



Dokumentation der Überarbeitung der NEK-Methode 2023

KOBO-Bericht Nr. 8

November 2023

Kompetenzzentrum Boden
BFH-HAFL
Länggasse 85 _ 3052 Zollikofen
info@ccsols.ch _ ccsols.ch

Impressum

Autor:innen: Lucie Greiner, Gunnar Petter, Armin Keller

Erscheinungsjahr: 2023

Herausgeber: Kompetenzzentrum Boden (KOBO), ccsols.ch.

Das KOBO arbeitet im Auftrag der drei Bundesämter BAFU (Bundesamt für Umwelt), BLW (Bundesamt für Landwirtschaft) und ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) und ist an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) der Berner Fachhochschule (BFH) in Zollikofen angesiedelt.

Projektleitung: Lucie Greiner und Gunnar Petter

Externe Expert:innen: Esther Bräm (Boden und Biotope), Franca Ciocco (Plantahof), Olivier Heller (Agroscope), Peter Schwab (ehem. NABO), Peter Weisskopf (ehem. Agroscope), Martin Zürner (myx GmbH)

Begleitgruppe: Nicolas Ballesteros (ARE), Andreas Chervet (Kanton BE), François Füllemann (Kanton VD), Petra Hellemann (BLW), Annelie Holzkämper (Agroscope), Aline Loher (Kanton SG), Daniela Marugg (RevKLABS/KA), Anina Schmidhauser (RevKLABS/KA), Cécile Wanner (Kanton ZH), Marina Wendling (FIBL) und die interdepartementale Arbeitsgruppe Fruchtfolgeflächen (IDA FFF).

Empfohlene Zitierweise: Greiner L., Petter G. und A. Keller (2023): Aktualisierung der Beurteilungsmethode für die Nutzungseignungsklassen. NEK-Methode Version 2023. Kompetenzzentrum Boden KOBO. BFH-HAFL. CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter www.ccsols.ch und www.boden-methoden.ch

Hinweis: Für den Inhalt sind alleine die Autor:innen verantwortlich.

Copyright: Gemäss untenstehendem Creative Commons-Lizenzsymbol ist die nicht-kommerzielle Vervielfältigung erwünscht, jedoch mit Quellenangabe und einem Belegexemplar an den Herausgeber. Die Weitergabe erfolgt nur unter gleichen Lizenzbedingungen.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Daten und Methoden	5
	2.1 Nutzungseignungsklassen (NEK)	5
	2.2 Ausgangslage	7
	2.3 Aktualisierung der NEK-Methode – Datengrundlagen	8
	2.4 Aktualisierung der NEK-Methode – Methodisches Vorgehen	13
3	Resultate und Diskussion	15
	3.1 Schritt 1: Vergleich NEK-FAL und NEK-ZH	15
	3.2 Schritt 2: Plausibilisierung NEK-FAL und NEK-ZH	16
	3.3 Schritt 3: Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH	18
	3.4 Schritt 4: Zusammenführen der NEK-FAL und NEK-ZH	19
	3.5 Schritt 5: Vergleich der aktualisierten NEK-Methode mit bisherigen NEK-Versionen	27
	3.6 Schritt 6: Plausibilität der aktualisierten NEK-Methode	28
4	Fazit und Ausblick	30
5	Abbildungsverzeichnis	31
6	Tabellenverzeichnis	32
7	Literaturverzeichnis	34
8	Anhang	37

1 Einleitung

Die Methode der Nutzungseignungsklassen (NEK-Methode) beurteilt die Eignung eines Standorts für die Nutzung im Hinblick auf den Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen. Im Wesentlichen wird die Eignung eines Standortes für die landwirtschaftliche Nutzung von drei Faktoren beeinflusst: Klima, Boden und Terrain. Das Klima bestimmt die Länge der Vegetationsperiode sowie die Temperatur- und Niederschlagsverteilung, und damit ob und welche Kulturen sich potenziell für den Anbau eignen. Die physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften beeinflussen die Nährstoffverfügbarkeit und den Wasser- und Lufthaushalt. Suboptimale Bodeneigenschaften wie eine geringe Gründigkeit, Staunässe oder eine geringe Wasserspeicherfähigkeit können die landwirtschaftliche Nutzung einschränken. Terraineigenschaften wie die Hangneigung wiederum bestimmen, ob ein Standort mit landwirtschaftlichen Maschinen befahrbar ist, welche (maschinellen) Bodenbearbeitungsmethoden geeignet sind und wie hoch das Erosionsrisiko ist. In Kombination lässt sich aus den Faktoren Klima, Boden und Relief die landwirtschaftliche Nutzungseignung eines Standortes ableiten.

Mit der Kartieranleitung für Landwirtschaftsböden von 1997 wurde von der damaligen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL, heute Agroscope) eine Methode zur Beurteilung der Eignung landwirtschaftlicher Standorte für verschiedene Kulturen eingeführt (Brunner et al. 1997). Diese Methode leitet Nutzungseignungsklassen (NEK) auf Basis des am stärksten die Nutzung limitierenden Faktors (Boden, Klima, Terrain) her. Später wurde die Beurteilungsmethode der FAL im Rahmen der kantonalen Bodenkartierung im Kanton Zürich überarbeitet (Jäggli et al. 1998). In Bezug auf die verwendeten Eingangsgrößen und auf die Methodik im Allgemeinen entsprechen die beiden NEK-Methoden anderen internationalen Methoden zur Bewertung der landwirtschaftlichen Nutzungseignungen eines Standortes (Bibby et al. 1991; Storie 1978; Klingebiel and Montgomery 1961; Lynn et al. 2009; Moebius-Clune et al. 2017; Bock et al. 2018; Mueller et al. 2007; Environment Canada 1972; O'Geen et al. 2008). Solche Beurteilungsmethoden zur landwirtschaftlichen Nutzungseignung gibt es international seit rund 90 Jahren. Einige Länder überarbeiten die Beurteilungsmethode periodisch.

Verwendet werden die beiden Schweizer NEK-Methoden heute - vornehmlich in der Deutschschweiz - in Fragen der Kompensation, Beratung und der Beurteilung von Rekultivierungen (Wendling 2022). Über die Jahre wurden dabei in der Praxis immer wieder Inkonsistenzen in den beiden NEK-Methoden festgestellt. Insbesondere konnten die Anwender:innen je nach Vorgehen anhand der zahlreichen Bewertungstabellen zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen (Schwab und Günther 2016). Auf nationaler Ebene war nach Aufhebung des nationalen Kartierdienstes an der FAL im Jahr 1997 keine Institution mehr zuständig für die Aktualisierung und Pflege der NEK-Methode. Vorhandene Inkonsistenzen, subjektive Ermessensspielräume und Fehler in der Beurteilungsmethode blieben deshalb bestehen. Praxiserfahrungen, neu verfügbare Daten und neue technische Möglichkeiten wurden nicht für alle zugänglich in die bestehenden NEK-Methoden integriert, wie dies international beispielsweise bei ähnlichen Beurteilungssystemen wie dem Storie Index (O'Geen et al. 2008), dem neuseeländischen System (Lynn et al. 2009), dem Cornell Soil Health Assessment (Moebius-Clune et al. 2017) und dem kanadischen System (Bock et al. 2018) realisiert wurde.

Mit dem Aufbau des Kompetenzzentrums Boden KOBO (www.ccsols.ch) und dem Projekt «Revision der Beschreibung und Klassifikation der Böden (KLABS) und der Kartieranleitung» (www.boden-methoden.ch) wurde im Auftrag der Bundesämter BAFU, BLW und ARE die Überarbeitung und Aktualisierung der NEK-Methode zunächst im Rahmen eines Workshops geprüft. Die Workshopteilnehmer:innen (16 Vertreter:innen von den Kantonen, vom Bund, Ingenieurbüros, Forschung und KOBO) bestätigten den grossen Bedarf nach einer Überarbeitung und Weiterentwicklung der Methode zur Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung. Eine schweizweite Anwendbarkeit einer künftigen aktualisierten Beurteilungsmethode der landwirtschaftlichen Nutzungseignung wurde als sehr wichtig erachtet.

