

Erfassung und polygonbasierte flächendeckende Ausweisung hydraulischer Substrateigenschaften als Basis für eine Charakterisierung der Pedosphäre, FORSITE – Dynamische Waldtypisierung Steiermark

Brandstätter, J.¹, Englisch, M.², Katzensteiner, K.³, Klebinder, K.⁴, Klosterhuber, R.⁵, Proske, H.⁶, Vacik, H.⁷, Wagner, T.¹, Wilhelmy, M.⁸, Winkler, G.¹

¹Institut für Erdwissenschaften, Nawi Graz Geozentrum, Karl-Franzens-Universität Graz

²Institut für Waldökologie und Boden, BFW Wien

³Institut für Waldökologie, Universität für Bodenkultur Wien

⁴Institut für Naturgefahren, BFW Innsbruck

⁵WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung Klosterhuber & Partner OG, Innsbruck

⁶Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Graz

⁷Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien

⁸ALPECON Wilhelmy Geowissenschaften GmbH, Telfes i. Stubai

Abstract

The project “Dynamische Waldtypisierung Steiermark (FORSITE)” aims to characterize the suitability of tree species mixtures for forest sites considering future conditions due to climate change in Styria. The potentials and risks of endemic and non-endemic tree species are to be described and the adaption of forest management related to climate change will be derived. Therefore, the generation of an areal data set related to soil properties including water, heat and nutrient balances is essential to characterize the resources for tree growth. A comprehensive information on unconsolidated rock substrate and the subjacent lithologies is essential for the interpretation of the genesis of the pedosphere. Based on in situ characterization of the substrate at more than 1800 sites and laboratory analyses of 240 substrate samples (grain size, total mineral and clay mineral components, and petrographical description) an areal substrate distribution (map) was derived. These data were used for the regionalization of hydraulic and nutrient substrate properties. The herein presented research focus on the regionalization of the porosity and saturated hydraulic conductivity based on the grain size distribution and bulk density of the substrate. These values are important for the areal modelling of the soil water balance and in further consequence for the modelling of tree growth.

Einleitung

Wälder unterliegen in Zeiten rascher Klimaänderung und immer häufiger vorkommenden Klimaextremen hohen Belastungen. Bedingt durch biotische und abiotische Störungen erhöht sich die Mortalität der Baumarten, die geregelte Forstwirtschaft muss immer öfter auf die veränderten Rahmenbedingungen in der Waldbehandlung reagieren. Kenngrößen zum Wärme-, Wasser- und Nährstoffhaushalt, welche bisher als konstant angenommen wurden, verändern sich für die einzelnen Waldstandorte aufgrund des Klimawandels, und die Planungsinstrumente sind daher entsprechend anzupassen. Aufgrund des Fehlens von Standortkarten in weiten Teilen Österreichs können Waldbesitzer derzeit auf eine wesentliche Planungsgrundlage für die Auswahl von Baumarten nicht zurückgreifen. Gerade in Hinblick auf die Klimaänderung sind allerdings verlässliche Informationen über die aktuellen und zukünftigen Standortsbedingungen für die Bewirtschaftung entscheidend (z.B. Vacik et al., 2019).

Um eine flächendeckende Modellierung der Bodeneigenschaften Wasser- und Nährstoffhaushalt unter dem Blickwinkel Klimawandel durchführen zu können, sind eine flächendeckende Klassifizierung des Substrats und seiner Eigenschaften sowie die Berücksichtigung der darunterliegenden Gesteine essentiell. Dabei bilden die durch Verwitterung entstandenen Lockersedimente mit der Zeit Lockergesteinsschichten, die ohne große Umlagerungsprozesse in situ entstehen oder durch unterschiedliche Transportprozesse in weiter Entfernung zum Ausgangsgestein abgelagert und mit anderen Gesteinseinheiten vermischt werden können. Diese Lockergesteinsschichten, vornehmlich in einer Tiefe von 1 bis 1,5 m unter der Geländeoberfläche bzw. unter dem eigentlichen Boden, werden als Substrat (Wilhelmy et al., akzeptiert) bezeichnet und stellen neben der Streu eine wichtige Grundlage für die Bodenbildung dar. Die mineralchemischen und physikalischen Eigenschaften des Substrats sind für die Bodenbildung relevant. Das Ausgangsgestein mit seinen Mineralen bestimmt die mineralchemische Zusammensetzung des Substrats, z.B. ein karbonatisches Gestein besteht aus den Mineralen Kalzit und/oder Dolomit und schafft eine ganz andere Grundlage für die Bodenbildung als ein quarzreiches saures Gestein. Je nach Korngrößenspektrum und Feinanteil (Komponenten kleiner 2 mm), variieren die hydraulischen Eigenschaften wie gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und Porosität, welche einen direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt der Waldstandorte haben.

