren die Lage der Kartenausschnitte in den Abbildungen A14 u. A15. Die Gesamtkarte kann im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html in hoher Auflösung betrachtet werden. TK-Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000 (SWISSTOPO).

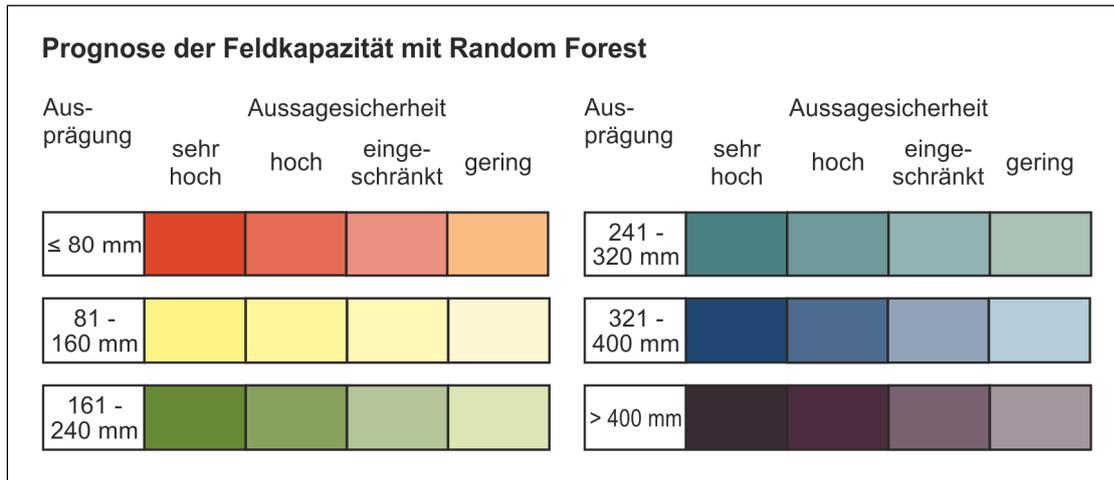


Abb. A11 Legende der Ergebniskarten der Prognose der Feldkapazität mit Random Forest.

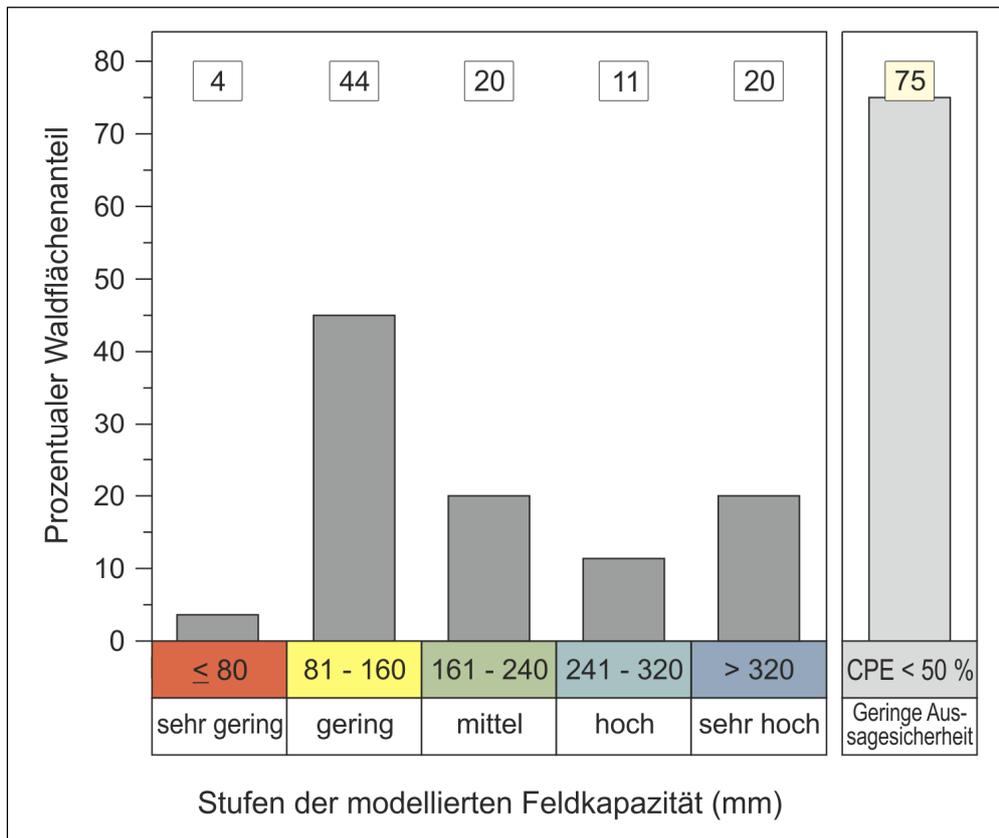


Abb. A12 Flächenanteile der Stufen der prognostizierten Feldkapazität (Random Forest - Prognose). In den weißen Kästen stehen die prozentualen Anteile der einzelnen Klassen bezogen auf die gesamte Waldfläche (rund 204 km²). Das hellgelb hinterlegte Feld gibt den prozentualen Waldflächenanteil an, bei dem die Prognosen eine geringe Aussagesicherheit aufweisen (CPE < 50 %).

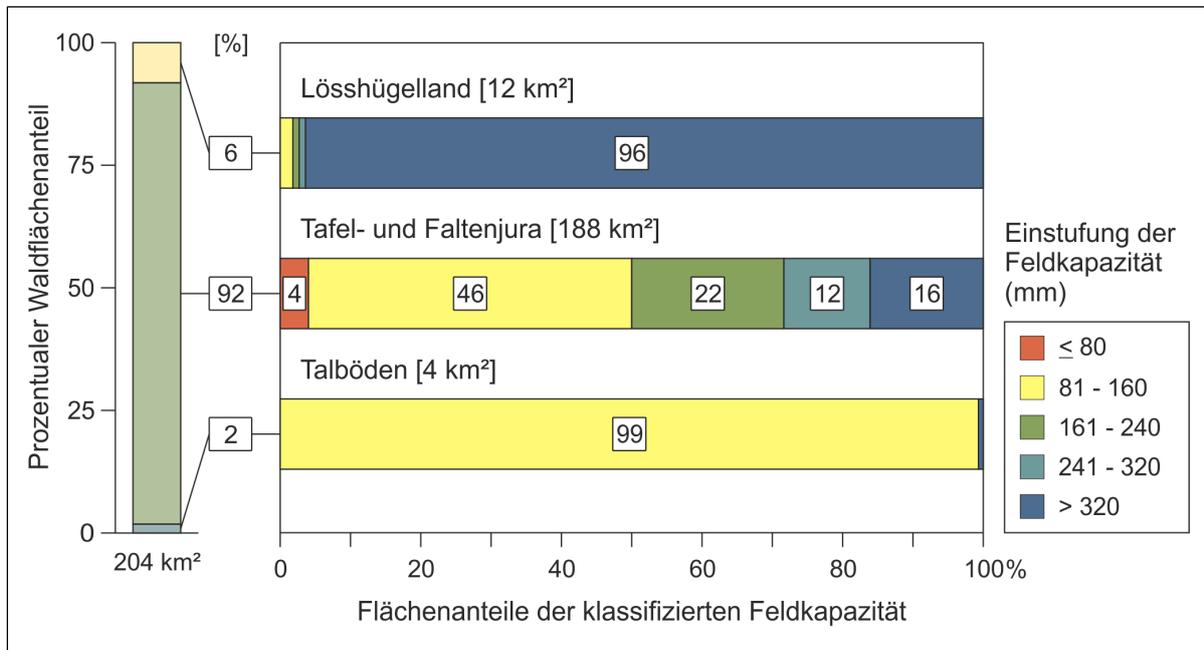


Abb. A13 Flächenbilanzen der Feldkapazität prognostiziert mit Random Forest in den Bodenregionen.