Ausserdem wurde eine Verbesserung der empirischen Basis der Beurteilungsmethode gewünscht, sowie eine Beseitigung von Inkonsistenzen bei der Anwendung der Methode und eine bessere Dokumentation der Ziele.

Der vorliegende Bericht zeigt auf, wie die NEK-Methode basierend auf den beiden bestehenden NEK-Methoden, deren heutigem Stand der Anwendung in der Praxis, auf Expertenwissen und auf heute verfügbaren Boden- und Landnutzungsdaten plausibilisiert und zur NEK-Methode Version 2023 aktualisiert wurde. Die Anleitung zur Anwendung NEK-Methode 2023 ist ein separates Dokument in der Testversion (Greiner et al. 2023), wird voraussichtlich in den nächsten Jahren noch weiterentwickelt und anschliessend im Kontext der revidierten Kartieranleitung veröffentlicht.

2 Daten und Methoden

2.1 Nutzungseignungsklassen (NEK)

Die landwirtschaftliche Nutzungseignung in der Schweiz wird anhand von 10 Nutzungseignungsklassen (NEK) bewertet (Tabelle 1). Die vorliegende aktualisierte NEK-Methode (Version 2023) geht - wie auch die bisherigen NEK-Methoden - von der nachhaltigen Nutzung als Idealvorstellung aus, bei welcher mit geringstmöglichem Aufwand stetig hohe Erträge mit möglichst geringer Umweltbelastung erzielt werden (Brunner et al. 1997). Entsprechend steht eine langfristige Perspektive im Fokus der Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung eines Standorts. Das bedeutet, dass jede aus der NEK-Methode resultierende Nutzungseignungsklassen angibt, für welche landwirtschaftliche Nutzung sich ein Standort längerfristig (nachhaltig) eignet.

Die NEK wird durch den Faktor bestimmt, welcher die landwirtschaftliche Nutzungseignung am stärksten limitiert (Brunner et al. 1997; Jäggli et al. 1998). Limitierende Faktoren können neben Klima und Terrain fünf Bodeneigenschaften sein, nämlich der Wasserhaushalt, der Skelettgehalt, die Textur, der Humus und der pH. Es können auch Kombinationen verschiedener Grössen im Zusammenspiel limitierend sein.

Tabelle 1. Auflistung der Nutzungseignungsklassen der NEK-Methode 2023 inklusive der Bewertungskriterien. Die Beschreibung basiert auf den Beschreibungen der NEK nach FAL und Kanton Zürich (Brunner et al. 1997; Jäggi et al. 1998) und wurde überarbeitet durch P. Schwab und O. Heller (2022) und anschliessend weiter angepasst durch die Autor:innen. Weil in NEK 1 und 2 alle Kulturen angebaut werden können, wird bei den Bewertungskriterien nicht zwischen den Kulturen unterschieden. Bei NEK 3-6 unterscheiden sich die Beurteilungen zwischen den Kulturen. Da Ackerbau in NEK 7- 9 nicht vorgesehen ist, wird hier nur der Futterbau beurteilt. Die Beurteilung erfolgt über alle NEK in fünf Klassen (++ = sehr gut, (+) = gut bis sehr gut, + = gut, (+) = mittel bis gut, 0 = mittel, - = schlecht, -- = sehr schlecht). Es gibt kein starres Vorgehen, wie die Gesamteinschätzung aus der nachhaltigen Nutzung und Anbaubreite, dem Ertragsvermögen, der Ertragssicherheit und den Bewirtschaftungsbedingungen hergeleitet wird.

Nutzungs- eignungs- klasse (NEK)	Bezeichnung der NEK	Beschreibung der NEK	Nachhaltige Nutzung und Anbaubreite	Gesamt- einschätzung	Ertragsvermögen	Ertragssicherheit	Bewirtschaftungs- bedingungen
NEK 1	Uneingeschränkte Fruchtfolge	Standort mit besten Eigenschaften, uneingeschränkte Kulturwahl	Alle Kulturen	++	++	++	++
NEK 2	Leicht eingeschränkte Fruchtfolge	Standort mit guten bis sehr guten Eigenschaften, uneingeschränkte Kulturwahl mit etwas geringerer Ertragssicherheit und leicht erschwerten Bewirtschaftungsbedingungen	Alle Kulturen	(++)	++	+	+
NEK 3	Getreidebetonte Fruchtfolge	Standort mit guten Eigenschaften, Ertragssicherheit in klimatischen Extremjahren teilweise etwas eingeschränkt, erschwerte Anbaubedingungen für den Hackfruchtanbau	Ackerbau allgemein	+	+	+	+
			Futterbau allgemein	+	+	(+)	+
			Getreidebau	+	+	+	+
			Hackfruchtanbau	0	+	0	0
NEK 4	Getreidebetonte Fruchtfolge mit geringer Ertragssicherheit	Standort mit Eigenschaften, die deutliche Ertrags- oder Nutzungseinschränkungen verursachen, Getreidebau bevorzugt	Ackerbau allgemein	0	0	0	0
			Futterbau allgemein	0	0	0	+
			Getreidebau	0	0	0	0
			Hackfruchtanbau	-	-	-	-
NEK 5	Futterbaubetonte Fruchtfolge	Standort mit guten ertragsbildenden Eigenschaften, jedoch mit Einschränkungen für die Bewirtschaftung, Futterbau bevorzugt	Ackerbau allgemein	-	+	+	-
			Futterbau allgemein	+	+	+	0
			Getreidebau	0	+	+	-
			Hackfruchtanbau	--	+	+	--
NEK 6	Eingeschränkte, futterbaubetonte Fruchtfolge	Standort mit stark limitierenden Eigenschaften für eine ackerbauliche Nutzung, Futterbau bevorzugt	Ackerbau allgemein	--	0	0	-
			Futterbau allgemein	+	0	+	+
			Getreidebau	-	0	(+)	-
			Hackfruchtanbau	--	0	0	-
NEK 7	Vielseitiges Grünland	Standort für eine ausschliessliche futterbauliche Nutzung (Wiese, Weide) mit genügender Ertragssicherheit	Wiese	(+)	0	0	(+)
			Weide	(+)	0	0	+
NEK 8	Feuchte Mähwiesen	Standort für eine einseitige Wieslandnutzung, aufgrund Nässe nur zum Mähen geeignet	Wiese	0	0	(+)	0
			Weide	-	0	(+)	-
NEK 9	Extensives Grünland	Standort für eine extensive Wiesland- oder Weidelandnutzung	Wiese	-	-	0	(-)
			Weide	-	-	0	(-)
NEK 10	Sehr feuchtes Streuland	Standort, der ausschliesslich eine Streulandnutzung erlaubt	Wiese	--	-	-	--
			Weide	--	-	-	--

2.2 Ausgangslage

Die Mitarbeitenden der ehemaligen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL, heute Agroscope) haben zwischen 1960 und 1996 viele Böden der Schweiz, vorwiegend im Mittelland, in zahlreichen Kartierungsprojekten erfasst. Basierend auf umfassendem Praxiswissen und dem in den 1990er Jahren verfügbaren Literaturwissen wurde die erste Version der NEK-Methode von den damaligen FAL-Mitarbeitenden erarbeitet, mit den Erfahrungen im Feld überprüft, ergänzt und korrigiert. Die Methode ist als eigenständiges Kapitel in der FAL-Kartieranleitung veröffentlicht (Brunner et al. 1997). Im darauf folgenden Jahr hat der Kanton Zürich im Rahmen seiner kantonalen Bodenkartierung eine überarbeitete NEK-Methode veröffentlicht (Jäggi et al. 1998). Die beiden NEK-Methoden basieren auf ähnlichen Grundlagen, aber weichen bei der Beurteilung teilweise voneinander ab. Innerhalb beider Methoden existiert darüber hinaus ein beträchtlicher Beurteilungsspielraum (Schwab and Günter 2016). Bei der Anwendung der NEK-Methoden in der Praxis haben sich verschiedene Beurteilungsweisen bewährt, es wurden jedoch immer wieder Inkonsistenzen in den Methoden und unplausible NEK-Bewertungen festgestellt.