In den letzten beiden Jahren wurde eine nahezu flächendeckende Ausweisung des Substrats für die gesamte Steiermark durchgeführt. Die hier näher beschriebene flächenhafte Substrat-Ausweisung ist in Österreich die erste ihrer Art für ein so großes Untersuchungsgebiet und kann als wichtige Grundlage für weitere Schritte in der forstlichen Planung angesehen werden. Mit diesem Beitrag soll die Klassifizierung und Ausweisung des Substrats über konkrete Aufnahmepunkte und v.a. die darauf aufbauende flächenhafte Umsetzung der physikalischen Parameter hydraulische Leitfähigkeit und Porosität als Grundlage für die Wasserhaushaltsmodellierung der Waldstandorte beschrieben werden.

Untersuchungsgebiet und Methodik

Im Zuge des Projekts FORSITE fanden 2019 Geländeerhebungen des Substrats entlang des Forststraßennetzes in der gesamten Steiermark statt. Das Arbeitsgebiet umfasste ca. 1.000.000 ha Waldfläche und reichte bis in die höheren Regionen in ca. 1900 m Seehöhe. Dabei wurden entlang des Forststraßennetzes Lockergesteinsschichten, welche das Substrat für die Bodenbildung darstellen, aufgenommen.

Für die Erstellung der Substratkarte der Steiermark wurden sowohl Punktinformationen der 2962 Substrat-Aufnahmepunkte im Gelände und zusätzlicher parallel aufgenommener bodenkundlicher Ansprachen als auch flächenhafte Informationen aus der Lockergesteinskarte der GBA, Laserscandaten, Orthofotos, geologische Grundlagendaten und die digitale Bodenkarte berücksichtigt. An 353 der 2962 Aufnahmepunkten wurde eine Probe entnommen, wovon 240 repräsentative Substratproben im Labor physikalisch (Sieb- und Schlämmanalysen), (ton-) mineralogisch (Röntgendiffraktometer) und petrographisch analysiert wurden.

Die Substratbeschaffenheit der Lockergesteinsflächen wurde genetisch, mineralchemisch und bodenphysikalisch klassifiziert und nach einem einheitlichen Aufnahmeschema (entwickelt in Tirol) digital im Gelände aufgenommen. Die dabei ausgewiesenen Parameter umfassen die genetische Klassifikation des

Substrats (Gentyp), die Substratgesellschaft (SGes) und die Matrix (Fraktion < 2mm), die Parameter sind im nachstehenden Unterkapitel „Klassifikation“ näher erläutert. Weitere Aufnahmeparameter im Gelände waren die Deckmächtigkeit und der Deckzustand (unterteilt in die Klassen Streu, Schleier, lückig, voll <1 m, voll > 1m), wie auch die Lagerungsdichte (Ld, „locker“, „dicht“ und „überkonsolidiert“) des Substrats. Die maximale Aufnahmetiefe betrug 1,5 m, eine eventuell vorhandene 2. Schicht innerhalb der 1,5 m Profiltiefe wurde getrennt betrachtet.

