

Ein Digitaler Zwilling des Waldes als Werkzeug zur Simulation von Baumstress und zur Überbrückung der Lücke zwischen Forstwissenschaft und Praxis

Der digitale Zwilling gewinnt im Forstbereich zunehmend an Bedeutung, da Wälder im Kontext des Klimawandels eine zentrale Rolle spielen – sowohl als bedeutende Kohlenstoffspeicher als auch als hochwirksame Regulatoren des Klimas (Wang et al., 2025). Sie binden CO₂ langfristig im Biomasseaufbau, beeinflussen den regionalen Wasserhaushalt durch Verdunstung und Interzeption und wirken über Beschattung sowie Verdunstungskühlung stabilisierend auf das Mikro- und Mesoklima (Psistaki et al., 2024). Gleichzeitig reagieren Waldökosysteme empfindlich auf steigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster und Extremereignisse wie Hitze oder Sturm. Der anhaltende Klimawandel verstärkt daher nicht nur den ökologischen Anpassungsdruck, sondern gefährdet auch jene natürlichen Klimaregulationsfunktionen, von denen Gesellschaft und Umwelt in hohem Maße profitieren (Seidl e. al., 2017, Roshani et al., 2022). Um diesen Entwicklungen zu begegnen, braucht es neue, datenbasierte Ansätze, die ökologische Prozesse präzise abbilden, zukünftige Entwicklungen simulieren und so fundierte Entscheidungen ermöglichen.

Hier setzt das Konzept des digitalen Zwillings an: ein virtuelles, datengetriebenes Abbild des Waldes, das durch kontinuierlich einfließende Informationen immer präziser wird und Veränderungen frühzeitig sichtbar machen kann (Brandt et al., 2023). Ein solcher digitaler Zwilling eröffnet im Forstbereich erhebliche Potenziale, da er reale Ökosysteme modelliert, Daten aus Wissenschaft, Monitoring und Fernerkundung integriert und komplexe ökologische Prozesse wie Baumstress nachvollziehbar macht. Dadurch können Risiken besser eingeschätzt, Anpassungsstrategien im Klimawandel entwickelt und wissenschaftliche Erkenntnisse praxisnah aufbereitet werden, sodass die Verbindung zwischen Forschung und forstlicher Anwendung deutlich gestärkt wird.

Die Notwendigkeit eines solchen Ansatzes wird besonders in Rheinland-Pfalz deutlich, einem der waldreichsten Bundesländer Deutschlands. Rund 43 % der Landesfläche sind bewaldet – das entspricht etwa 840.000 Hektar (<https://www.sdw-rlp.de/ueber-den-wald/wald-in-rheinland-pfalz>, zuletzt besucht 27.11.25). Mit 45,9% davon liegt fast die Hälfte im kommunalen Besitz, womit Städte und Gemeinden eine zentrale Verantwortung für Pflege, Stabilität und Zukunftsfähigkeit ihrer Wälder tragen (<https://www.wald.rlp.de/wald/eigentuemmer-der-waelder/>, zuletzt besucht 27.11.25). Diese Akteure stehen in besonderem Maße unter Druck: Längere Trockenheitsphasen, steigende Temperaturen und eine wachsende Anfälligkeit gegenüber Schädlingen stellen das Waldmanagement vor komplexe Herausforderungen (Dye et al., 2024). Gleichzeitig bestehen deutliche Lücken zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen aus langfristigen Beobachtungsflächen oder Modellen und den alltagspraktischen Anforderungen in Forstbetrieben, die konkrete und schnell interpretierbare Entscheidungshilfen benötigen.

Unser Beitrag adressiert genau diese Lücke und stellt einen digitalen Zwilling des Waldes vor, der die Simulation von Baumstress auf Grundlage von Boden- und Klimadaten ermöglicht. Das System befindet sich derzeit in einem frühen, prototypischen Stadium, in dem die grundlegende Modellierungslogik implementiert ist, jedoch noch umfangreiche Erweiterungen und Validierungen erfolgen müssen. Der Prototyp nutzt bislang vor allem Daten aus wissenschaftlichen Dauerbeobachtungsflächen, die aufgrund ihrer Qualität und Langfristigkeit besonders geeignet sind, ökologische Prozesse belastbar nachzubilden. Diese Daten bilden das Fundament, um Stressreaktionen von Bäumen modellieren und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Umweltbedingungen ziehen zu können.

In einem nächsten Schritt soll der digitale Zwilling um weitere Standortdaten ergänzt werden, um regionale Unterschiede stärker herausarbeiten und die Modelle robust skalieren zu können. Ein besonderer Fokus liegt auf der Integration von Satellitendaten und KI-gestützten Verfahren.