Vor der in diesem Bericht dokumentierten Aktualisierung der NEK-Methode (Version 2023) wurden zuerst die beiden NEK-Methoden nach FAL und nach Kanton Zürich im Rahmen zweier Aufträge durch Expert:innen dokumentiert (Zürcher et al. 2021; Schwab 2021). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden beide Methoden dabei in mehrere standardisierten Bewertungstabellen pro Boden- oder Standorteigenschaft übersetzt. Die Tabellen wurden gemäss der Praxiserfahrungen in den letzten zwanzig Jahren bei der Anwendung der Methoden angepasst, so dass sie die aktuellen Versionen der beiden NEK-Methoden darstellen. Diese aktuellsten Versionen der beiden NEK-Methoden werden im Folgenden «NEK-FAL» (Zürcher et al. 2021) und «NEK-ZH» (Schwab 2021) genannt. Die folgende Tabelle 2 stellt die limitierenden Faktoren der beiden Methoden gegenüber.

Tabelle 2. Beschrieb der Limitierungen in NEK-FAL und NEK-ZH. (Fett= Hauptsächliche Limitierung, Normal = In der Limitierungstabelle enthaltene Grössen. DD = drainiert, OB = Oberboden, pnG = pflanzennutzbare Gründigkeit, PT = mit Torfzwischen-schichten, PU = überschüttet, UB = Unterboden, VB = blockig, WHG = Wasserhaushaltsuntergruppe, ZL = labil aggregiert)

Limitierungen NEK-FAL	Limitierungen NEK-ZH
Wasserhaushalt (WHG / pnG / Geländeform / Humus OB)	Wasserhaushalt (WHG / pnG/ Untertypen I, G, R / Textur UB / Untertyp DD / Geländeform)
Skelett (Skelett OB / Untertyp VB)	Skelett (Skelett OB)
Textur (Textur OB)	Textur (Textur OB / WHG)
Stauwassergeprägte Böden (Untertyp I)	-
dauernd und wechselnd Grund- und Hangwassergeprägte Böden (Untertyp G)	-
Grund- und Hangwassergeprägte Böden (Untertyp R)	-
-	Humus (Humus OB, UB / Mächtigkeit UB / Bodentyp Moor und Halbmoor / Untertypen PT und PU)
-	pH (pH OB, UB)
-	Geländeform
-	Interaktionen (Geländeform / Hangneigung / Textur OB, UB/ WHG / Untertyp ZL)

2.3 Aktualisierung der NEK-Methode – Datengrundlagen

Die Aktualisierung der NEK-Methode erfolgte in mehreren Schritten (siehe nachfolgendes Kapitel 2.4). Die Schritte beinhalten unter anderem Plausibilisierungen und Vergleiche auf Basis umfangreicher Datensätze, welche in diesem Abschnitt näher beschrieben werden.

Bodendaten

Im nationalen Datensatz für Bodeninformationen der Servicestelle NABODAT (Version 5.1, NABODAT 2020, www.nabodat.ch) sind für rund 25'000 Standorte in der Schweiz Bodendaten frei verfügbar. Für die Bewertung der NEK ist ein minimaler Datensatz für einen Standort erforderlich. Da sich der minimale Datensatz zwischen den NEK-Methoden leicht unterscheidet, weicht auch die Anzahl der Standorte mit

ausreichenden Bodeninformationen in den Plausibilisierungen für die beiden Methoden leicht ab. Die NEK-Methode Version 2023 konnte an $n = 5'453$ Standorte bewertet werden, die NEK-FAL an $n=5'589$ und die NEK-ZH an $n=5'203$ Standorten (Tabelle 3). Es handelt sich vor allem um Standorte im Schweizer Mittelland (Abbildung 1).

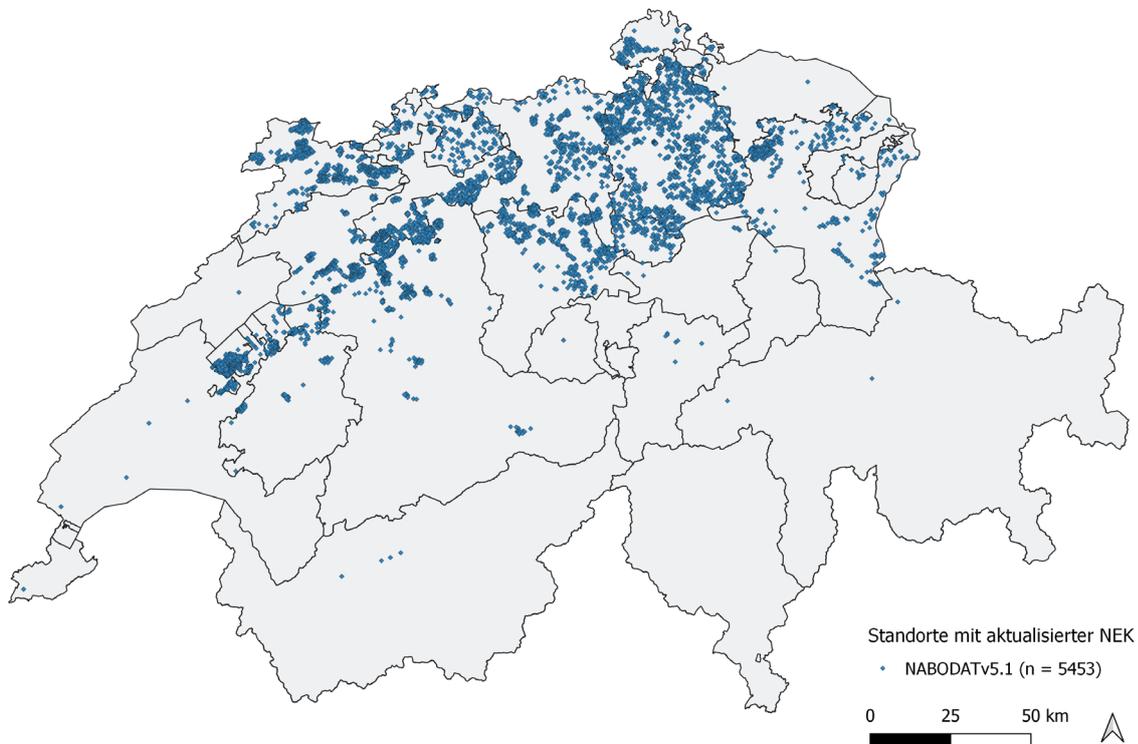


Abbildung 1. Standorte aus dem NABODAT-Datensatz (Version 5.1), für die eine Bewertung mit der aktualisierten NEK-Methode durchgeführt werden konnte ($n = 5'453$).

Über die Hälfte der Standorte (56%) liegt gemäss der Arealstatistik (Bundesamt für Statistik 2010) im Ackerland, knapp ein Fünftel (18%) auf Naturwiesen, 8% auf Heimweiden und 5% im Wald. Die verbleibenden 13% der Standorte sind über 47 Klassen der Arealstatistik verteilt. Passend zur vornehmlich ackerbaulichen Nutzung sind die meisten Böden im Datensatz Braunerden (47%), gefolgt von Kalkbraunerden (13%) und Parabraunerden (10%). Saure Braunerden und Braunerde-Gleye sind mit je 6-7% seltener. Im Bodendatensatz sind auch stauwasser-, grund- und hangwassergeprägte Böden vertreten, bis hin zu Halbmooren, Mooren und Auenböden (insgesamt 11%). Ferner waren in der Stichprobe 4% Regosole und Fluvisole vertreten. Weiter sind vereinzelt Auffüllungen und auch Rendzinen vorhanden. Die Bodeneigenschafts-, Klima- und Höhenlagenverteilung spiegelt den Ackerland- und Mittellandschwerpunkt des Bodendatensatzes wider (Tabelle 4).