Klassifikation

- Die *genetische Klassifizierung* des Substrats (Gentyp) erfolgte im Gelände anhand makroskopisch unterscheidbarer Prozesse, die im Vorfeld in insgesamt 43 unterscheidbare „Typen“ (Tabelle im Anhang) klassifiziert worden sind. Diese Unterteilung ist zurückzuführen auf die Vielzahl an Ab- und Umlagerungsprozessen in alpinen Faziesräumen und Sedimentationsprozessen im Steirischen Neogenbecken, welche zu sehr unterschiedlichen Lockergesteinen und damit Substraten führen können.
- Die *mineralchemische Zusammensetzung* des Substrats (SGes) wurde durch drei mineralchemische Dreiecke bestimmt (Abbildung 1). Von Dreieck 1 über Dreieck 2b zu Dreieck 2a wird von Karbonat dominierten hin zu „rein“ silikatischen Substraten die Klassifikation entwickelt. Das **„Karbonat“-Dreieck 1, für Substrate mit über 75 % Karbonatanteil**, differenziert Karbonat in Dolomit und Kalk und fasst alle silikatischen Bestandteile zusammen. Auf die Unterscheidung zwischen Tonmineralen und dem praktisch inerten Quarz wird hier verzichtet. Das **„Karbonat-Silikat“-Dreieck 2b, für Substrate mit einem Karbonatanteil von 10 bis einschließlich 75 %**, fasst die Karbonate zusammen und unterscheidet zwischen den sauren Silikaten und den übrigen Silikaten (Tonminerale + basische Silikate).
 - a) Im **„Silikat“-Dreieck 2a, für Substrate mit weniger als 10 % Karbonatanteil**, ist durch die Differenzierung die Wichtigkeit der Tonminerale und basischen Silikate gegenüber den meist sehr hohen Anteilen an skelettbildenden „sauren“ Quarz- und Alkali-Feldspat-bestimmten Silikaten ausgedrückt. Ein bis zu 10 % betragender Anteil an Karbonat wird den basischen Silikaten zugerechnet.
 - b) Durch Abschätzung der *Korngrößenzusammensetzung* des Substrats wurde die Matrixfraktion (= Feinanteil < 2mm) mit Hilfe eines Matrix-Dreiecks klassifiziert, welche in drei Klassen (f-, f und f+) gegliedert wird (Abbildung 2). Dieses Matrix-Dreieck ist angelehnt an das Dreieck der Bodenarten für die Bodenkunde. Ein Substrat mit > 80% Grobanteil (≥ 2mm) wurde als korngestützt (g) klassifiziert. Die analytisch bestimmte Korngrößenzusammensetzung der 240 Proben und die Abschätzungen des Verhältnisses von Grob- und Feinfraktion im Gelände wurden für weitere Berechnungen zum Wasserhaushalt verwendet.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde das Substrat analog dem Schemaablauf in Abbildung 1 und 2 klassifiziert und eine SGes bzw. ein entsprechender Feinanteil (Matrix) zugewiesen.

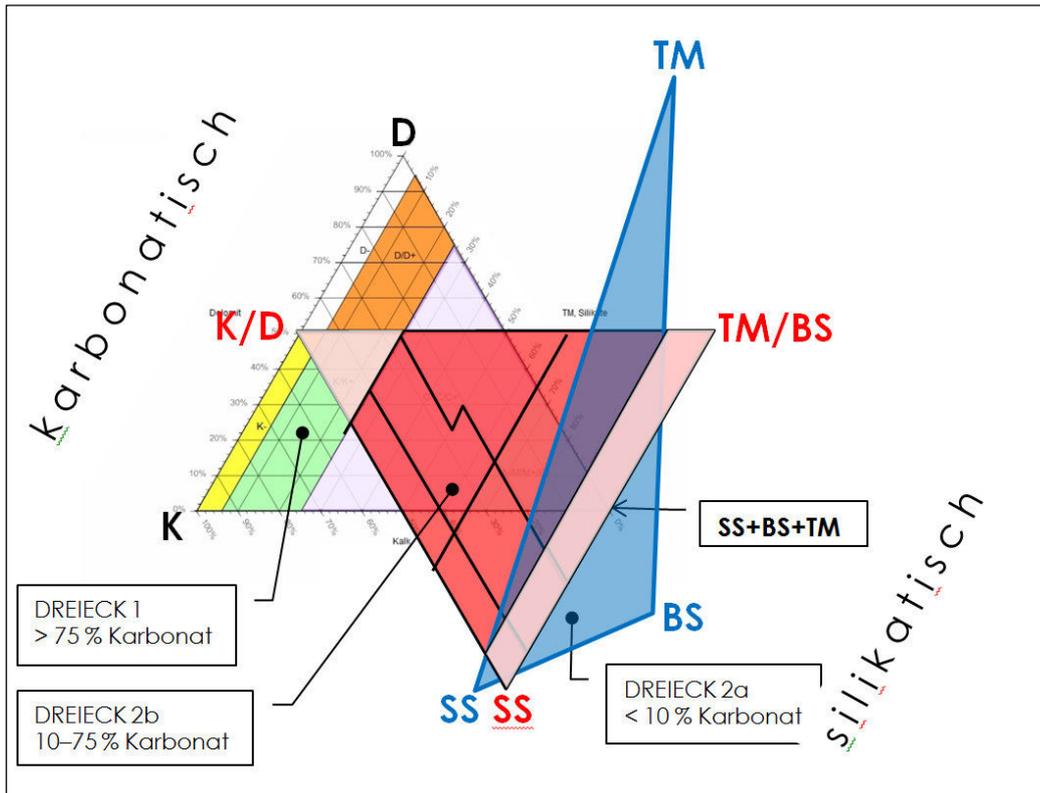


Abbildung 1: Zusammenhang der drei mineralchemischen Dreiecke, in welchen die 5 Komponentengruppen K = Kalk, D = Dolomit, SS = saure Silikate, BS = basische Silikate, TM = Tonminerale, Chlorit + übrige Silikatanteile und Akzessorien, dargestellt werden.