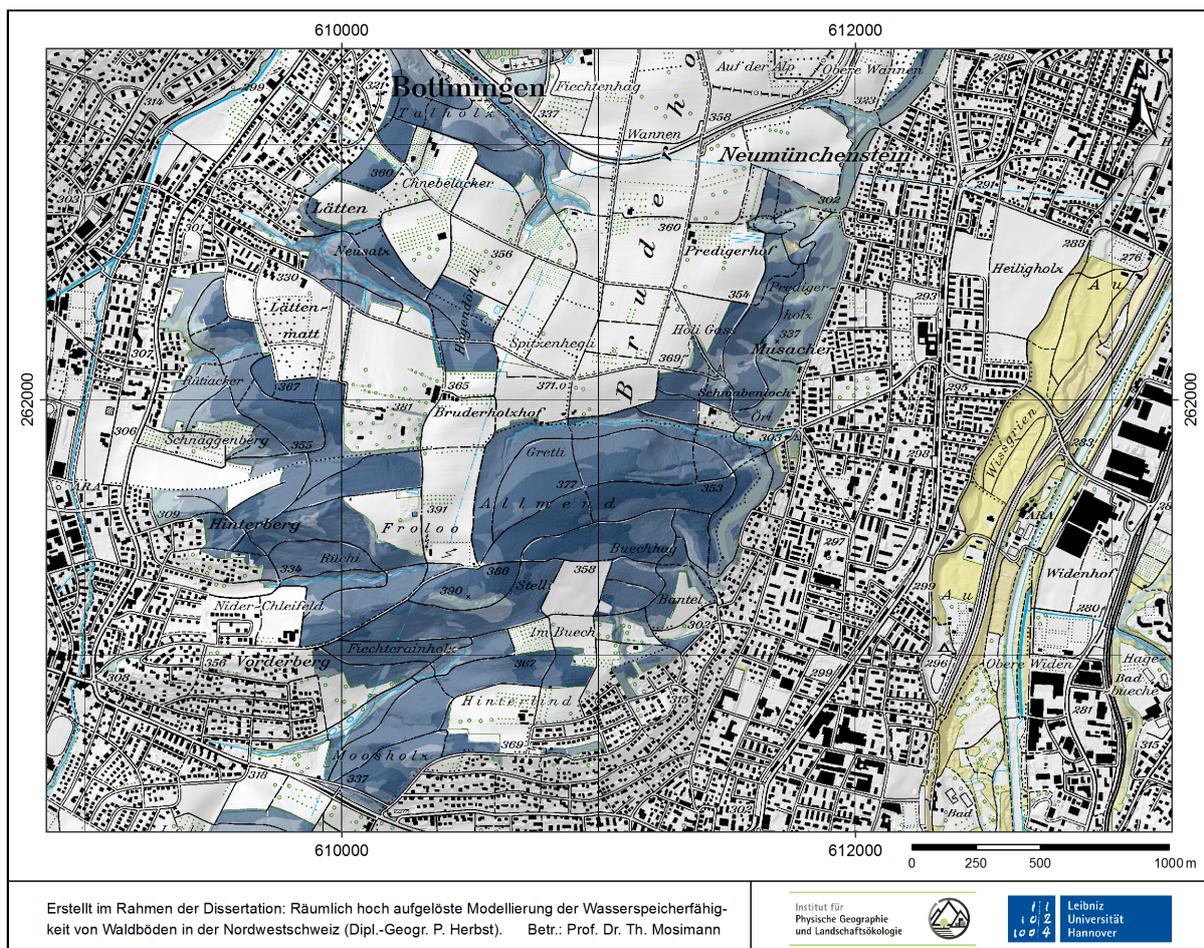


Abb. A14 Prognose der Feldkapazität mit Random Forest im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz. Die Legende wird in Abb. A11 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1067 Arlesheim (SWISSTOPO).

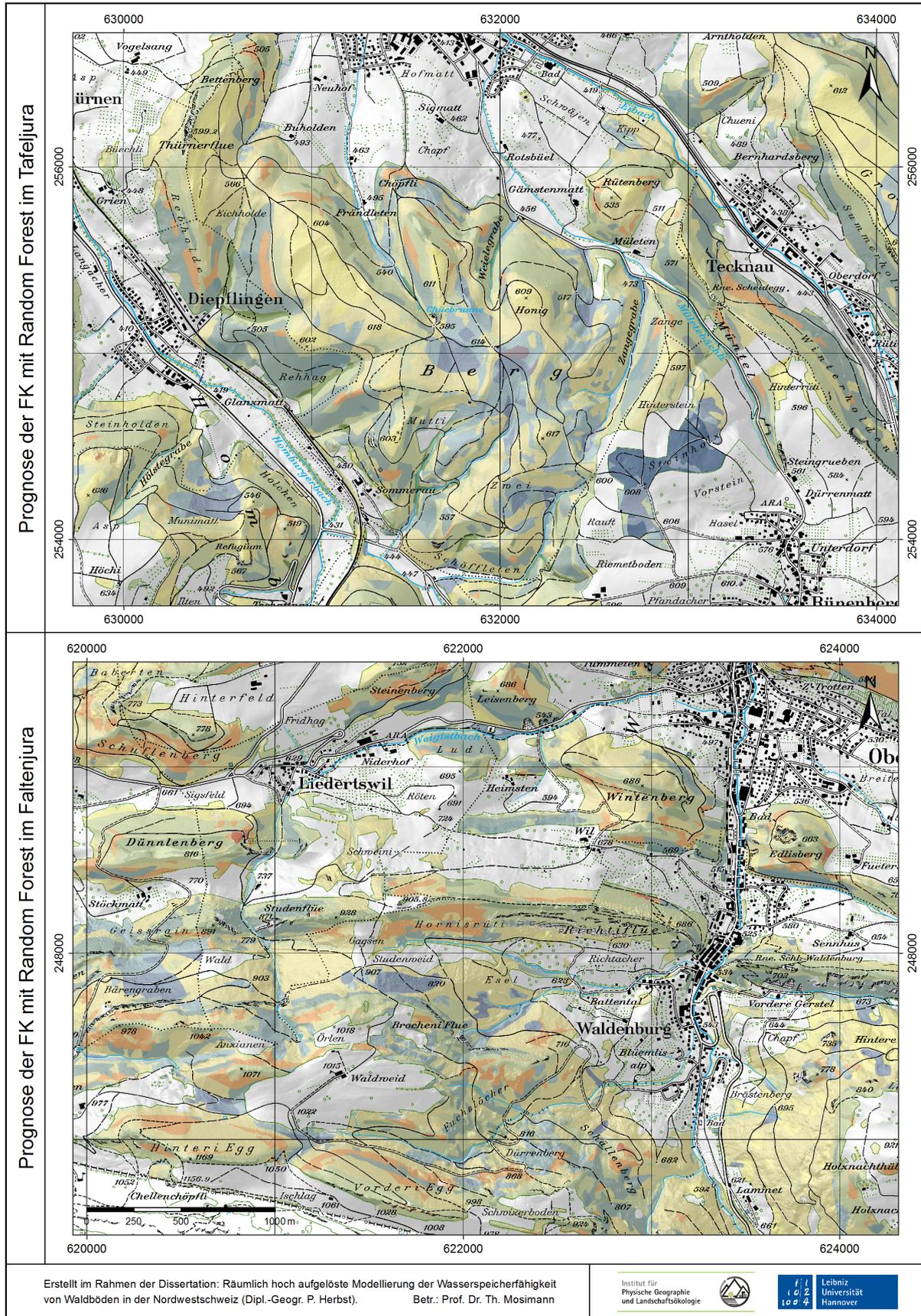


Abb. A15 Prognose der Feldkapazität mit Random Forest für die Beispielgebiete Diepflingen – Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura). Die Legende wird in Abb. A11 dargestellt. Topographische Grundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blätter 1068 und 1088 (swisstopo).

