

Simulation des Wasser-, Wärme- und Stofftransports in gefrierenden Böden

Olaf Ippisch¹, Julia Boike², Peter Bastian¹, Kurt Roth³

In gefrierenden Böden sind Wasser-, Wärme- und Stofftransport stark miteinander gekoppelt. Durch langsame Verwitterung und periglaziale Mischungsprozesse sind gefrierende Böden ausserdem oft sehr heterogen. Zum Studium der Transportprozesse in gefrierenden Böden wurde deshalb ein neues Mehrphasenmodell entwickelt, mit dem zwei- und dreidimensionale Berechnungen möglich sind. Ein Vergleich von Simulationsergebnisse mit Messwerten von einem Permafroststandort nahe Ny Ålesund, Spitzbergen, zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung, jedoch auch deutliche Abweichungen im Detail.

Gefrierende Böden sind insbesondere wegen der starken Kopplung von Wärme- und Wassertransport interessant.

Abbildung 1 zeigt die vielfältigen Transportprozesse und ihre Wechselwirkungen in einem gefrierenden Boden. Auf der Basis von Energie- und Massenerhaltung wurde ein Kontinuumsmodell gefrierender Böden erstellt. Der Trans-

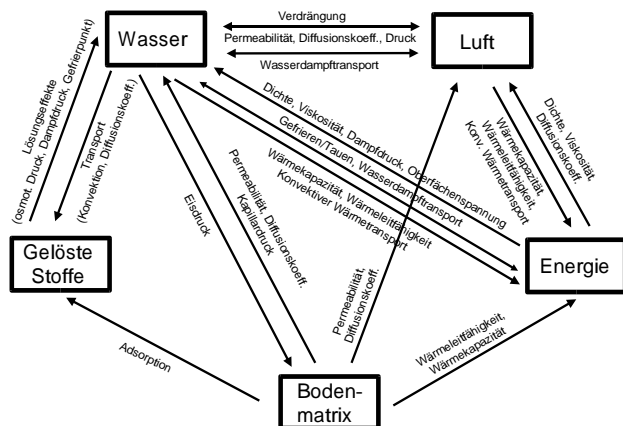


Abbildung 1: Wechselwirkung zwischen verschiedenen Transportprozessen in einem gefrierenden Boden

port von Wasser, Luft, einem gelösten Stoff (der im wesentlichen die Ionenstärke repräsentiert) und der Energietransport können berechnet werden. Weitere wichtige Annahmen die in das Modell eingehen sind die Ableitbarkeit des Kapillardrucks aus der Temperatur in gefrorenen

Böden (mit Hilfe der Clausius-Clapeyron-Gleichung) und die Existenz einer eindeutigen Beziehung zwischen Kapillardruck und ungefrorenem Wassergehalt. Mechanische Prozesse und Hysterese wurden vorerst bewusst nicht berücksichtigt. Die Annahme eines völlig starren Mediums führt während des Gefrierens jedoch zu einem nicht mehr lösbaren Gleichungssystem. Deshalb kann sich im Modell der Boden bei ansteigendem Eisgehalt lokal dehnen. Dies führt zum Aufbau eines Eisdrucks, der der Wasserbewegung entgegenwirkt. Die genaue Änderung der Bodengeometrie und ihre Auswirkung auf den Transport wird jedoch nicht berücksichtigt.

Das resultierende System partieller Differentialgleichungen wird mit einem voll impliziten, voll gekoppelten Finite-Volumen-Verfahren auf Basis der numerischen Toolbox UG (IWR Heidelberg) gelöst.

Mit dem Modell wurde der Wasser- und Energiehaushalt eines Permafrostbodens nahe Ny Ålesund für einen Zeitraum von 900 Tagen simuliert und die Ergebnisse mit Messdaten verglichen. Dabei wurden noflux-Randbedingungen an den Seiten und Dirichlet-Randbedingungen an der Ober- und Unterseite des Profils ver-

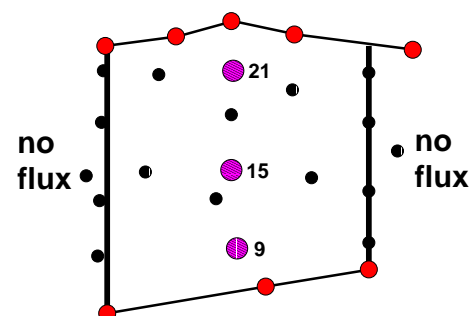


Abbildung 2: Position der Temperatur- und TDR-Sonden im Profil.

¹Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, INF 368, D-69120 Heidelberg
email: olaf.ippisch@iup.uni-heidelberg.de

²Alfred Wegener Institut Potsdam
zur Zeit: Institute of Northern Engineering
University of Alaska, Fairbanks

