

## Summary

### **Soil fertility and yield in forest production**

Conservation of soil fertility is a principal aim in sustainable land-use management. At the same time, the concept of "soil fertility" is insufficiently defined to make it operational. The lack of a precise definition of the concept is due to the fact, that soil fertility is the result of complex interactions of a multitude of biotic and abiotic processes and factors. In a production context soil fertility only is relevant in combination with a certain primary producer (plant) and therefore intrinsically includes the plant-soil-atmosphere interfaces and interactions. These make it difficult to define an exact measure of soil fertility, to discriminate functions of the various site fertility components and to quantitatively determine their share to the overall output. Here we elucidate the soil fertility concept and develop a conceptual model describing the basic relationships between different components in the context of sustainable intensification of forest production.

## Zusammenfassung

Die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist ein Kriterium, das im Zusammenhang mit den Anforderungen an die Nachhaltigkeit der forstlichen Bewirtschaftung häufig als zentrales Element genannt wird (z.B. § 1 Abs. 1 BWaldG, Bundeswaldgesetz, Stand: 17.01.2017, I-75). Gleichzeitig stellt die Bodenfruchtbarkeit ein Konzept dar, das an wissenschaftlichen Maßstäben gemessen nicht präzise definiert ist. In der vorliegenden Studie soll das Konzept der Bodenfruchtbarkeit durchleuchtet, und die Verbindung zur forstlichen Produktion dargestellt werden. Implikationen für die nachhaltige Intensivierung (ökologische Intensivierung) der forstlichen Produktion werden aufgezeigt.

## Problemstellung

Die Unbestimmtheit des Begriffs der Bodenfruchtbarkeit resultiert daher, dass die Bodenfruchtbarkeit das Ergebnis des Zusammenwirkens einer Vielzahl von biotischen und abiotischen Prozessen und Faktoren darstellt, wobei sowohl die Prozesse und Faktoren hinsichtlich ihres relativen Beitrags als auch die Nachhaltigkeit der Produktionskraft schwierig zu messende Größen darstellen. Im Kontext der Primärproduktion ist der Ertrag bzw. das Ertragspotenzial ein häufig verwendetes Maß für die Bodenfruchtbarkeit. Der potenziell erzielbare (Natural-) Ertrag ist jedoch neben vielfältigen chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften, auch von klimatischen und lagebestimmten Produktionsfaktoren sowie von der Pflanzenart und von deren Anbau und Kultivierung abhängig. Der tatsächliche Ertrag wiederum ist der Anteil des potenziellen Ertrags der bei den vorherrschenden Witterungsbedingungen und den gegebenen Verlusten durch biotische und abiotische Schadfaktoren unter Berücksichtigung technischer Restriktionen und ökonomischer Zielsetzungen nutzbar ist (vgl. Kahle 2015). In dem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, welches das Zusammenspiel zwischen ertragsbestimmenden, ertragslimitierenden und ertragsreduzierenden Faktoren im Kontext der forstlichen Produktion darstellt. Nicht unerwähnt bleiben soll, dass die Bodenfruchtbarkeit neben dem direkten Beitrag des Bodens zur Primärproduktion auch relevant für die Erbringung zahlreicher anderer Ökosystemdienstleistungen des Bodens ist, z.B. als Habitat für Bodenorganismen, als Kohlenstoff-, Wasser-, und Nährstoffspeicher, sowie als Wasserfilter und -puffer.

## Das Konzept der Bodenfruchtbarkeit

In seiner „Produktionslehre“ beschrieb der Wirtschaftstheoretiker Karl Marx (1894, S. 627) die Bodenfruchtbarkeit als „... eine objektive natürliche Eigenschaft des Bodens, welche den Gebrauchswert des

Bodens als Hauptproduktionsmittel der Land- und Forstwirtschaft darstellt“. Eine umfassendere, jedoch ebenfalls utilitaristisch fundierte Definition formuliert Köppen (2002, S. 57): „Bodenfruchtbarkeit ist ein Wirkungsgefüge, das sich als offenes dynamisches restriktiv selbstregulierendes System in seiner Eignung für und durch die Bodennutzung auf der Grundlage natürlicher Standortfaktoren und Prozesse herausbildet und entwickelt, ... und über seine durch die Umwelt geprägten nachhaltigen Wirkungen auf Boden und Kulturpflanzen unter Funktions-, Struktur- und Systemaspekten beurteilt werden kann“.