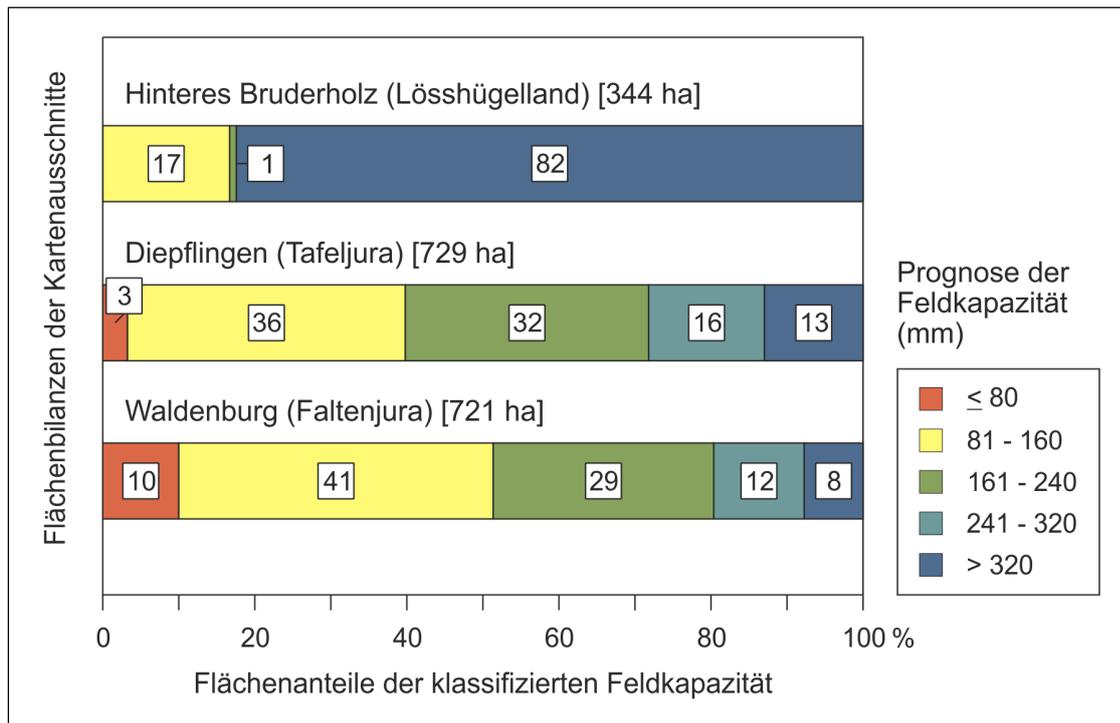


Abb. A16 Flächenbilanzen der prognostizierten Feldkapazität (Random Forest) für die Kartenausschnitte aus Lösshügelland, Tafel- und Faltenjura (Abb. A14, A15).

Modellregion	n	Gütemaße			
		RR (%)	N1 (%)	P1 (%)	ME (-)
Kanton Baselland	107	67,3	6,5	10,3	0,11
Lösshügelland	11	81,8	-	0,1	0,27
Jura	90	66,7	5,6	11,1	0,16
Talböden	6	50,0	16,6	-	-0,83

Tab. A4 Lagebezogene Übereinstimmung der Prognosen der Feldkapazität von Random Forest mit den klassifizierten Wasserspeicherfähigkeitswerten der Waldbodenprofile. Die Profile sind Grundlage der Modellentwicklung. Die Ergebnisse liefern also Hinweise auf die Güte der Modellkalibrierung. Es handelt sich jedoch um keine Validierung anhand unabhängiger Testdaten. Abkürzungen: *RR*: Übereinstimmung (*Recall Ratio*) von Prognose (primäre Ausprägung) und Punktinformation, *N1*: Anteil der Fälle bei denen die Prognose eine FK-Klasse niedriger ausfällt, *P1*: Anteil der Fälle bei denen die Prognose eine FK-Klasse höher ausfällt, *ME*: Mean Error (Systematischer Fehler). *ME* zeigt an, um wie viel FK-Klassen die Prognose im Mittel von denen der Bodenprofile abweicht. Positive und negative Abweichungen können sich ausgleichen.

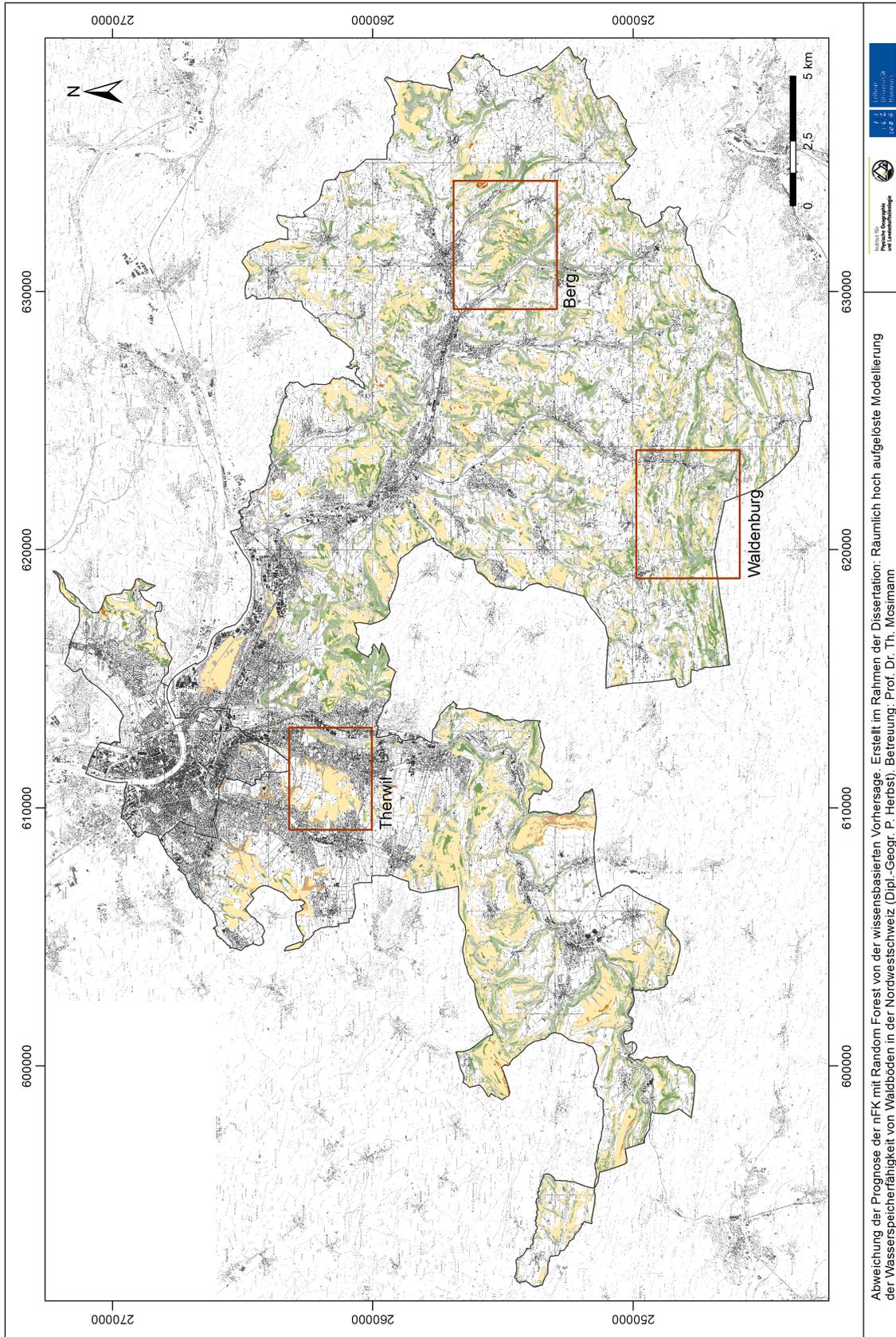


Abb. A17 Abweichungen der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissenschaftlichen Vorhersage in den Kantonen BL und BS. Die Legende (Abb. A19) wird auf der folgenden Seite dargestellt. Die roten Rahmen markieren die Lage der Kartenausschnitte in den Abbildungen Abb. 47 und A18. Die Gesamtkarte kann im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html betrachtet werden. TK-Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000 (SWISSTOPO).