Tabelle 3. Anzahl (n) der mit den jeweiligen NEK-Methoden bewertbaren Standorte von den insgesamt über 25'000 Standorten des Bodendatensatzes (NABODAT 2020). Die NEK-Methoden benötigen unterschiedliche minimale Datensätze, die nicht an allen zwischen 1960 und 2018 erfasst Standorten vorliegen. In den Fällen, in denen mehrere Methoden aufgeführt sind, gibt n die Anzahl der mit allen Methoden gleichzeitig bewertbaren Standorte an.

Standorte aus dem Bodendatensatz mit	n
Aktualisierter NEK	5453
NEK-ZH	5203
NEK-FAL	5598
Aktualisierter NEK und NEK-FAL	3241
Aktualisierter NEK und NEK-ZH	5005
NEK-FAL und NEK-ZH	3024
Aktualisierter NEK, NEK-FAL und NEK-ZH	2906

Tabelle 4. Überblick zu Boden- und Standorteigenschaften der 5453 mit der NEK-Methode Version 2023 bewertbaren NABODAT-Profile. Die Bodeneigenschaften (OB = Oberboden) sind dem Bodendatensatz entnommen, die Höhe stammt aus dem SwissAlti3D-Datensatz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021), Temperatur und Niederschlag aus den Daten von MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz 2019).

Eigenschaft	Minimum	Q1	Median	Mittelwert	Q3	Maximum
Ton OB (%)	2.3	17.3	22	24.4	29.4	79.89
Schluff OB (%)	3.74	28.5	33.6	34.9	40	79
Skelett OB (%)	0	1	4	5.9	9	50
pH OB	3.5	5.6	6.2	6.2	6.9	8.5
Humus OB (%)	0.6	2.9	3.8	4.1	5	45.8
Höhe über Meer (m)	259	448	505	539	593	1178
Mittlerer jährlicher Niederschlag (1981–2010, mm)	541	1056	1134	1167	1209	2129
Mittlere jährliche Temperatur (1981–2010, °Celsius)	0.2	8.7	9.0	8.9	9.4	10.7

Plausibilisierungsdaten

Eine NEK-Bewertung kann als Vorschlag für eine an einem Standort mögliche Nutzungsform und Kulturwahl interpretiert werden. Die tatsächliche Nutzung weicht von der Nutzungseignung aus der NEK-Bewertung ab. Für die tatsächliche Nutzung sind in der Praxis neben Klima, Boden und Terrain weitere Faktoren relevant, beispielsweise der Betriebstyp oder betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen. Ein Standort mit einer guten NEK kann daher temporär oder permanent auch als Grasland genutzt werden, ebenso kann an einem schlechteren Standort durchaus temporär eine intensivere Nutzung erfolgen. Wenn man allerdings auf einer grossen Anzahl an Standorten die tatsächliche Nutzung mit der NEK-Bewertung

vergleicht, dann sollten eindeutige Zusammenhänge zwischen einer intensiven Nutzung und guten NEK-Bewertungen feststellbar sein. Zur Plausibilisierung der NEK-Methode Version 2023 anhand dieser Zusammenhänge wurden vier räumliche Datensätze ausgewählt, welche eine Einschätzung der Nutzungsintensität erlauben oder die landwirtschaftliche Nutzung abbilden. Es wurden Datensätze ausgesucht, welche eine grosse räumliche Abdeckung haben oder die landwirtschaftliche Nutzung über einen gewissen Zeitraum abbilden (siehe Tabelle 4 und die folgenden Absätze für einen Überblick über die vier Datensätze). Durch die räumliche Verschneidung dieser Datensätze mit den Bodendaten (siehe oben) lassen sich die NEK-Bewertungen mit den in den jeweiligen Datensätzen enthaltenen Einschätzungen der Nutzungsintensität bzw. landwirtschaftliche Nutzung vergleichen.

Tabelle 5. Überblick der Datensätze zur Plausibilisierung der NEK-Methoden anhand der Nutzungsintensität bzw. der landwirtschaftlichen Nutzung an den jeweiligen Standorten. Die ersten drei Datensätze liegen landesweit vor, der vierte Datensatz für den Kanton Zürich. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung unterscheidet sich die Anzahl der Standorte, für die die NEK bewertbar ist und gleichzeitig innerhalb der Perimeter der Datensätze liegt. Die Plausibilisierungen wurde für alle NEK-Methoden (NEK-FAL, NEK-ZH, aktualisierte NEK Version 2023) durchgeführt, als Anhaltspunkt wurde hier die Anzahl der Standorte, die in den Analysen verwendet wurden, für die aktualisierte NEK Version 2023 dargestellt.

Name	Anzahl Standorte mit aktualisierter NEK und Plausibilisierungsdaten	Auflösung/ Art/ Geltungsbereich	Zeitraum	Quelle
Acker-, Grasland CH	4973	10x10 Meter Raster Schweiz	2017-2019	Pazúr et al. (2021)
Crop Intensity Index CH	5453	30x30m Raster Schweiz	2000-2010	Stumpf (2021)
Landwirtschaftliche Nutzfläche CH	2694	Parzellen Schweiz	2021	Geoinformations- und Katasterstellen der Kantone (2022)
Landwirtschaftliche Nutzfläche ZH	1385	Parzellen Kanton Zürich	2014-2022	Amt für Landschaft und Natur, Abteilung Landwirtschaft, Kanton Zürich (2022)

Acker-, Grasland

Eine Ableitung der Sentinel 2-Fernerkundungsdaten von 2017-2019 von Pazúr et al. (2021) klassiert Flächen in Ackerland, Grasland und verbuschte Gebiete. Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL stellt auf ihrer Plattform (www.envidat.ch) Datensätze aus ihrer Forschung zur Verfügung, unter anderem die Karten zur Auswertung von Pazúr et al. (2021).

Crop Intensity Index

Eine Ableitung der Landsat-Fernerkundungsdaten für die Zeitperiode 1985- 2021 beschreibt über die Häufigkeit der von Vegetation unbedeckten Fläche die Intensität der Nutzung in Form eines «Crop Intensity Index». Diese Ableitung wurde durch das Kompetenzzentrum Boden vorgenommen (Stumpf 2021).

Landwirtschaftliche Nutzfläche CH

Der Polygondatensatz zur landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz beinhaltet die Hauptkultur des Jahres 2021 pro Parzelle. Als Hauptkultur gilt nach KIP-Richtlinie «*diejenige Kultur, welche die Parzelle während der Vegetationszeit am längsten belegt*» (Koordinationsgruppe Richtlinien Tessin und Deutschschweiz 2021). Die Kulturen wurden für die Plausibilisierung entsprechend dem Projekt des Kantons Zürich 2021 zur Analyse der Fruchtfolgeflächen und der NEK mit Blick auf die Nutzungsintensität klassiert (Celio 2021), siehe Tabelle 5. Auf geodienst.ch sind diese Daten seit 2021 schweizweit pro Kanton aufgelistet und verlinkt oder auf Anfrage verfügbar.

Landwirtschaftliche Nutzfläche ZH

Der Datensatz zur landwirtschaftlichen Nutzfläche im Kanton Zürich ist ein Polygondatensatz mit Angabe der Hauptkulturen pro Parzelle für die Jahre 2014-2022. Die Daten wurden entsprechend dem Projekt des Kantons Zürich zur Analyse der Fruchtfolgeflächen und der NEK klassiert (Celio 2021), siehe Tabelle 5. Der Kanton Zürich stellte diesen Datensatz für die Aktualisierung der NEK-Methode zur Verfügung (Amt für Landschaft und Natur, Abteilung Landwirtschaft, Kanton Zürich 2022).