Kundler et al. (1989) nehmen eine produktionsökologische Perspektive ein, und definieren Bodenfruchtbarkeit als den Wirkungsanteil des Bodens an der Produktivität und Effektivität der Pflanzenproduktion. Diese Definition hebt besonders hervor, dass es neben dem Boden noch weitere relevante Faktoren gibt, welche sowohl die Produktivität als auch die Effizienz der Ressourcennutzung von Pflanzenbeständen beeinflussen. Demnach liegen der Produktionsleistung des Bodens die folgenden Funktionen zu Grunde:

- (i) **physiologische Funktionen**, d.h. die bedarfsgerechte Vermittlung von Nährstoffen, Wasser, Luft und Wärme an die Pflanzen über die Wurzeln,
- (ii) **phytosanitäre Funktionen**, d.h. die Regulierung des Gehalts an Schaderregern und Schädlingen im Boden,
- (iii) **mechanische Funktionen**, d.h. die Verankerung der Pflanzen und damit deren Stabilität gegenüber mechanischen Einwirkungen, sowie
- (iv) **technologische Funktionen**, d.h. der Einfluss des Bodens auf die Bedingungen für Kultivierung, Schutz und Ernte der Pflanzenbestände.

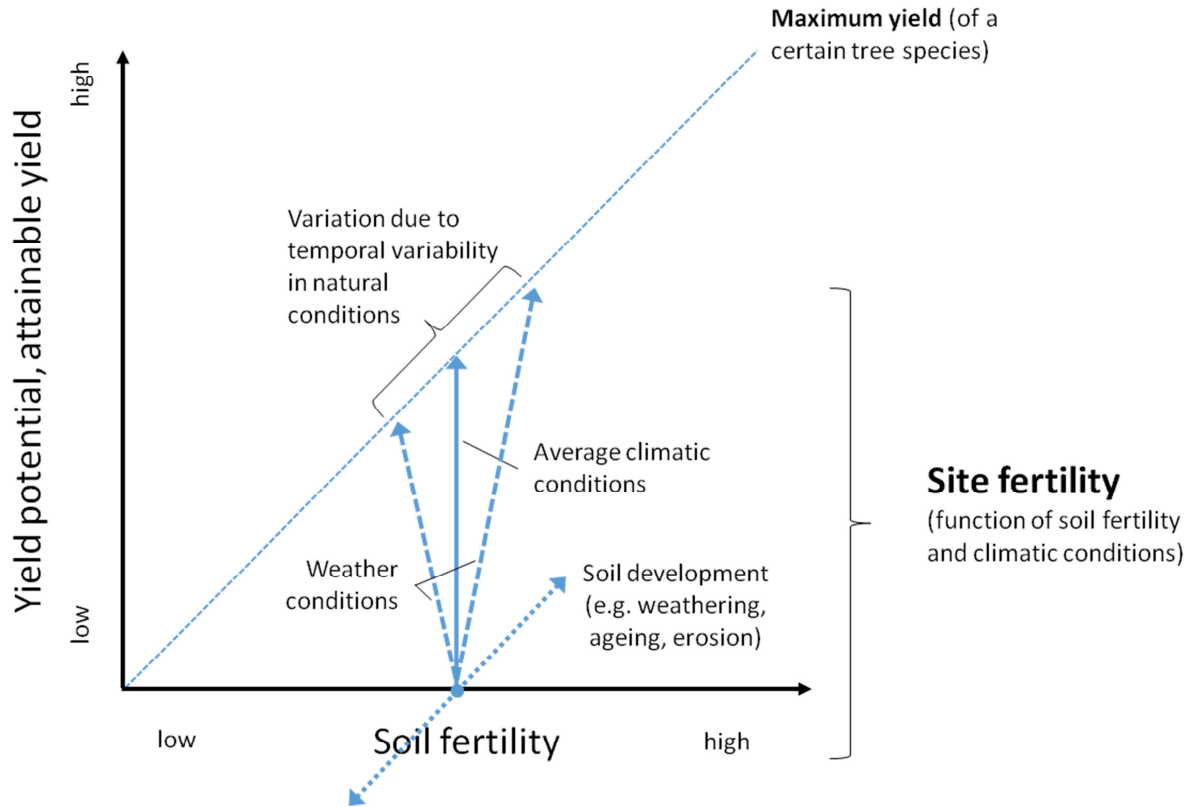
Diese Bodenfunktionen wiederum sind durch die chemischen, mineralogischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften und -prozesse bestimmt. Von vielen Autoren wird die organische Bodensubstanz als wesentlicher Träger der Bodenfruchtbarkeit angesehen (vgl. Köppen 2002). Für das Pflanzenwachstum bedeutende Funktionen der organischen Bodensubstanz sind vor allem deren Wirkungen als Kohlenstoffspeicher, Wasserspeicher, Nährstoffspeicher, als bodenstrukturbildendes Element sowie als Substrat für die biologische Aktivität.