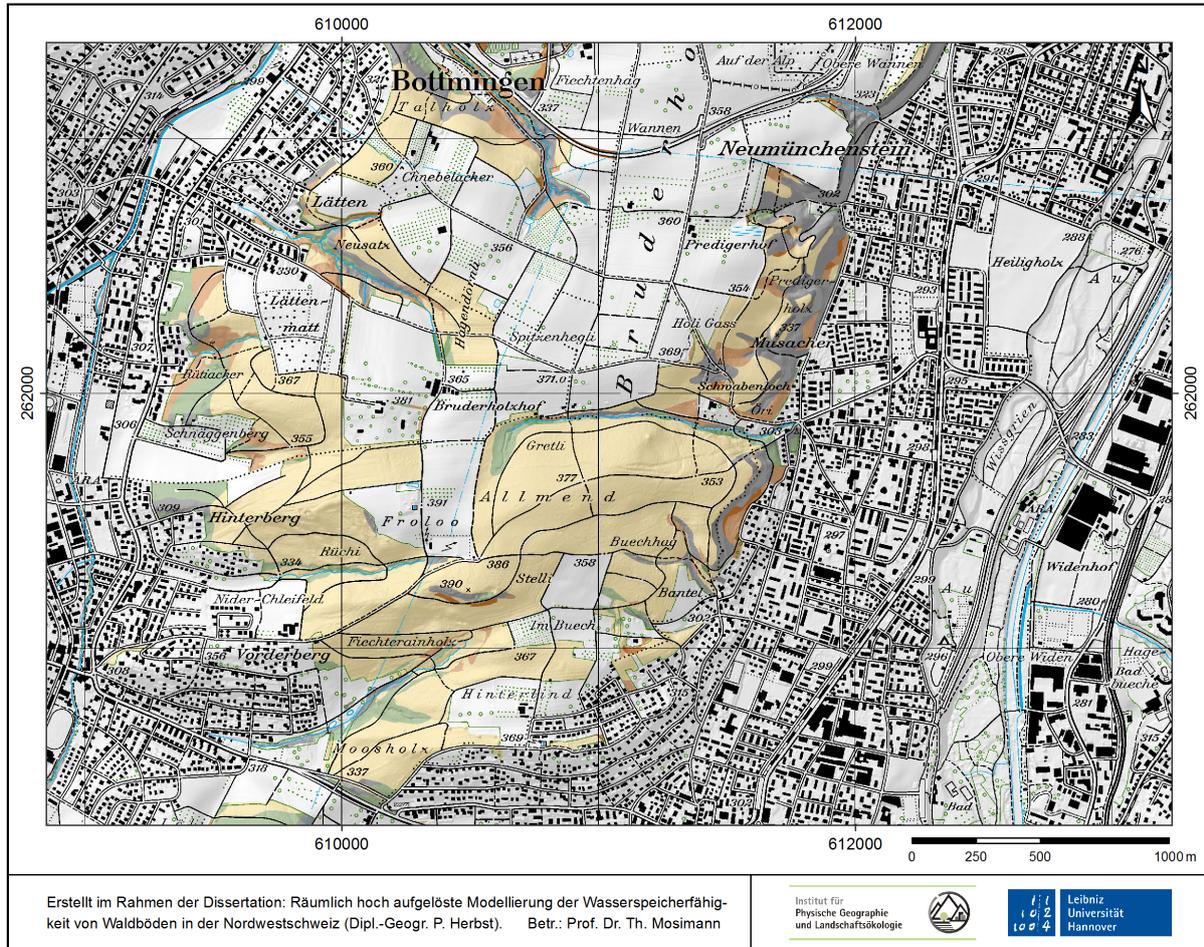


Abb. A18 Abweichungen der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz. Die Legende wird in Abbildung A19 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1067 Arlesheim (swisstopo).

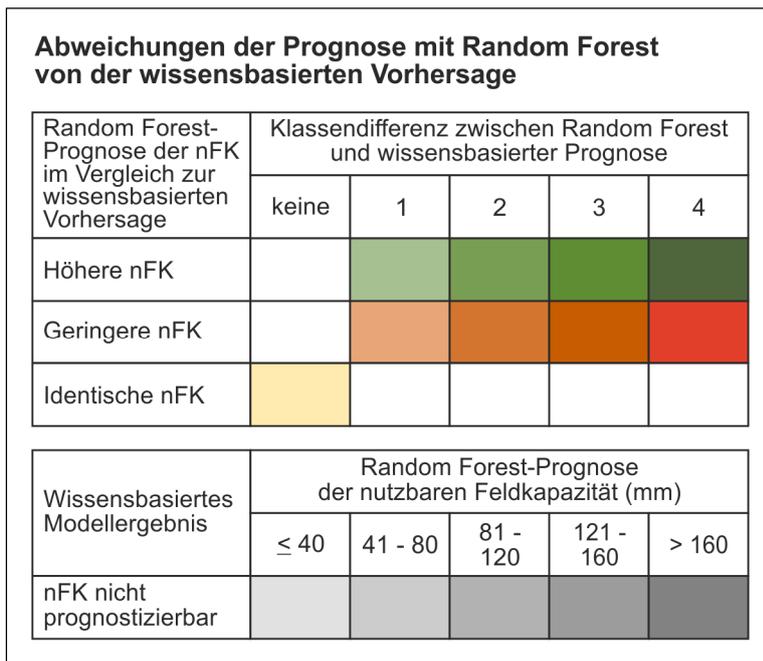


Abb. A19
Legende der Karte der Abweichung der Prognose der nFK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage.

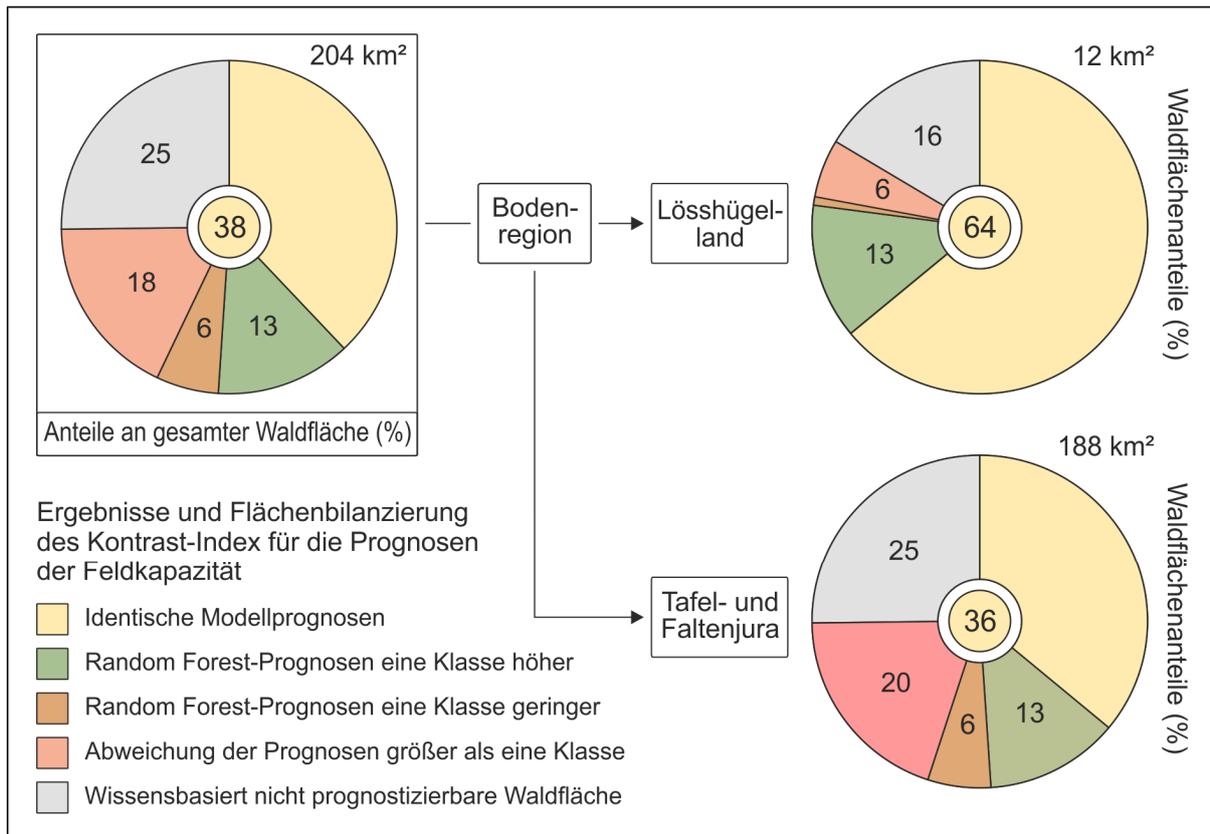


Abb. A20 Flächenanteile übereinstimmender und abweichender Prognosen der Feldkapazität mit wissensbasierten und teilautomatisierten Vorhersagen.