Tabelle 6. Zusammenstellung der Hauptkulturen in Kulturgruppen nach Celio (2021).

Kulturgruppen für NEK-Plausibilisierung	Kultur	Kultur-ID Bundesamt für Landwirtschaft
Hackfrüchte	Mais, Zuckerrüben, Futterrüben, Kartoffeln, Pflanzkartoffeln, Ölkürbisse, Tabak, Freilandgemüse, Treibzichorie, Beeren, gärtnerische Freilandkultur	508, 519, 521, 522, 523, 524, 525, 539, 541, 545, 546, 547, 551, 554
Getreide	Übriges aus Ackerfläche (BLW-Nr. 500), ohne: Ackerschonstreifen, Buntbrache, Rotationsbrache, Saum auf Ackerfläche, Blühstreifen, übrige offene Ackerfläche	500, 599, 1
Kunstwiese	Kunstwiesen	601, 602
Mähwiese	Diverse Wiesen	611, 612, 613, 621, 622
Weide	Diverse Weiden	616, 617, 618
Dauerkultur	Alles aus Flächen mit Dauerkulturen	700, 799, 1
Übriges	Rest (ohne Bäume)	

Für die Plausibilisierung ebenfalls in Betracht gezogen wurden Standorte der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO), für welche jährlich Bewirtschaftungsdaten erhoben werden und die jeweils aktuelle Nutzung und Kulturen auf den Standorten über drei Jahrzehnte bekannt ist (n = 46 NABO-Flux-

Standorte, Gross et al. 2021). Vorgängige Auswertungen haben allerdings gezeigt, dass die Stichprobe für die Plausibilisierung der NEK-Bewertung zu gering ist.

2.4 Aktualisierung der NEK-Methode – Methodisches Vorgehen

Das grundsätzliche Vorgehen zur Aktualisierung der NEK-Methode ist in Abbildung 2 skizziert. In einem ersten Schritt wurde der NABODAT-Datensatz (Version 5.1) verwendet, um für jeden Standort die NEK-FAL und die NEK-ZH zu berechnen und zu vergleichen. Im zweiten Schritt wurden die berechneten NEK der beiden Methoden zur Plausibilisierung jeweils den tatsächlichen Nutzungen bzw. Nutzungsintensitäten gegenübergestellt. Auf Basis der Analysen der ersten zwei Schritte wurden in einem dritten Schritt die NEK-Methoden vereinfacht. Dazu wurde die Bedeutung der in den Methoden enthaltenen limitierenden Faktoren analysiert und Faktoren, die auf die Berechnungsergebnisse nur wenig oder gar keinen Einfluss hatten, entfernt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden die Methoden NEK-FAL und NEK-ZH in einem vierten Schritt unter Einbezug einer Expertenabsprache zu einer aktualisierten Methode (NEK-Methode Version 2023) zusammengeführt. Die aktualisierte NEK-Methode wurde wiederum in Schritt fünf und sechs mit den vorhandenen Datensätzen auf Unterschiede zur NEK-FAL und NEK-ZH hin analysiert und ebenfalls plausibilisiert. Nachfolgend werden die methodischen Details für die sechs Arbeitsschritte beschrieben.



Abbildung 2. Vorgehensweise zur Aktualisierung der NEK-Methode (Version 2023). Zunächst wurden die existierenden NEK-Methoden (NEK-FAL, NEK-ZH) miteinander verglichen, anhand von Daten zur Nutzung bzw. Nutzungsintensität plausibilisiert und vereinfacht. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden die beiden NEK-Methoden zu einer aktualisierten NEK-Methode Version 2023 zusammengeführt, mit der NEK-FAL und NEK-ZH verglichen und ebenfalls plausibilisiert.

Schritt 1: Vergleich NEK-FAL und NEK-ZH

Die Methoden der NEK-FAL und NEK-ZH wurden auf den NABODAT-Datensatz angewendet und anschliessend wurden die Bewertungen verglichen. Der Vergleich der Bewertungen wurde über Heatmaps dargestellt (siehe Erklärung in Abbildung 3) und mittels Trefferquote, Gerrity Skill Score und Bias je NEK evaluiert, wobei die Berechnung der Scores mittels R-Package "verification" (NCAR 2015) vorgenommen wurde.

Die Trefferquote gibt an, wie hoch der relative Anteil der gleich bewerteten Standorte ist. Zur Herleitung der Trefferquote wird die Anzahl der Standorte mit übereinstimmender NEK durch die Gesamtanzahl der bewerteten Standorte geteilt. Eine Trefferquote von 1 würde einer totalen Übereinstimmung der beiden NEK-Varianten entsprechen. Der Gerrity Skill Score (kurz Gerrity Score) berücksichtigt zusätzlich zur Trefferquote auch die Verteilung der Klassen. Beispielsweise sind im NABODAT-Datensatz die Klassen NEK 1 und NEK 2 sehr häufig vertreten und NEK 8 oder NEK 10 eher selten. Die Trefferquote würde in diesem Fall auch dann hoch sein, wenn nur die häufigen Klassen übereinstimmen und die seltenen Klassen nicht. Der Gerrity Score hingegen berücksichtigt eine ungleichmässige Häufigkeitsverteilung der Klassen, indem er seltenere Klassen höher gewichtet. Er wäre im vorliegenden Fall dementsprechend niedriger und kann daher als wichtiger Indikator zusätzlich zur Trefferquote verstanden werden. Bei einem Gerrity

Score von 1 ist die Übereinstimmung der NEK-Varianten für die betrachteten Standorte perfekt. Ist der Gerrity Score bei 0, ist die Übereinstimmung der NEK-Varianten nicht besser als bei einer zufälligen oder konstant gleichen NEK-Vergabe. Die Berechnung des Gerrity Scores ist nicht trivial. Neben Trefferquote und Gerrity Score wurde für jede der 10 NEK die systematische Abweichung (Bias) zwischen den beiden Methoden berechnet. Für die Berechnung des Bias wird die Anzahl der übereinstimmenden NEK plus die Anzahl der Fehlalarm-NEK durch die Anzahl der übereinstimmenden NEK und verfehlten NEK geteilt. Ist der Bias über 1 wird die betreffende NEK überschätzt, ist der Bias unter 1 wird die betreffende NEK im Verhältnis unterschätzt. Die verwendeten Definitionen der Trefferquote, des Gerrity Scores und des Bias entsprechen jenen der World Meteorological Organization (2017) und sind dort übersichtlich dokumentiert.