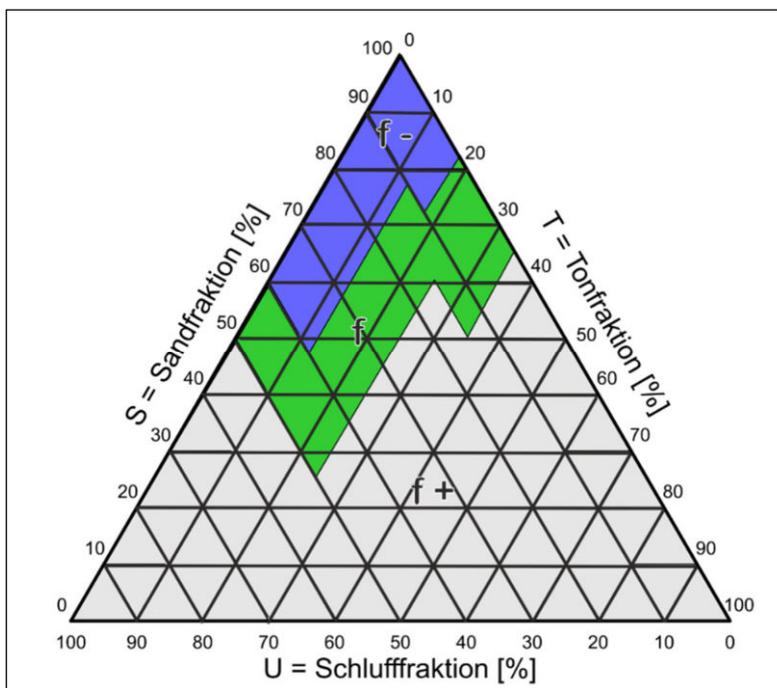


Abbildung 2: Dreieck der Matrixfraktionen f-, f und f+.

Unter Einbindung all dieser punktuellen Informationen und der flächenhaften Informationen (Lockergesteinskarte der GBA, Laserscandaten, Orthofotos, geologische Grundlagendaten und die digitale

Bodenkarte) wurden für die gesamte Steiermark (16.400,6 km²) 32.050 Polygone ausgewiesen, die jeweils einen Homogenbereich in Bezug auf Substrat darstellen.

Wasserhaushalt

Auf Basis der physikalischen Laborergebnisse sowie der Substrateigenschaften Lagerungsdichte, Matrix- und Grobfraction, die im Gelände zugewiesen wurden, wurden die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit (Ks-Wert) und die Porosität berechnet.

Der **Ks-Wert** der Substratschicht wurde auf Basis der Korngrößenverteilung sowie der Geländeansprache der Lagerungsdichte in zwei Berechnungsschritten quantifiziert.

In einem ersten Schritt wird Ks der Feinfraktion (< 2mm) anhand von Pedotransferfunktionen zweier verschiedener Ansätze berechnet.

- a) Über die Datenbank Rosetta (Version 1.1 sowie 3, Schaap et al., 2001)
- b) Über Zuordnung anhand des DWA-A 920-1 Regelblattes (2017). Die Grundlage für die Berechnung von Ks hierbei ist die Zuweisung der Bodenart auf Basis der Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte (Ld). Für die Quantifizierung der Lagerungsdichte wurden die im Gelände angesprochenen Lagerungsdichteklassen „locker“, „dicht“ und „überkonsolidiert“ herangezogen. Daraus wurden für „locker“ die für die DWA relevanten Ld-Werte 1,1/1,3/1,5 (Min/Mean/Max), für „dicht“ die Ld-Werte 1,55/1,75/1,95 (Min/Mean/Max) und für „überkonsolidiert“ die Ld-Werte 1,95/2,00/2,03 (Min/Mean/Max) angenommen.

Berücksichtigung der Grobfraction als 2. Schritt:

- c) Die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit für das gesamte Kornspektrum (Fein- und Grobfraction) wird über das gewichtete Mittel der Ks-Werte der Feinfraktion und der drei Korngrößenklassen Fein-, Mittel- und Grobkies inkl. Steine berechnet. Die Berücksichtigung des Verhältnisses Grob- zu Feinfraktion entstammt der Geländeansprache und nicht der Laboranalyse. Der Ks-Wert der Grobfraction wird im Mittel auf die von mG mit 5×10^{-03} m/s festgesetzt (da im Gelände eine Aufteilung in fG, mG, gG und X nicht immer gegeben war).