Nach Gisi et al. (1997) ist es im Kontext der Landnutzung angebracht, zwischen der natürlichen Bodenfruchtbarkeit als dem Ergebnis des komplexen Zusammenwirkens von Gestein und Relief, Klima und Bodenlebewesen, und der über die langfristigen Auswirkungen der Bewirtschaftung in Form z.B. von Düngung, Bewässerung, und Bearbeitung modifizierten erworbenen Bodenfruchtbarkeit zu unterscheiden. Die erworbene Bodenfruchtbarkeit ist die unter Einwirkung aktueller natürlicher Einflüsse wie Witterung und biotische und abiotische Schadfaktoren sowie der eher kurzfristig wirksamen Effekte anthropogener Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Düngung, und ggfls. Pflanzenschutz modifizierte Bodenfruchtbarkeit. Danach ist die Bodenfruchtbarkeit also keine konstante Bodeneigenschaft, sondern eine Eigenschaft des Bodens die sowohl natürlichen als auch anthropogenen zeitlichen Änderungen unterliegen kann.

Die Bodenfruchtbarkeit bestimmt als Ausdruck der ertragsbestimmenden Bodenfaktoren das Ertragsvermögen des Bodens. Zusammen mit den ertragsbestimmenden klimatischen Produktionsfaktoren bestimmt die Bodenfruchtbarkeit das Ertragsvermögen des Standorts, und damit die Standortfruchtbarkeit (Kahle 2015). Die durch die topographische Lage bestimmten für das Pflanzenwachstum relevanten Standortmerkmale lassen sich den Bodenfaktoren oder den klimatischen Standortfaktoren zuordnen.

In bewirtschafteten Produktionssystemen ist bezüglich des Ertragsvermögens ferner zu unterscheiden zwischen

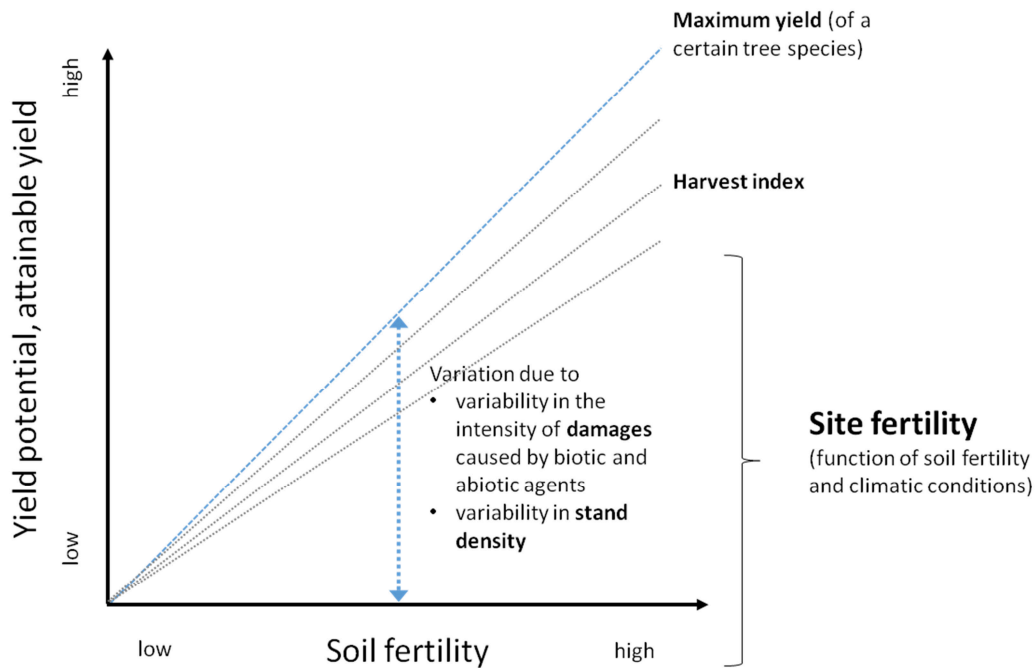
- (i) dem **maximalen Ertragspotenzial** im Sinne des unter idealen Bedingungen hypothetisch erreichbaren Ertrags,
- (ii) dem **erreichbaren Ertragspotenzial** das unter Anwendung optimaler Managementpraktiken, d.h. unter Berücksichtigung eines bestimmten Aufwandes, real erreicht werden kann, und
- (iii) dem **erreichten Ertrag** der unter den gegebenen Bedingungen real erreicht wurde, und damit im Unterschied zu den o.g. Potenzialen auch direkt gemessen werden kann.