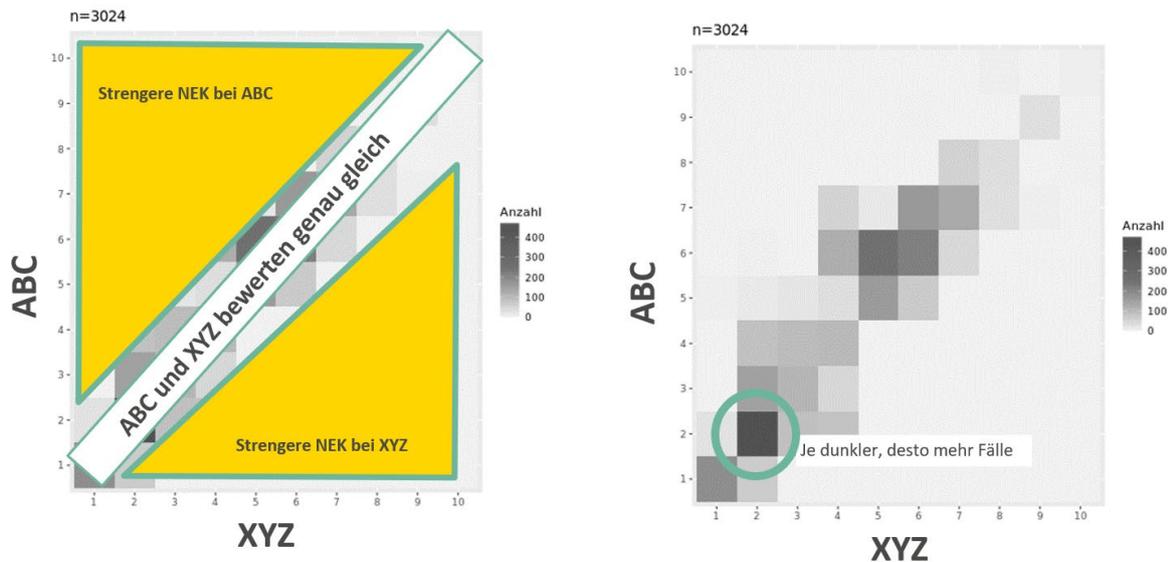


Abbildung 3. Die "Heatmap" visualisiert die Häufigkeit der NEK-Kombinationen aus zwei NEK-Methoden, wobei die NEK aus einer Methode auf der x-Achse, die NEK aus der anderen Methode auf die y-Achse aufgetragen sind und die Häufigkeit der Kombinationen farblich codiert ist. Auf der 1:1-Geraden der Grafik finden sich Standorte mit übereinstimmender NEK. Häufig gemeinsam auftretende NEK sind im Beispiel hier dunkler eingefärbt. Kombinationen, welche seltener vorkommen, sind transparenter eingefärbt. Die «Heatmap» wird als Vergleichswerkzeug zwischen zwei NEK-Varianten verwendet.

Schritt 2: Plausibilisierung NEK-FAL und NEK-ZH

Für die Plausibilisierung wurden die NABODAT-Standorte mit NEK-Bewertung und die vier in Kapitel 2.3 aufgeführten Datensätzen zur Nutzung bzw. Nutzungsintensität verwendet. Die georeferenzierten Standorte wurden mit den Nutzungsinformationen geografisch verschnitten und so die tatsächliche Nutzung und Nutzungsintensität für die NABODAT-Standorte mit NEK-Bewertung ermittelt. Für die Plausibilisierung wurden die Häufigkeiten der Kombinationen von Nutzung und NEK in Form von Histogrammen visualisiert und die entstandenen Muster besprochen. Das Augenmerk wurde dabei daraufgelegt, ob intensivere Nutzungen gehäuft zusammen mit besseren NEK vorkommen. Dies wurde als Hinweis auf die Plausibilität der betrachteten NEK-Methode gewertet.

Schritt 3: Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH

In diesem Schritt wurde die Bedeutung der einzelnen limitierenden Faktoren in den NEK-Methoden (Tabelle 2) analysiert. Dazu wurden verschiedene Varianten der NEK-FAL und NEK-ZH entworfen, in denen einzelne, in den jeweiligen NEK-Methoden enthaltene, limitierende Faktoren als auch Kombinationen verschiedener Faktoren bei der Berechnung der NEK nicht berücksichtigt wurden. Dieses Vorgehen entspricht im Grunde einer stufenweisen Vereinfachung der Bewertungsmethoden. Darüber hinaus gibt es in den beiden NEK-Methoden limitierende Faktoren, die in der jeweils anderen

Methode nicht enthalten sind. Um die Bedeutung dieser Faktoren zu analysieren, wurden ebenfalls Varianten entworfen, in denen diese Faktoren ergänzt wurden. Insgesamt ergaben sich 24 Varianten für NEK-FAL und 51 Varianten für NEK-ZH, in denen beispielsweise der Faktor Skelett oder pH nicht in die Bewertung einfließen oder der pH bei der Bewertung der NEK-FAL hinzugenommen wurde. Diese Varianten wurden mit den in Schritt 1 vorgestellten Methoden jeweils mit der Original-Variante der NEK verglichen.

Hintergrund für diesen Schritt sind die vermuteten Korrelationen verschiedener Faktoren in den NEK-Methoden. Auf diese Weise konnte die Relevanz der limitierenden Faktoren evaluiert werden.

Schritt 4: Zusammenführung der NEK-FAL und NEK-ZH

Die Vergleichs-, Plausibilisierungs- und Vereinfachungsergebnisse (Schritte 1-3) wurden zuerst in einer kleinen Expertenrunde bestehend aus KOBO-Mitarbeitenden und Experten der Bodenkartierung vorbesprochen und anschliessend an einem Workshop (August 2022) einem grösseren Publikum vorgestellt. Am Workshop nahmen Vertreter von Bundesämtern, kantonalen Fachämtern und aus der Privatwirtschaft teil (7 Vertreter aus Bundesämtern, Vertreter aus 3 Kantonen, 6 unabhängige Expert:Innen, 5 KOBO-Mitarbeitende). In dem Workshop wurde die weitere Vorgehensweise vorgeschlagen und diskutiert. Die Mehrheit der Teilnehmenden befürwortete die Zusammenführung der NEK-FAL und NEK-ZH in vereinfachter Form. Für die Zusammenführung zog das KOBO weiterhin Experten von Ingenieurbüros und der Agroscope hinzu. Die Grundsätze dabei waren, dass die aktualisierte NEK-Methode 2023 möglichst einfach anwendbar und das vorhandene Expertenwissen aus NEK-FAL und NEK-ZH möglichst vollständig verfügbar gemacht wird. Für die Zusammenführung hatte das KOBO verschiedene Varianten zusammengestellt, ausgewertet und den Experten zur Verfügung gestellt. Die Annäherungen und Kommentare der Experten wurden gesammelt und zur aktualisierten NEK-Methode Version 2023 aufbereitet.

Schritt 5: Vergleich der aktualisierten NEK-Methode mit den früheren Versionen

Die aktualisierte NEK-Methode Version 2023 wurde für alle Standorte des NABODAT-Datensatzes angewendet. Die Resultate wurden mit den Resultaten der NEK-FAL und NEK-ZH verglichen und die Differenzen analysiert (Methoden gemäss Schritt 1).

Schritt 6: Plausibilisierung der aktualisierten NEK-Methode

Im letzten Schritt wurde die aktualisierte NEK-Methode erneut hinsichtlich der berechneten NEK und den tatsächlich vorhandenen Nutzungen an den Standorten analysiert (Methoden gemäss Schritt 2).

3 Resultate und Diskussion

3.1 Schritt 1: Vergleich NEK-FAL und NEK-ZH

Auf den NABODAT-Datensatz V5.1 angewendet zeigten die NEK-FAL und die NEK-ZH grundsätzlich ähnliche Tendenzen und die NEK-Bewertung stimmte für etwa die Hälfte der 3024 mit beiden Methoden bewertbaren Profile überein (Trefferquote 0.48, Gerrity Score 0.62). Insbesondere im Bereich der NEK 2-4 als auch teilweise für den Bereich NEK 5-6 wurden jedoch für eine grössere Anzahl von Profilen Unterschiede in der Bewertung von zumeist 1-2 Klassen festgestellt (Abbildung 5). Entsprechend den unterschiedlichen Ansätzen der NEK-Methoden resultieren aus der NEK-ZH strengere Bewertungsergebnisse als aus der NEK-FAL. Beispielsweise gewichtet die NEK-FAL den Getreideproduktionsaspekt stärker. Böden, die mit der Methode der NEK-ZH als NEK 5 «Eingeschränkte, futterbaubetonte Fruchtfolge» beurteilt werden, werden in der NEK-FAL mit NEK 4 «Getreidebetonte Fruchtfolge mit geringer Ertragssicherheit» bewertet. Entsprechend sind die systematischen Unterschiede

(Bias) bei diesen Klassen hoch (1.56, 1.42, siehe Tabelle 10). Auffallend ist ebenso die breite Streuung der NEK-ZH von NEK 2 bis 7 für die nach der NEK-FAL bewertete NEK 4. Ebenfalls stark unterscheiden sich die Klassen bei der Vergabe der NEK 8. Die NEK-ZH unterschätzt die NEK 8 im Vergleich zur NEK-FAL massiv (Bias von 0.24). Die NEK-ZH beurteilt den Wasserhaushalt strenger, die Methode der NEK-FAL limitiert die landwirtschaftliche Nutzungseignung stärker mit der Textur. Im Durchschnitt beurteilt die NEK-ZH die landwirtschaftliche Nutzungseignung strenger als die NEK-FAL. Für rund 35% der Standorte ist die NEK-ZH strenger, für knapp 15% ist die Beurteilung nach NEK-FAL strenger. In knapp 38% der Fälle unterscheiden sich die NEK zwischen beiden Methoden für die NABODAT-Standorte um eine Klasse, mehr als zwei Klassen weichen die NEK sehr selten ab (<3%).