Modellregion	Fläche (km²)	Gütemaße				
		RR (%)	N1 (%)	P1 (%)	ME (-)	RMSE (-)
Gesamte Waldfläche	152,7	51,1	7,3	17,6	0,49	1,30
Lösshügelland	9,9	76,9	0,3	15,8	0,29	0,67
Jura	140,4	48,5	8,0	18,0	0,51	1,35
Talböden	2,4	99,9	0	0	0	0,02

Tab. A5 Gütemaße des lagebezogenen Vergleichs der wissensbasierten Modellierung der FK mit den Random Forest Prognosen. Bezug: wissensbasiert prognostizierbare Waldflächen.
 Abkürzungen: *RR*: Recall Ratio (Flächenanteil mit identischen Prognosen), *N1*: Flächenanteil bei dem die RF Prognose eine Klasse geringer ausfällt, *P1*: Flächenanteil bei dem die RF Prognose eine Klasse höher ausfällt, *ME*: Mean Error (Mittl. Fehler). *RMSE*: Root Mean Square Error (Quadratwurzel aus mittl. quadratischem Fehler). *ME* zeigt an, um wie viel Klassen die Modellprognosen im Mittel voneinander abweichen. Über- und Unterschätzung können sich ausgleichen Dies ist beim *RMSE* nicht der Fall und Ausreißer werden stärker gewichtet.

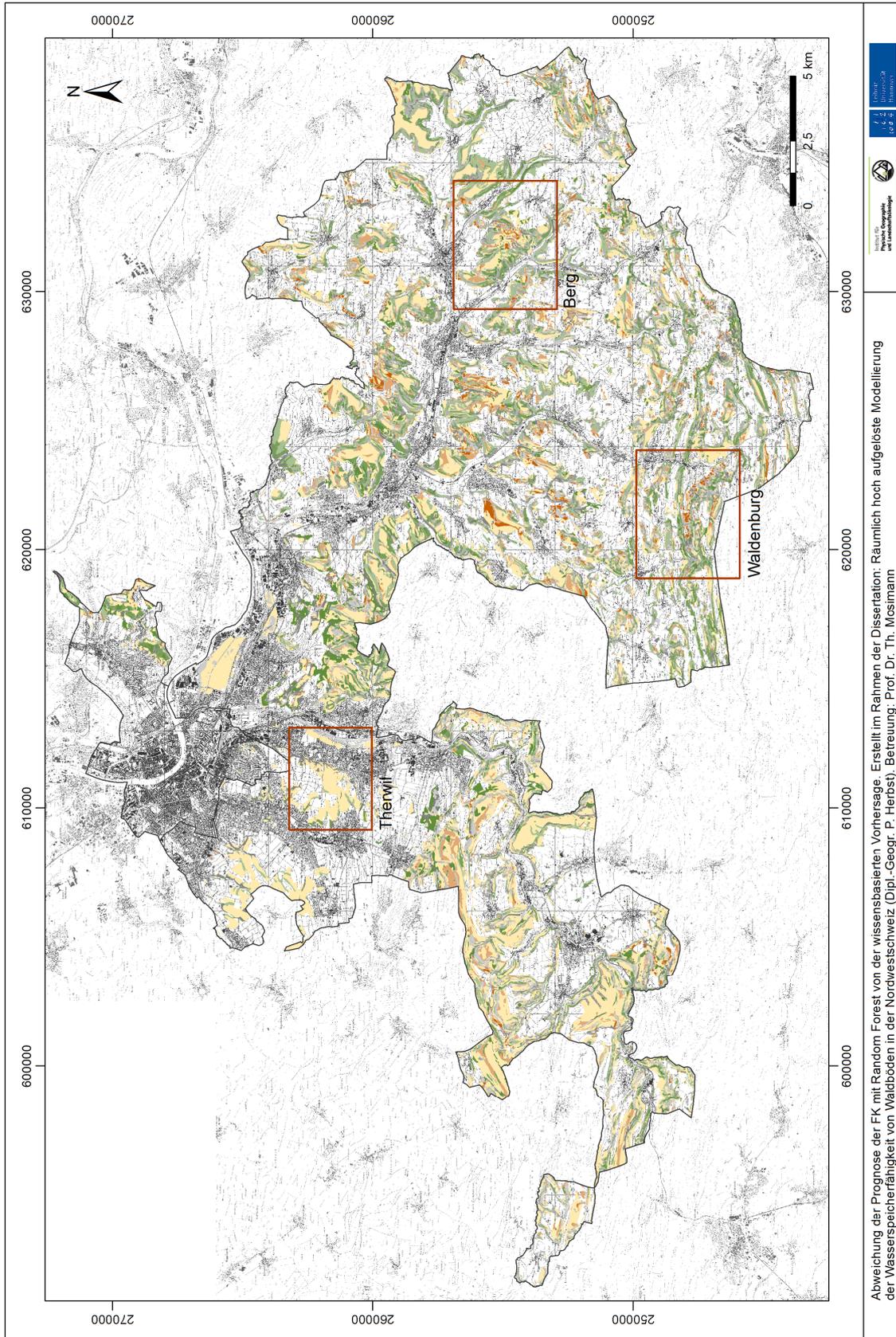


Abb. A21 Abweichungen der Prognose der FK mit Random Forest von der wissenschaftlichen Vorhersage in den Kantonen BL und BS. Die Legende (Abb. A23) wird auf der folgenden Seite dargestellt. Die roten Rahmen markieren die Lage der Kartenausschnitte in den Abbildungen A22 und A.24. Die Gesamtkarte kann im Internet unter www.phygeo.uni-hannover.de/karten.html betrachtet werden. TK-Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000 (SWISSTOPO).

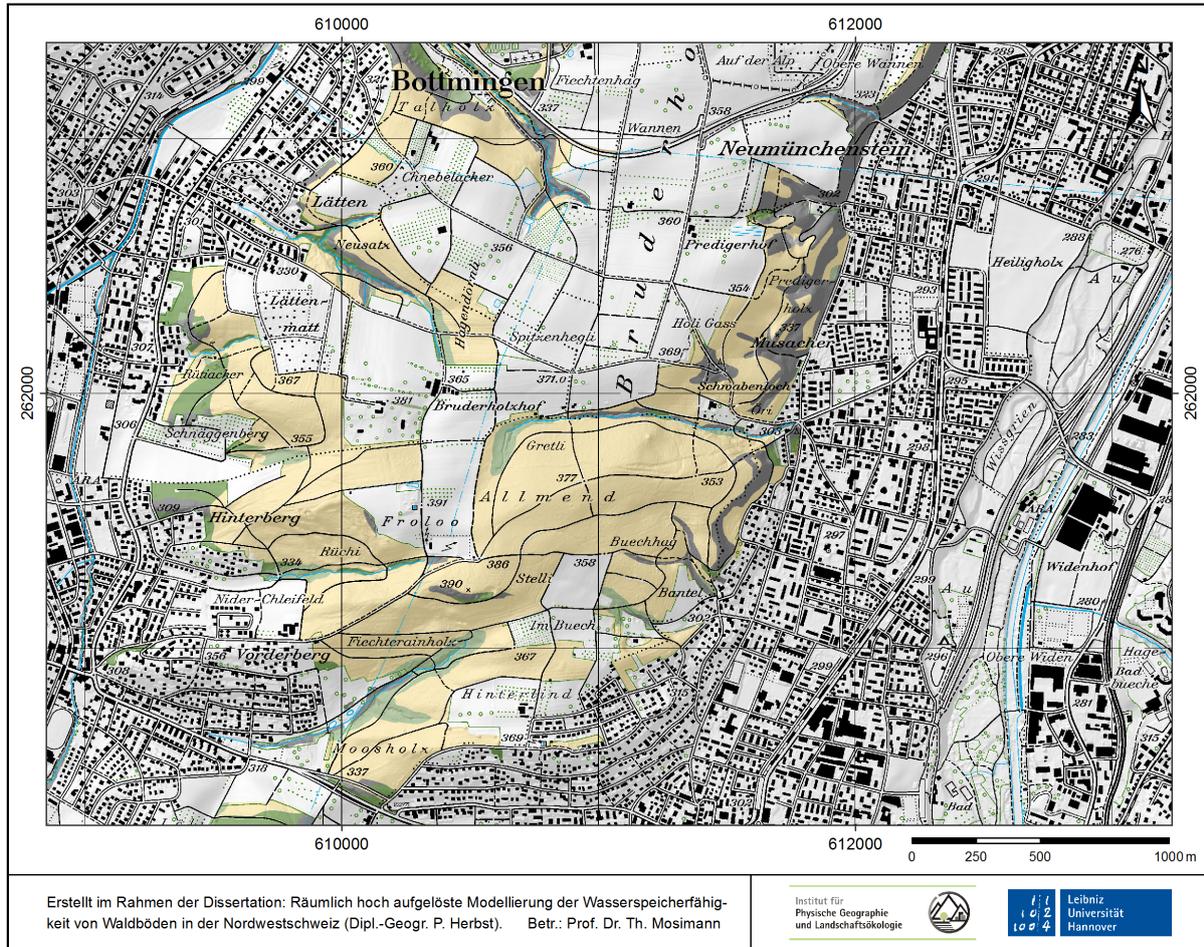


Abb. A 22 Abweichungen der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage im Lösshügelland auf dem hinteren Bruderholz. Die Legende wird in Abbildung A23 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt 1067 Arlesheim (SWISSTOPO).