Baumklassifikation, die Stresserkennung durch NDVI Daten und die Integration von Wetter- und Klimadaten sollen die Simulation weiter verbessern. Sie sollen ermöglichen, Stressindikatoren nicht nur punktuell, sondern flächenhaft zu erfassen – ein entscheidender Schritt für das sogenannte Upscaling, also die Übertragbarkeit standortspezifischer Modelle auf ganze Landschaften oder Waldgebiete. Die Untersuchung der Potenziale und Herausforderungen dieses Upscalings ist ein zentrales Ziel unserer Arbeit, da nur so ein Werkzeug entstehen kann, das sowohl wissenschaftlich fundiert als auch praktisch breit einsetzbar ist.

Der Praxisbezug des Ansatzes zeigt sich darin, dass er konkrete forstliche Anwendungen adressiert: Die frühzeitige Identifikation von Trockenstress, die Ableitung von Risikoszenarien, die Entscheidungsunterstützung bei Baumartenwahl und Waldumbau oder die Priorisierung von Pflege- und Schutzmaßnahmen. Gleichzeitig liefert der digitale Zwilling eine visuelle und intuitive Aufbereitung wissenschaftlicher Daten, die bisher vor allem in Modellform oder Publikationen vorlag und für Praktikerinnen und Praktiker oft nur schwer zugänglich war. Durch die enge Zusammenarbeit mit forstlichen Anwendern soll sichergestellt werden, dass die Auswertungen und Darstellungen direkt an deren Bedarfen orientiert sind und so ein Werkzeug entsteht, das im betrieblichen Alltag tatsächlich nutzbar ist.

Besonders relevant ist, dass der digitale Zwilling auf Open-Source-Komponenten basiert. Dadurch wird nicht nur Transparenz geschaffen, sondern auch die Nachnutzbarkeit und Weiterentwicklung durch andere Institutionen, Kommunen oder Forschungsprojekte ermöglicht. Die offene Architektur erlaubt zudem die perspektivische Kopplung mit weiteren digitalen Zwillingen, die derzeit in verwandten Bereichen entstehen – etwa einem Hydrozwilling zur Simulation hydrologischer Prozesse oder KI-basierten Modellen, die in Projekten wie dem KIWI-Projekt entwickelt werden (<https://www.iese.fraunhofer.de/blog/oekosystem-wald-ki-und-datenbasierte-forschung/>, zuletzt besucht 27.11.25). Diese Verknüpfungspotenziale eröffnen weitreichende Möglichkeiten: Sie unterstützen nicht nur die ökologische Gesamtinterpretation, sondern schaffen auch Mehrwerte für übergreifende Fragestellungen, etwa zur Wasserverfügbarkeit, Vitalität einzelner Baumarten oder komplexen Risikoanalysen im Klimawandel. Damit bildet der digitale Zwilling eine skalierbare Grundlage, deren Erweiterbarkeit und kombinierbare Struktur den langfristigen Bedarf der Forstpraxis ebenso wie der Forschung unterstützt.

Auch wenn sich der digitale Zwilling noch im Aufbau befindet, zeigt der aktuelle Entwicklungsstand bereits, wie groß sein Potenzial für Forschung und Praxis ist. Er kann dazu beitragen, Baumstress besser zu verstehen, räumliche Muster sichtbar zu machen und die Auswirkungen des Klimawandels präziser abzuschätzen. Noch wichtiger ist jedoch, dass er als verbindendes Element zwischen wissenschaftlicher Modellierung und praktischer Entscheidungsfindung fungieren kann. Damit bietet der digitale Zwilling eine innovative Möglichkeit, die Zukunftsfähigkeit der Wälder – insbesondere in stark betroffenen Regionen wie Rheinland-Pfalz – langfristig zu unterstützen und die komplexen Herausforderungen des Klimawandels datengestützt anzugehen.

Literatur

Brandt, S., Henningsen, J., Hess, S., Jedlitschka, A. (2023): Digitale Zwilling Potenziale in der Stadtentwicklung, BBSR, 978-3-98655-035-6, [BBSR - Veröffentlichungen - Digitale Zwillinge](#).

Dye, A.W., Houtman, R.M., Gao, P. *et al.* Carbon, climate, and natural disturbance: a review of mechanisms, challenges, and tools for understanding forest carbon stability in an uncertain future. *Carbon Balance Manage* **19**, 35 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00282-0>.

Psistaki, K., Tsantopoulos, G., Paschalidou, A.K. (2024): An Overview of the Role of Forests in Climate Change Mitigation. *Sustainability*, 16, 6089. <https://doi.org/10.3390/su16146089>.

Roshani, Sajjad, H., Kumar, P., Masroor, M., Rahaman, M. H., Rehman, S., Ahmed, R., & Sahana, M. (2022): Forest Vulnerability to Climate Change: A Review for Future Research Framework. *Forests*, 13(6), 917. <https://doi.org/10.3390/f13060917>

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martín-Benito, D., Peltoniemi, M. Vacchiano, G. Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T., Reyer, C. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*. 7. 395-402.

Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2023): Forests and the changing climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 71–86.

Wang, G.G., Lu, D., Gao, T. *et al.* (2025): Climate-smart forestry: an AI-enabled sustainable forest management solution for climate change adaptation and mitigation. *J. For. Res.* **36**, 7. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01802-x>.