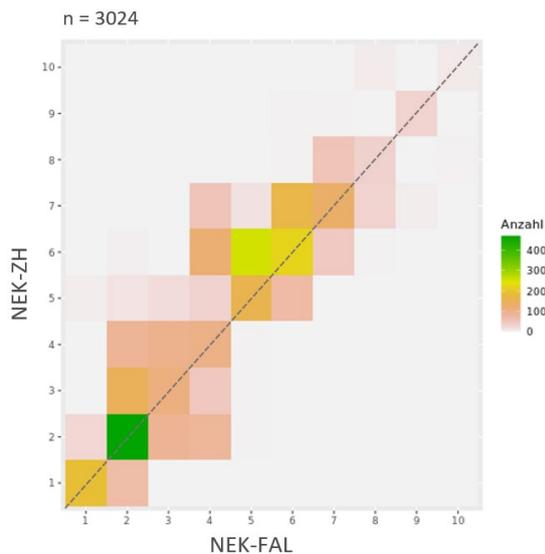


Abbildung 4. Vergleich NEK-FAL und NEK-ZH für den NABODAT-Bodendatensatz V5.1 (n= 3024 Profile als Schnittmenge für beide Bewertungsmethoden). Siehe Abbildung 3 für Hinweise zur Interpretation dieser Abbildung.

3.2 Schritt 2: Plausibilisierung NEK-FAL und NEK-ZH

Bei der Plausibilisierung auf Basis der tatsächlichen Nutzung bzw. Nutzungsintensität erscheinen die NEK-FAL- wie auch die NEK-ZH-Methode gleichermaßen plausibel (Abbildung 6 für NEK-FAL und Abbildung 7 für NEK-ZH). Mit steigender NEK, d.h. mit zunehmender Limitierung, steigt im Mittel auch der Anteil der Standorte, die als Grasland genutzt werden (Abbildung 6a-b und 7a-b). Der Vergleich mit langjährigen Daten aus der Fernerkundung (Crop Intensity Index) zeigt eine ähnliche Tendenz, mit steigender NEK werden die Standorte weniger intensiv ackerbaulich genutzt (Abbildung 6c-d und 7c-d). Diese Trends zu einer Abnahme der Nutzungsintensität sind bei der NEK-FAL etwas eindeutiger, hier weichen nur die NEK 8-10 etwas ab (Abbildung 6a/c). Für diese NEK ist die Stichprobe allerdings sehr klein und somit nicht repräsentativ, dies muss bei der Interpretation berücksichtigt werden (Abbildung 6b/d).

Bei der NEK-ZH weicht insbesondere die NEK 4 von dem allgemeinen Trend ab, d.h. die mit NEK 4 bewerteten Standorte werden intensiver genutzt als die mit NEK 2-3 bewerteten Standorte (Abbildung 7a/c). Insgesamt betrachtet werden alle NEK teilweise sowohl als Acker- und Grasland benutzt. Bei den gut ackerbaulich nutzbaren NEK 1-4 könnte dies vorwiegend an der Zwischennutzung dieser Flächen als Grasland liegen. Bei diesen Standorten als auch bei den mit NEK 6-10 bewerteten Standorten, die teilweise ackerbaulich genutzt werden, dürften die agrarökonomische Rahmenbedingungen auf Betriebsebene ebenfalls eine Rolle spielen. Je nach Betriebsausrichtung ist beispielsweise ein gemischter Milchviehbetrieb darauf angewiesen für den Winter genügend Futtermais anzubauen, obwohl die Standortfaktoren gemäss den NEK-Methoden keine Eignung für Mais ausweisen. In diesem Beispiel kommt die oben genannte

Diskrepanz zwischen einer nachhaltigen und langfristigen Nutzung und einer kurzfristigen Nutzung zum Ausdruck.

Die Plausibilisierung für die Nutzung der Standorte auf Stufe von Kulturgruppen zeigt sowohl für die Methode der NEK-FAL (Abbildung 6e-f) als auch für die NEK-ZH (Abbildung 7e-f) ein plausibles Bild. Ausgenommen hiervon sind wiederum die Klassen NEK 8 bis 10, für die zu wenig Beobachtungen vorliegen. Getreide- und Hackfruchtanbau ist auf den besseren NEK 1 bis 4 deutlich häufiger. Dies konnte festgestellt werden sowohl für den Datensatz zur Nutzung für die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz (verfügbar für 1 Jahr), als auch für die landwirtschaftliche Nutzfläche im Kanton Zürich über 9 Jahre hinweg (siehe Abbildung 6g-h und Abbildung 7g-h). Der Vergleich zeigt zudem, dass für die Klassen NEK 5 bis 7 für rund 20-30% der Standorte offensichtlich betriebswirtschaftliche Gründe zu einem Anbau von Getreide und Hackfrüchten führen, obwohl die Standortfaktoren eine futterbaulich betonte Fruchtfolge empfehlen würden.