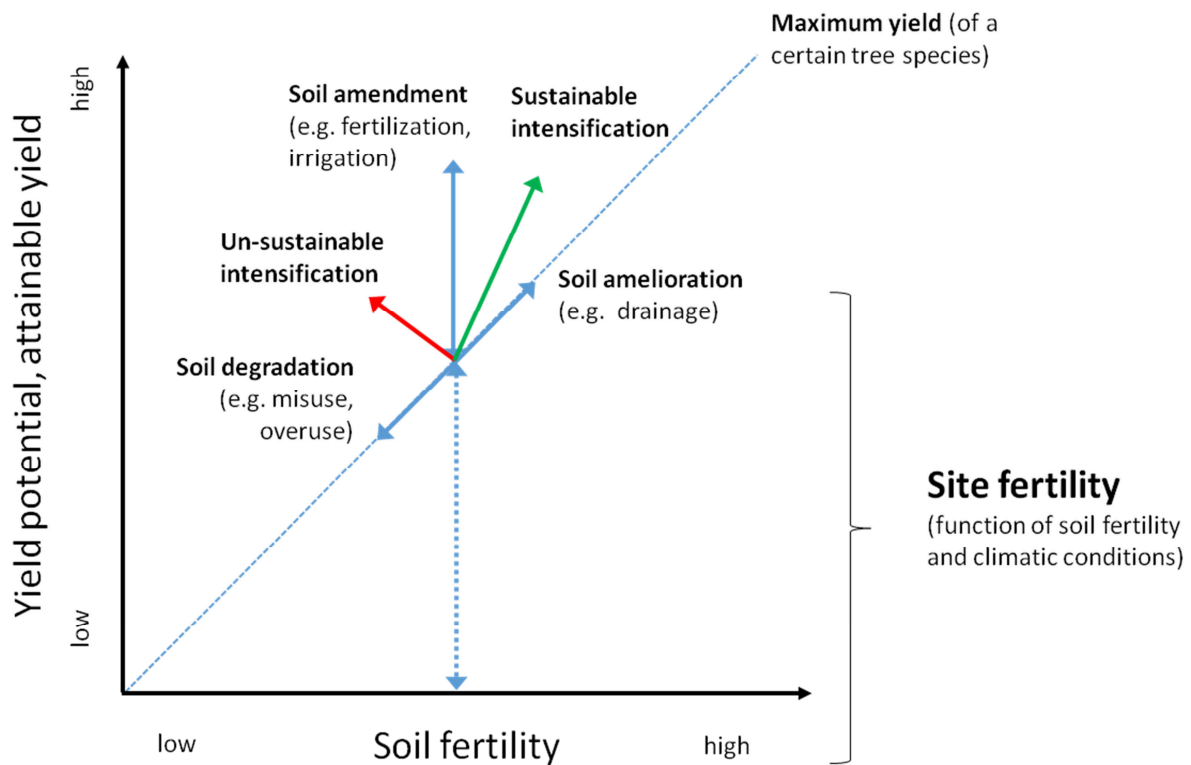
**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Bodenfruchtbarkeit (engl. soil fertility), Standortfruchtbarkeit (engl. site fertility) und (maximalem) Ertragspotenzial bzw. erreichbarem Ertrag (engl. yield potential, attainable yield).