Die **Porosität** wurde über die Formel von Helmbold (2002) (siehe hierzu Fuchs et al., 2017) berechnet, welche eine Beziehung zwischen Gesamtporosität und Durchlässigkeitsbeiwert angibt, welcher aus der wie zuvor beschriebenen Ks-Berechnung abgeleitet wurde.

Um anhand der 240 Laborproben und daraus errechneten Ks- und Porositätswerten der jeweiligen Aufnahmepunkte eine flächenhafte Übertragung zu den Polygonen (Homogenbereichen) der Substratkarte zu erhalten, wurden die berechneten Ks-Werte der Aufnahmepunkte für jede zugewiesene Klasse „g/f-/f/f+“ statistisch ausgewertet und der Medianwert (basierend auf DWA, siehe Abbildung 4) der jeweiligen Klasse schlussendlich auf die Polygone übertragen.

Ergebnisse

Substratkarte

Für die Erstellung der Substratkarte wurde eine Fläche von 16.400,6 km² mit 32.050 Polygonen gefüllt. 99 % dieser Polygone beinhalten Informationen zu Substratgesellschaft, Gentyt, Korngrößenzusammensetzung (Matrixfraktion), Deckmächtigkeit und Deckzustand.

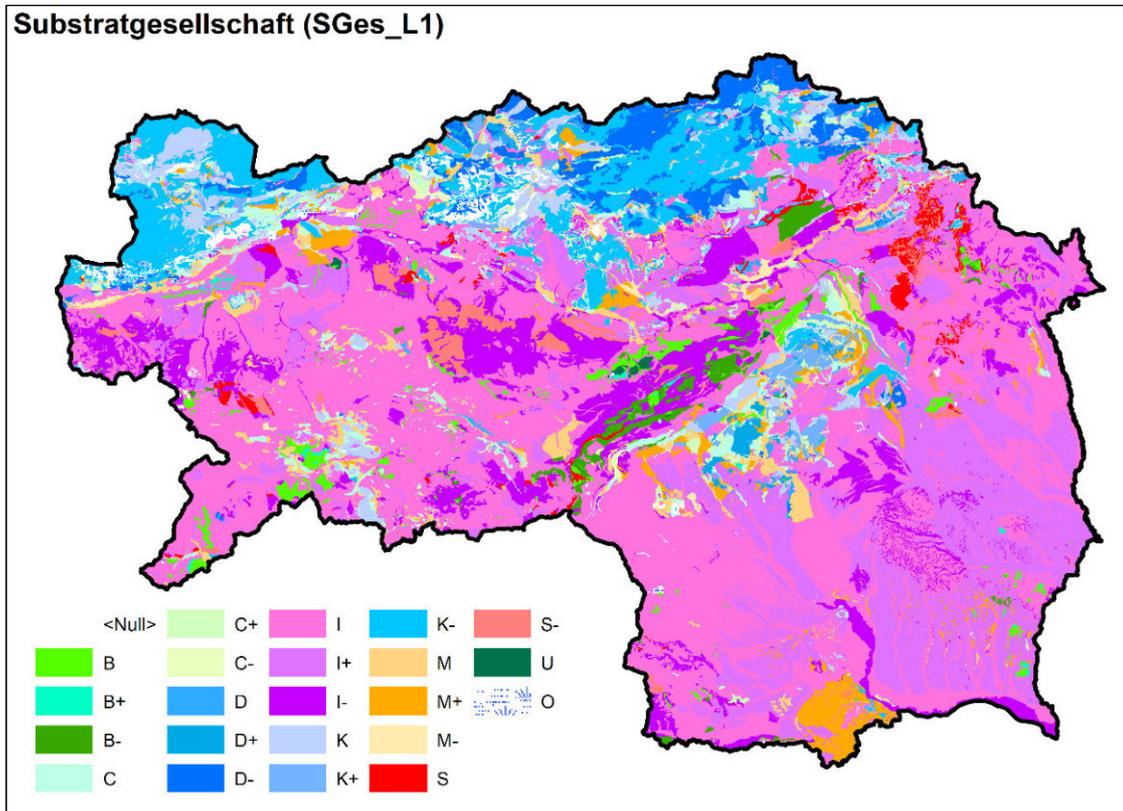


Abbildung 3: Substratkarte der Steiermark mit den Substratgesellschaften der Lockergesteinsschicht 1 (L1).