³Institut für Umweltp Physik, INF 229,
D-69120 Heidelberg

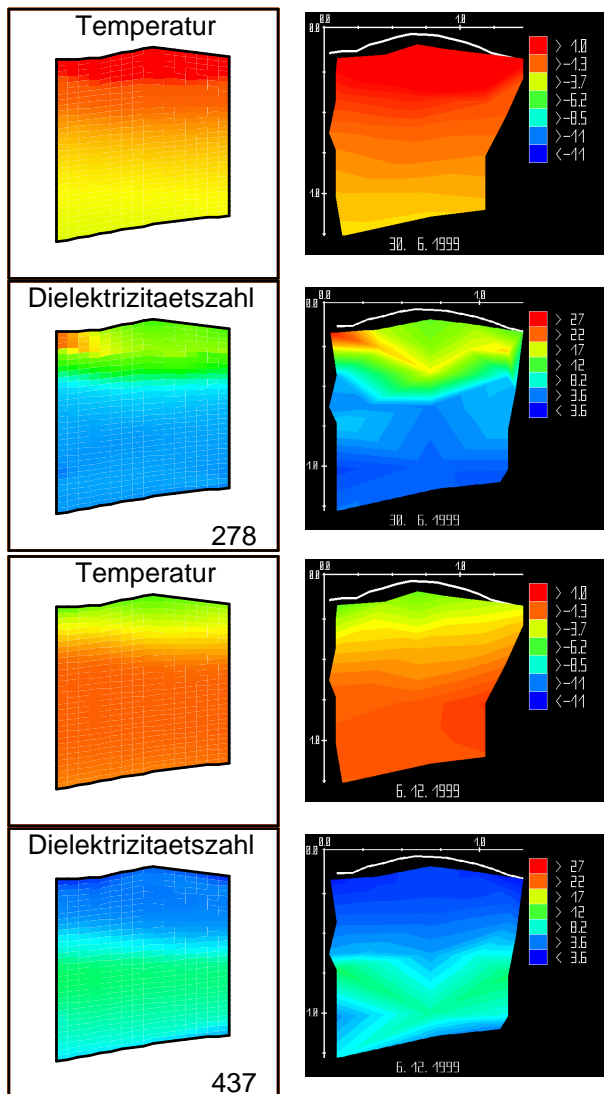


Abbildung 3: Gemessene (rechts) und simulierte Daten (links) für Temperatur und Dielektrizitätszahl während des Auftauens (oben) und des Wiedergefrierens (unten).

wendet. Letztere wurden ebenso wie die Anfangsbedingungen aus Messwerten interpoliert. Wasser- und Eisgehalt wurden dabei erst während der Simulation aus der Dielektrizitätszahl berechnet, da hier neben der gemessenen Temperatur auch die gewählte Wasserspannungskurve eingeht und so Inkonsistenzen insbesondere bei der Sensitivitätsprüfung vermieden wurden.

Abbildung 3 zeigt Profile von Dielektrizitätszahl und Temperatur während des Auftauens und Wiedergefrierens. Die Übereinstimmung ist als gut zu bewerten. Die Abweichungen bei der Temperatur sind durch eine zu geringe Wärmeleitfähigkeit aber auch mit der starken Heterogenität des Profils, z.B. einen in etwa 50cm Tiefe quer durch das Profil verlaufenden Horizont mit ca. 50% Steingehalt, zu erklären.

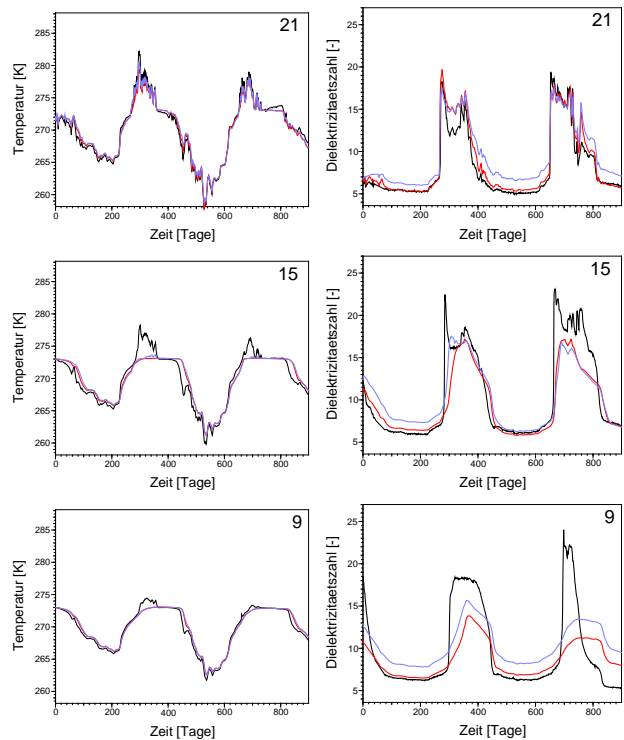


Abbildung 4: Vergleich von gemessenen und simulierten Werten über einen Zeitraum von 900 Tagen. Schwarz: gemessen, Dunkelgrau: simuliert mit van Genuchten Parametern $\alpha = 1.6$, $n = 1.25$, Hellgrau: $\alpha = 1.5$, $n = 1.20$.

Der Vergleich von Zeitreihen an den in Abbildung 2 hervorgehobenen Sonden zeigt (Abbildung 4), dass die Übereinstimmung mit zunehmender Tiefe schlechter wird. Bei den Sonden 9 und 15 taut der Boden im Sommer nicht vollständig auf, so dass die Temperatur nicht über 0°C ansteigt. Weder eine Veränderung der Wasserspannungskurve noch eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führten zu einer signifikanten Verbesserung der Übereinstimmung. Besonders die Infiltration des Schmelzwassers ist ohne präferentielle Fließprozesse wohl nicht nachzuvollziehen. Aber auch die Nichtberücksichtigung der Mechanik und Fehler in den Anfangs- und Randbedingungen können zu den Abweichungen beitragen. 3D-Simulationen und Simulationen unter Einbeziehung von osmotischen Effekten führten zu keinen signifikanten Änderungen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Lösungskonzentrationen im Profil sehr niedrig sind. Wasserdampftransport war von untergeordneter Bedeutung, während der Transport latenter Wärme mit infiltrierendem Schmelzwasser für das schnelle Auftauen des Profils wichtig war.