Abweichungen der Prognose mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage

Random Forest-Prognose der FK im Vergleich zur wissensbasierten Vorhersage	Klassendifferenz zwischen Random Forest und wissensbasierter Prognose				
	keine	1	2	3	4
Höhere FK					
Geringere FK					
Identische FK					

Wissensbasiertes Modellergebnis	Random Forest-Prognose der Feldkapazität (mm)				
	≤ 80	81 - 160	161 - 240	241 - 320	> 320
FK nicht prognostizierbar					

Abb. A23
Legende der Karte der Abweichung der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage.

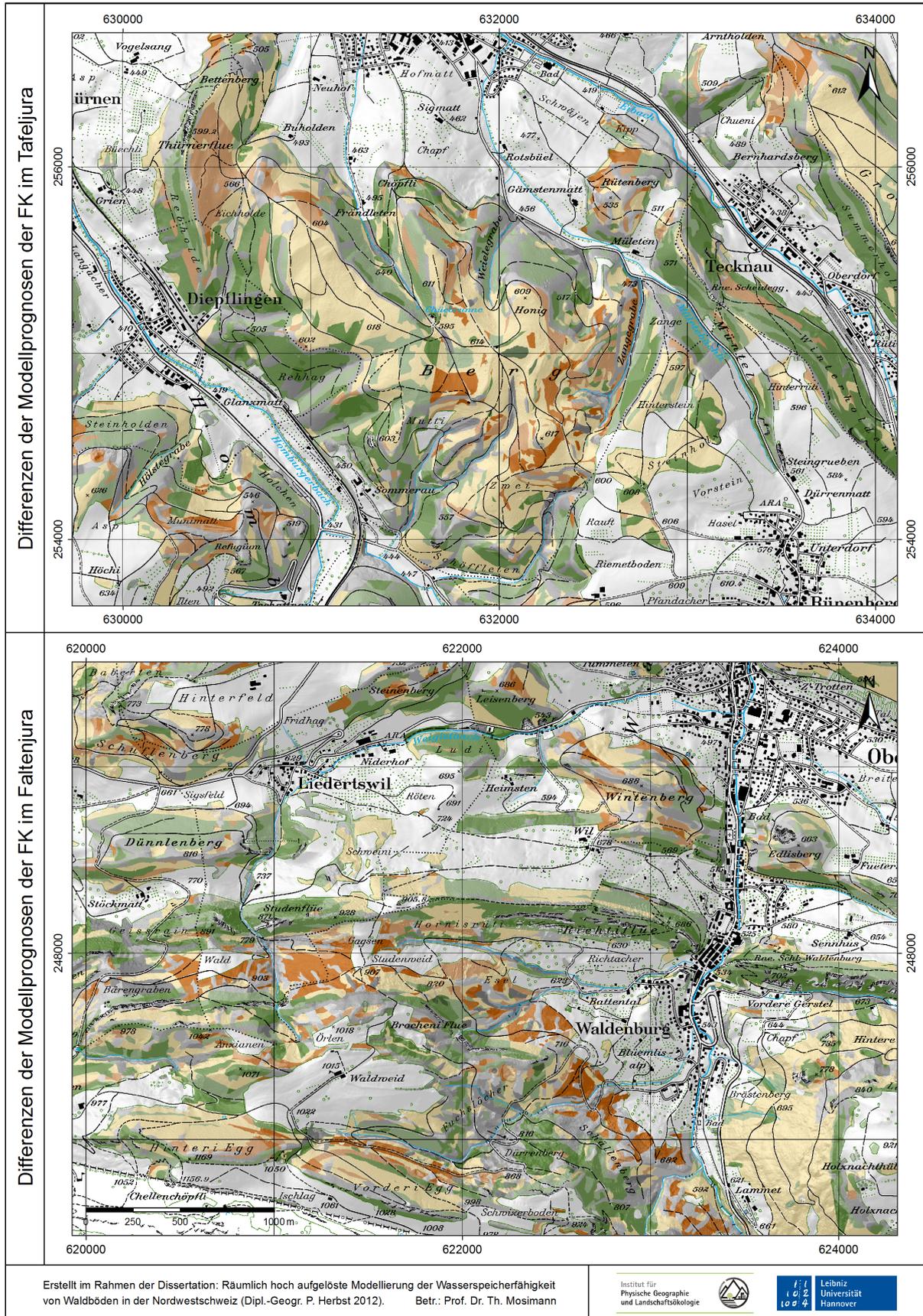


Abb. A24 Abweichungen der Prognose der FK mit Random Forest von der wissensbasierten Vorhersage für die Beispielgebiete Diepflingen - Tecknau (Tafeljura) und Waldenburg - Liedertswil (Faltenjura). Die Legende wird in der Abbildung A23 dargestellt. Topographische Kartengrundlage: Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blätter 1068 und 1088 (SWISSTOPO).

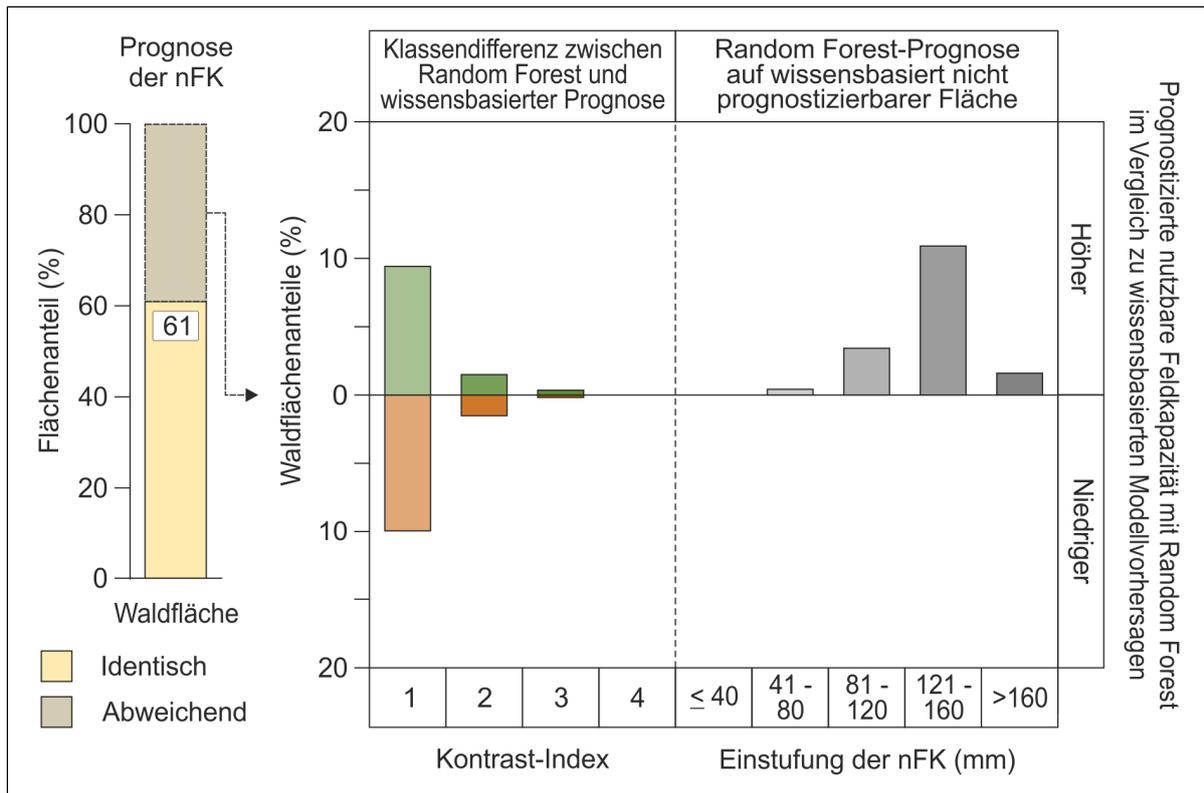


Abb. A25 Flächenbilanzierung abweichender nFK-Prognosen im Lösshügelland (Random Forest / Wissensbasiert). Die Flächenbilanzierung bezieht sich auf eine Waldfläche von 11,8 km².