Die dominierende Substratgesellschaft der Lockergesteinsschicht in der Steiermark ist

- d) I (intermediäre Silikatgesteine) mit einer Fläche von 6.537 km²,
- e) gefolgt von I+ (intermediäre Tongesteine) mit 2.705 km² und
- f) I- (intermediäre Silikatgesteine rückstandsarm/ feinmaterialarm) mit 1.627 km².

Die Substratgesellschaft I+ tritt vor allem im Neogenbecken der Weststeiermark auf. Im Norden der Steiermark dominieren aufgrund der Nördlichen Kalkalpen karbonatische Substratgesellschaften wie Dolomit (D+, D, D-) und Kalk (K+, K, K-), wie auch nördlich von Graz, im Grazer Paläozoikum, vermehrt karbonatische Substratgesellschaften das Substrat bilden (Abbildung 3).

Wasserhaushalt

Der Ks-Wert wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden berechnet, wie im Kapitel Methodik bereits beschrieben. Die Basis der Berechnung stellte die Geländeansprache (_AP in Abbildung 4), sowie die Laborergebnisse (_Lab in Abbildung 4) dar. Der Vergleich der Resultate und folglich der Wertebereiche ist in Abbildung 4 mittels Box-Whisker Plots dargestellt. Es zeigt sich generell eine Korrelation zwischen Korngrößenverteilung und hydraulischer Durchlässigkeit, je grobkörniger das Substrat desto höhere

Leitfähigkeitswerte liegen vor. Unter Berücksichtigung der DWA zeigt sich auch, dass die hydraulische Durchlässigkeit mit höherer Lagerungsdichte abnimmt (minLD-> meanLD-> maxLD).