Abbildung 1 stellt die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Bodenfruchtbarkeit, der Standortfruchtbarkeit und dem Ertragspotenzial bzw. dem erreichbaren Ertrag dar. Hervorzuheben ist, dass sich der Zusammenhang zwischen Boden- bzw. Standortfruchtbarkeit und dem Ertragspotenzial immer auf einen bestimmten Genotyp (Baumart, Provenienz etc.) bezieht. An der Darstellung wird ferner deutlich, dass die Boden- wie auch die Standortfruchtbarkeit zeitlichen Änderungen unterliegen, und dementsprechend auch das Ertragspotenzial nicht konstant ist. Das Ausmaß z.B. von witterungsbedingten Ertragsschwankungen lässt Aussagen über die Ertragssicherheit zu.

Ergänzend zu Abbildung 1 sind in Abbildung 2 die Bedeutung des Ernteindex für den Ertrag sowie die Rolle produktions- bzw. ertragsreduzierender Faktoren im Kontext von Boden-/Standortfruchtbarkeit und Ertrag dargestellt.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Boden- bzw. Standortfruchtbarkeit und Ertragspotenzial bzw. erreichbarem Ertrag (vgl. Abb. 1) unter besonderer Berücksichtigung vom Ernteindex (engl. yield index) sowie von ertragsreduzierenden Faktoren.



**Abbildung 3:** Schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen Boden- bzw. Standortfruchtbarkeit und Ertragspotenzial bzw. erreichbarem Ertrag (vgl. Abb. 1) unter besonderer Berücksichtigung möglicher Effekte von langfristig wirksamen Maßnahmen die zu einer anhaltenden (nachhaltigen) Erhöhung oder Verringerung der Boden- bzw. Standortfruchtbarkeit sowie des Ertrags führen können (engl. soil amelioration bzw. soil degradation). Maßnahmen die das natürliche Ertragsvermögen des Bodens bzw. Standorts anhaltend verändern sind als Bodenverbesserung (engl. soil amendment), sowie als nachhaltige bzw. nicht-nachhaltige Intensivierung (engl. sustainable bzw. unsustainable intensification) dargestellt.

Abbildung 3 stellt in analoger Weise die möglichen Effekte von langfristig wirksamen Maßnahmen dar, die zu einer anhaltenden Erhöhung oder Verringerung der Boden- bzw. Standortfruchtbarkeit sowie des Ertrags führen können. Dabei verändert sich der entsprechende Ertrag entlang der Linie des maximalen

Ertrags und verändert damit nicht die grundlegende natürliche Beziehung zwischen Boden- bzw. Standortfruchtbarkeit und Ertrag. Maßnahmen die dagegen das natürliche Ertragsvermögen des Bodens bzw. Standorts anhaltend verändern sind als Bodenverbesserung, sowie als nachhaltige bzw. nicht-nachhaltige Intensivierung dargestellt.

## Literaturverzeichnis

GISI, U., SCHENKER, R.; SCHULIN, R.; STADELMANN, F.X.; STICHER, H.: Bodenökologie, 2. Auflage, Stuttgart, Thieme, 1979

KAHLE, H.P.: Kritische Überprüfung und Weiterentwicklung des Konzepts der forstlichen Standortproduktivität. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde, Tagungsbericht, 76-86, 2005

KÖPPEN, D.: Entwicklung und Inhalt der Kategorie „Bodenfruchtbarkeit“. Pflanzenbauwissenschaften 6 (2), 57-62, 2002

KUNDLER, P., et al.: Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 1989

MARX, K.: Das Kapital. Gesamtausgabe, Dietz Verlag, Berlin, 1962, Band 25, Buch III nach der 1. Auflage 1894.