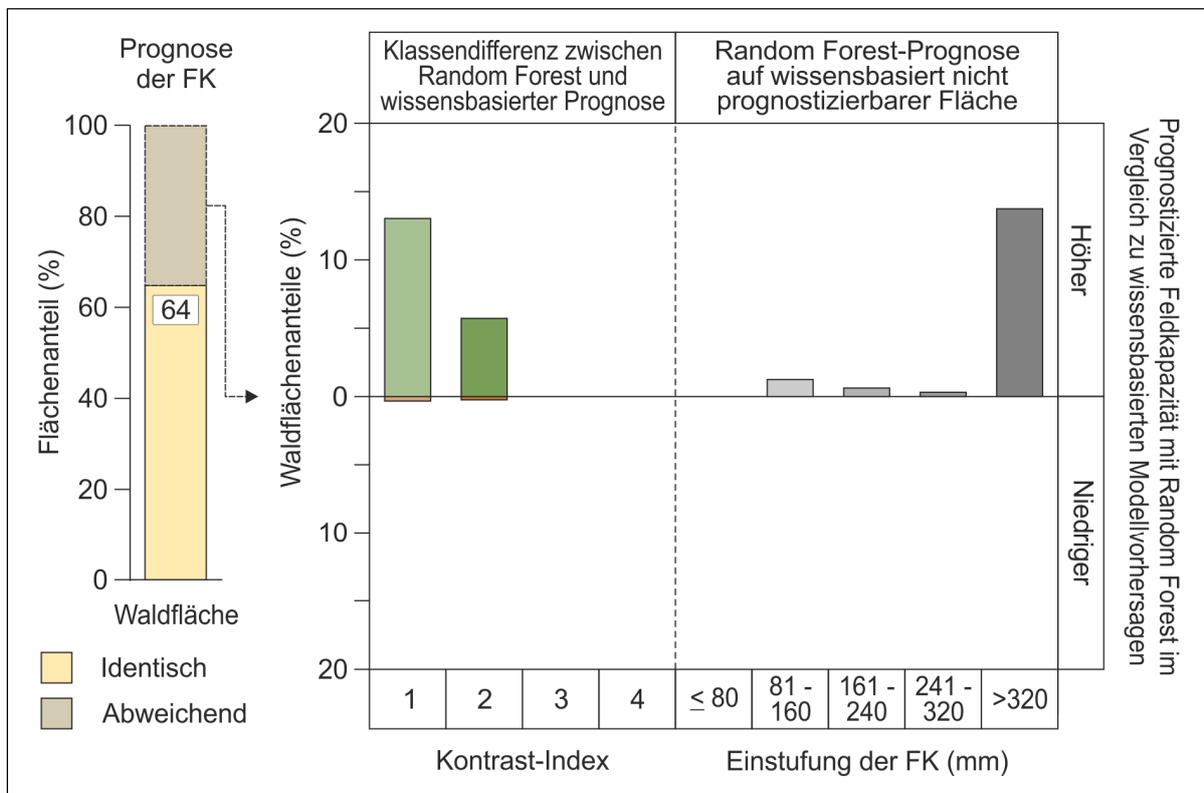


Abb. A26 Flächenbilanzierung abweichender FK-Prognosen im Lösshügelland (Random Forest / Wissensbasiert). Die Flächenbilanzierung bezieht sich auf eine Waldfläche von 11,8 km².

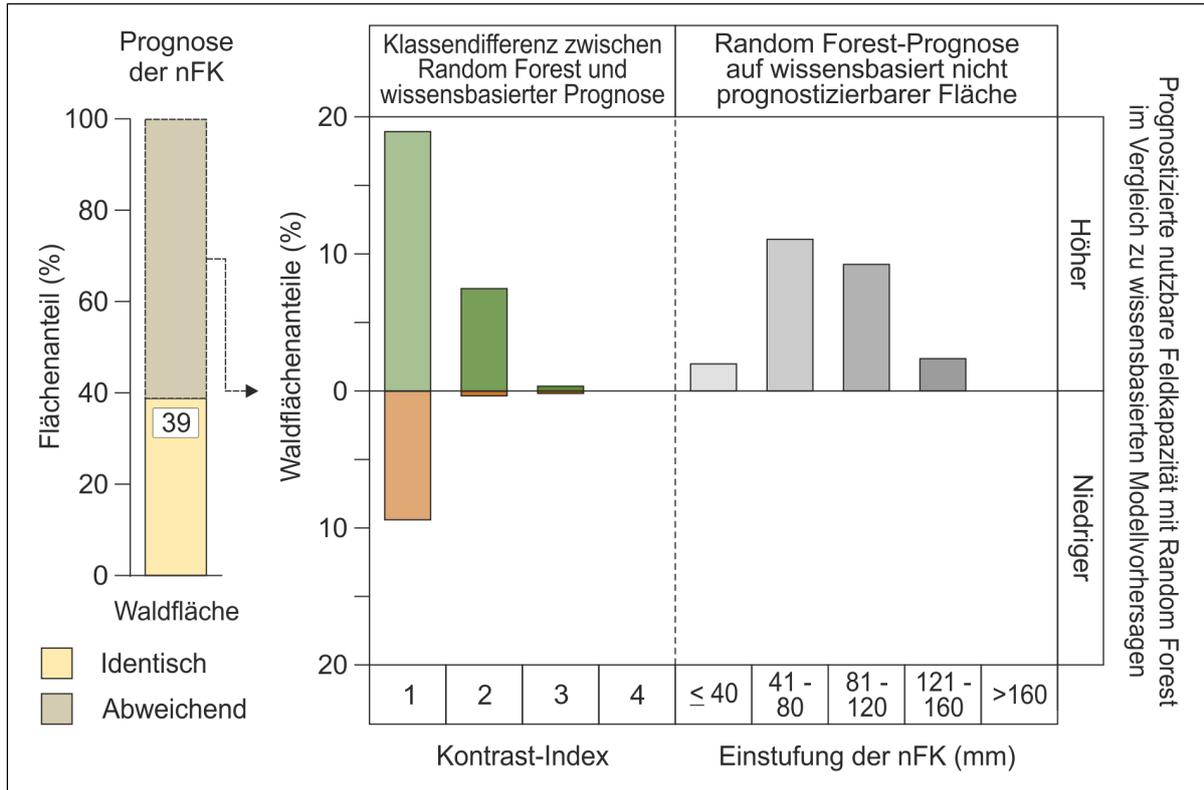


Abb. A27 Flächenbilanzierung abweichender nFK-Prognosen im Tafel- und Faltenjura (Random Forest / Wissensbasiert). Die Flächenbilanzierung bezieht sich auf eine Waldfläche von 188,2 km².