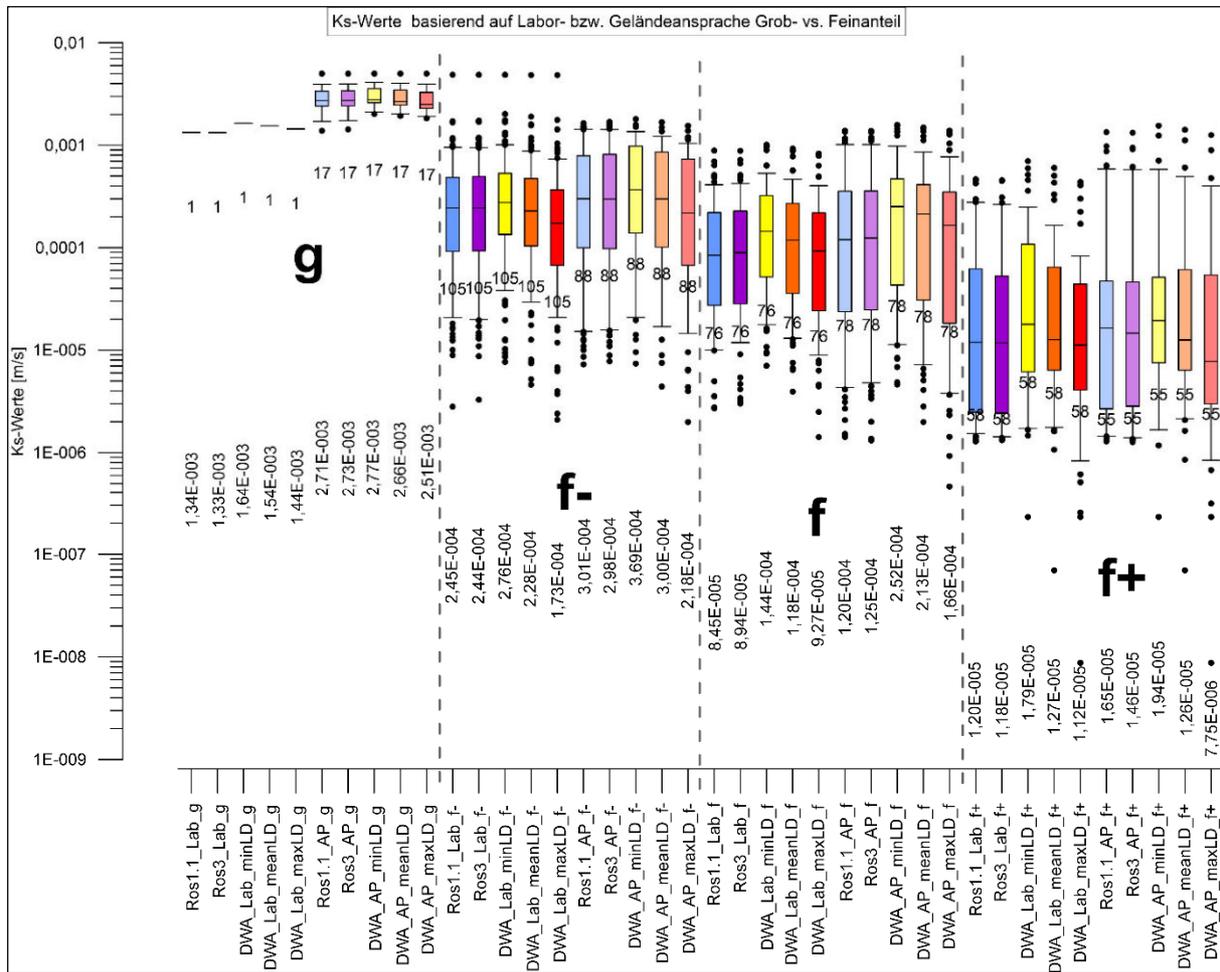


Abbildung 4: Box-Whisker Plots der berechneten Ks-Werte unterteilt in die einzelnen Klassen „g/f-/f+/“. Ein Vergleich der unterschiedlichen Methoden (Rosetta, Version 1.1. und 3.0 der Datenbank sowie Anwendung des DWA Regelblattes mit den jeweiligen Bereichen (min, mean, max) an Lagerungsdichten (Ld). Einmal (_Lab) werden die Grob- zu Feinanteile mittels reiner Laboransprache dargestellt, das andere Mal (_AP) anhand des Verhältnisses der Geländeansprache. Zahlen in der Box zeigen die Anzahl der Proben pro Klasse; die Ks-Werte unter den jeweiligen Box-Whiskers sind die Medianwerte. Schwarze Punkte stellen Ausreißer dar; Whisker zeigen die 10/90 Perzentile.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Substrat weist sehr oft einen recht hohen Anteil an Grobfraktion auf, weshalb die klassische Berechnung mittels Pedotransferfunktionen nur ein unteres Limit der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit darstellt. Die Koppelung von Fein- und Grobfraktion und Einbindung der Lagerungsdichte über die DWA-Berechnung ermöglicht eine gute Abschätzung der physikalischen Eigenschaften dieser Lockermaterialschichten. Für die Ks-Wert-Berechnung ist die Anwendung des DWA Regelblattes u.U. die bevorzugte Methode, da die Lagerungsdichte mitberücksichtigt wird, welche hier in die jeweiligen Bereiche min/mean/max gegliedert werden kann. Die unterschiedlichen Methoden zur Berechnung der hydraulischen Durchlässigkeit zeigen

deutlich eine Unterteilung in die vier verschiedenen Klassen „g/f-/f/f+“, welche eine gute Basis für die Übertragung in die Fläche darstellt.

Die Ergebnisse dienen in Kombination mit den getrennt erhobenen Bodeneigenschaften und Klimainformationen der Ableitung des Geländewasserhaushalts als ein wesentlicher durch Klimaänderungen stark beeinflussbare Standortsfaktor für das Waldwachstum.

Danksagung

Der Auftraggeber für FORSITE ist das Land Steiermark, die Finanzierung erfolgt über das österreichische Programm zur ländlichen Entwicklung (LE 14-20). Das Projekt wird durch acht nationale Institutionen bearbeitet (Universität für Bodenkultur; BFW Bundesforschungszentrum für Wald; Universität Graz; WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung; ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; ALPECON Techn. Büro für Geowissenschaften; Joanneum Research; JR-AquaConSol). FORSITE wurde im Sommer 2018 gestartet, der Projektabschluss ist im Jahr 2021 geplant.

Referenzen

DWA-A-920-1 (2017): Bodenfunktionsansprache, Teil 1: Ableitung von Kennwerten des Wasserhaushalts, S.67.

Fuchs, S., Ziesche, M., Nillert, P. (2017): Empirische Verfahren zur Ableitung verschiedener Porositätsarten aus Durchlässigkeitsbeiwerte und Ungleichkörnigkeitszahl – ein Überblick. –Grundwasser, 22, 83-101.

Helmbold, F. (2002): Beschreibung des Rechenprogrammes GWDREI, Programm zur Simulation der dreidimensionalen gesättigten Grundwassermengen-und Güteströmung, RWE Rheinbraun AG, unveröffentlicht.

Schaap, M.G., Leij F.J., Van Genuchten M. TH. (2001): Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. – Journal of Hydrology, 251, 163-176.

Vacik, H., Formayer, H., Katzensteiner, K., Grabner. M., Wilhelmy, M., Englisch, M., Klebinder, K., Proske, H., Poltnig, W., Winkler, G., Klosterhuber, R., Podesser, A. (2019): FORSITE - a dynamic forest site classification to support adaptive forest management. XXV IUFRO World Congress - Forest Research and Cooperation for Sustainable Development, Curitiba, Sep 29 - Oct 5, 2019, Pesquisa Florestal Brasileira, 39 e201902043, 386-386.

Wilhelmy, M., Hotter, M., Klosterhuber, R., Simon, A., Winkler, G., Klebinder, K., Katzensteiner, K., Englisch, M., Vacik, H., Proske, H., Poltnig, W., Hopf, S., Gruber, J. (akzeptiert): Classification of subsolum geological substrates (SGS) as basis for soil formation and area covering data about nutrient potential and water balance. EUROSIL2020CONT-2143, Geneva.

Anhang: Tabelle der Gentyp-Klassen

Gentyp	txt	Subgentyp	Beispiele / Erklärungen
Anthropogen – HUMAN	Hx	undifferenziert	Geländeform anthropogen, unspezifiziert
	Hgr	dominante Korngröße Kies	Abraumhalden v on Bergbauarealen
	Hsa	dominante Korngröße Sand	Abraumhalde, Bodenaushub fein
	Hsi	dominante Korngröße Schluff/Lehm	Anschüttungen in Senken
	Hcl	dominante Korngröße Ton	Anschüttungen in Senken
	Ho	organisch	Kulturboden stark humos, Planie
Äolisch – EOLIC	Ex	undifferenziert	Löss
	Ef	äolische Schluffe und Tone	Löss
	Esa	äolische Sande	Löss
Lakustrine – LACUSTRINE	Lx	undifferenziert	Sedimentationsraum v ermutet lakustrin, Senken
	Li	glazigen	glazilakustrine Feinsande, Schluffe und Tone
Fluvial – FLUVIAL	Fx	undifferenziert	Sedimentationsraum v ermutet fluvial
	Fa	Alluvion	Talablagerungen ± auf Niveau Vorflut
	Fj	Schwemmfächer	Oberflächengefälle ca. < 5°; oft perennierendes Gerinne
	Fc	Murkegel	Oberflächengefälle ca. > 5°, Sortierung gering, Gerinne meist nur episodisch
	Fs	Auswaschung, Suspensionsaustrag	kolluviale Ablagerungen an Unterhang/Senke
	Ft	Terrasse allgemein	
	Fff	Terrasse feinkörnig	
	Ftg	Terrasse grobkörnig	
Moräne – TILL	Tx	Moräne undifferenziert	glaziale Ablagerungen, keine Spezifizierung
	Tz	Grundmoräne	Überkonsolidierte Diamikte mit v ergleichsw. hohem Feinanteil; häufig mit gekritzten Geschieben
	Ty	Seiten- und Endmoräne	Meist mit erkennbaren Wallformen, v ergleichsw. hoher Grobanteil
	Tb	Obermoräne und Blockgletscher	
Gravitative Bildung – GRAVIT	Gx	undifferenziert	Überwiegend gravitativ er Transport angenommen
	Gb	Blockwerk	Fels- und Bergsturzablagerungen, Blockschutt am Unterhang v on Sturzhalden
	Gd	Schutt	weites Korngrößenspektrum Sande bis Steine
	Gr	Rutschmasse	Lockergesteinsrutschmassen, Fließerden, Solifluktsdecken
Paläoboden – PALEO	Px	Paläoboden, undifferenziert	
	Pw	Residuum	
Organisches Material, Torf – ORGANIC	Ox	Moor undifferenziert	
	Oh	Hochmoortorf, Regenwassermoor	
	Ou	Übergangsmoortorf	
	Oi	Niedermoortorf	
	Ov	Vernässungen	
Marine – MARINE	Mx	undifferenziert	
	Mf	Sediment feinklastisch	
	Mg	Sediment grobklastisch	
	Mk	Sediment karbonatisch	
Unbekannte Gruppe - X	Xgr	dominante Korngröße Kies	
	Xsa	dominante Korngröße Sand	
	Xsi	dominante Korngröße Schluff/Lehm	
	Xcl	dominante Korngröße Ton	