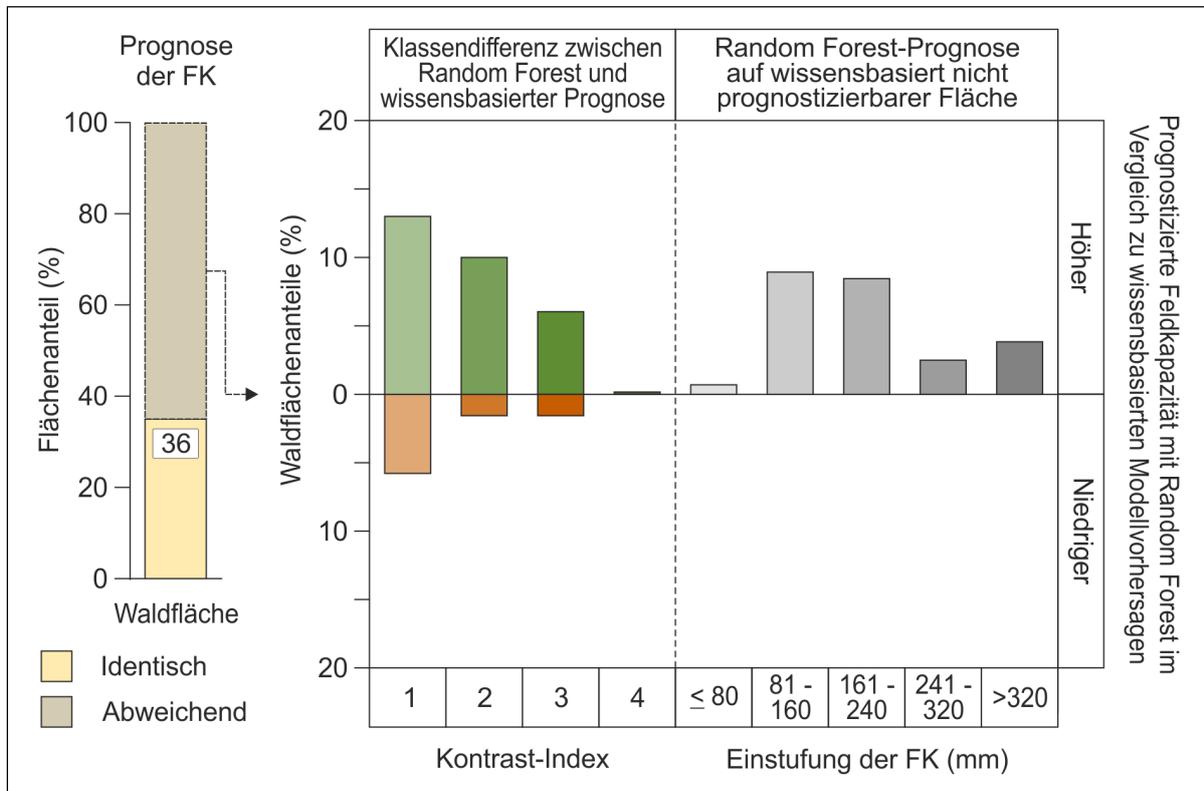


Abb. A28 Flächenbilanzierung abweichender FK-Prognosen im Tafel- und Faltenjura (Random Forest / Wissensbasiert). Die Flächenbilanzierung bezieht sich auf eine Waldfläche von 188,2 km².

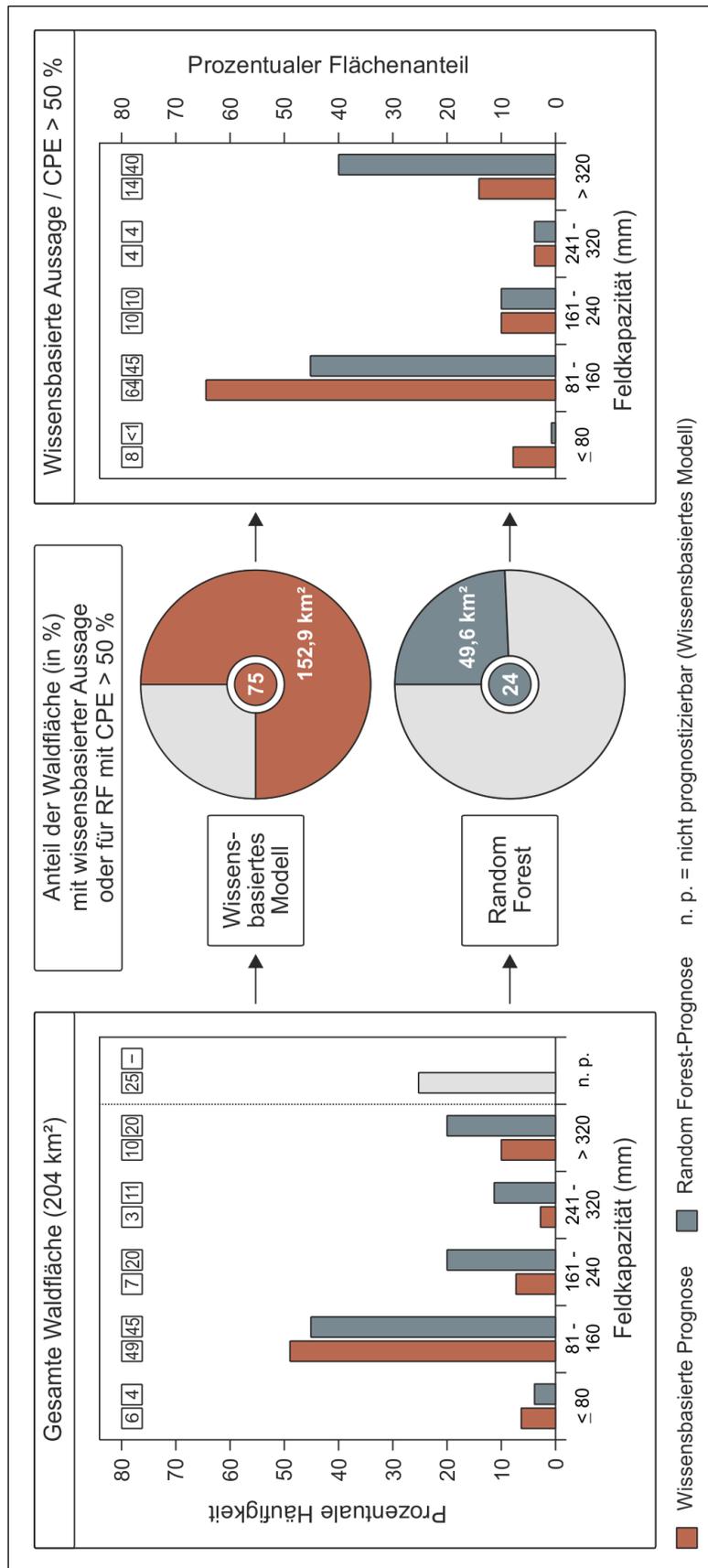


Abb. A29 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Modellprognosen der FK auf der gesamten Waldfläche mit den Häufigkeitsverteilungen beschränkt auf die Waldflächen mit wissensbasierter Aussage oder bei RF mit einer CPE der Prognosen über 50 %.

Zur Person

Name	Philipp Herbst
Geburtsdatum	18. April 1980
Geburtsort	Hannover

Aktuell

02.2008 -	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Leibniz Universität Hannover.
02.2008 -	Promotionsstudium zur Erlangung des Dr. rer. nat. an der Leibniz Universität Hannover.

Studium

01.2008	Abschlussprüfungen zum Diplom-Geographen.
01.2007 - 11.2007	Verfassung der Diplomarbeit: GIS-gestützte Prognose der Wasserspeicherfähigkeit in Waldböden der Nordwestschweiz - Entwicklung einer Pedotransferfunktion und Vergleich der Vorhersage mit halbautomatisierten Random Forest-Modellen und wissensbasierten Modellen.
04.2003 - 12.2006	Studium der Physischen Geographie und Landschaftsökologie (Hauptfach), Meteorologie (Nebenfach) und Hydrologie / Wasserwirtschaft (Nebenfach) an der Leibniz Universität Hannover.
10.1999 - 03.2003	Grundstudium der Physischen Geographie und Landschaftsökologie (Hauptfach), Meteorologie (Nebenfach) und Landespflege (Nebenfach) an der Leibniz Universität Hannover. 03.2000 - 03.2001 vom Studium beurlaubt (Wehrdienst).

Wehrdienst

03.2000 – 12.2000	Grundwehrdienst im 2./ABC-Abwehrbataillon 805 in Prenzlau und im Zentrum für Nachwuchsgewinnung/Nord in Hannover.
-------------------	---

Schulbildung

08.1986 – 07.1999	Schulzeit, Gehrden.
-------------------	---------------------