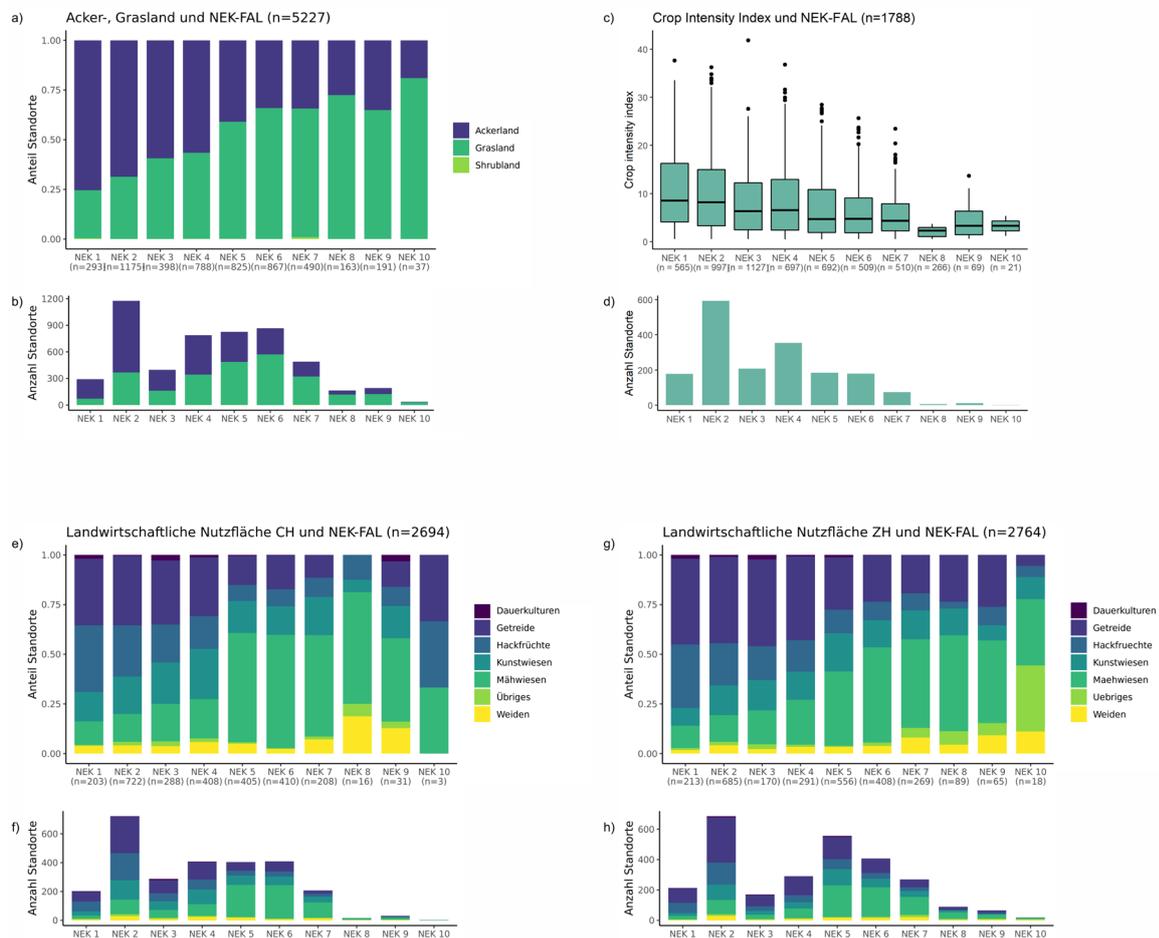


Abbildung 5. Plausibilisierung der NEK-FAL anhand der Nutzung (nach Hauptnutzungen Acker- und Grasland und nach Kulturgruppen für unterschiedlich verfügbare Datensätze. Der Crop Intensity Index – abgeleitet aus der Fernerkundung – beschreibt wie häufig Kulturen auf dem Standort wechseln).

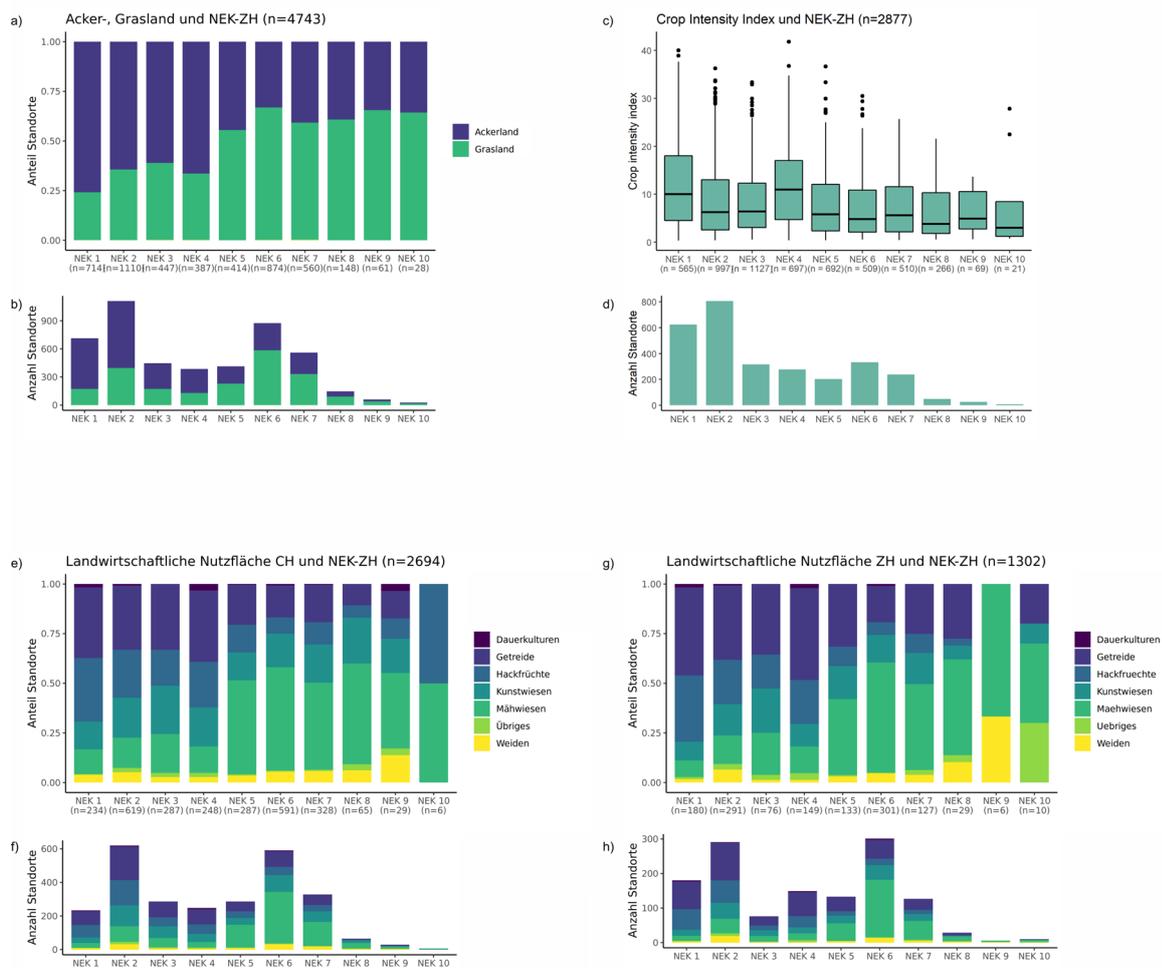


Abbildung 6. Plausibilisierung der NEK-ZH anhand der Nutzung (nach Hauptnutzungen Acker- und Grasland und nach Kulturgruppen für unterschiedlich verfügbare Datensätze. Der Crop Intensity Index – abgeleitet aus der Fernerkundung – beschreibt wie häufig Kulturen auf dem Standort wechseln).

3.3 Schritt 3: Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH

Der Vergleich der zahlreichen Varianten für beide NEK-Methoden mit den Originalmethoden hat deutlich aufgezeigt, dass viele limitierende Faktoren die NEK-Bewertungen an den über 3'000 für diese Analysen berücksichtigten Profile nur wenig beeinflussen (siehe Tabellen 11 und 12 im Anhang). Die Trefferquoten und Gerrity Scores lagen in vielen Fällen über einem Wert von 0.95. Dies legt nahe, dass sowohl bei der NEK-FAL als auch bei der NEK-ZH mehrere limitierende Faktoren in der Bewertung stark korreliert sind und die Bewertungsmethoden aus rein rechnerischer Sicht vereinfacht werden können. Geringe Trefferquoten und Gerrity Scores wurden besonders in den Fällen festgestellt, in denen die Faktoren Textur und Wasserhaushalt nicht berücksichtigt wurden, was die Bedeutung dieser beiden Faktoren untermauerte. Diese beiden Standortfaktoren sind für die Bewertung der NEK essenziell. Werden sie nicht berücksichtigt, führt dies zu einer grossen Veränderung in der Beurteilung der betrachteten Standorte, auch wenn alle weiteren Standortfaktoren in Kombinationen berücksichtigt werden.

3.4 Schritt 4: Zusammenführen der NEK-FAL und NEK-ZH

Beim Zusammenführen der beiden NEK-Methoden zur aktualisierten NEK-Methode Version 2023 gab es verschiedene Herausforderungen. Eine grundsätzliche Herausforderung bestand darin, dass die ursprünglichen NEK-Methoden unterschiedliche Strukturen aufweisen und limitierende Faktoren in unterschiedlicher Weise integrieren. Die NEK-ZH enthält beispielsweise den limitierenden Faktor Humus als eigenständige Limitierungstabelle (siehe Tabelle 2). In der NEK-FAL ist der Faktor Humus hingegen implizit in der Limitierungstabelle Wasserhaushalt enthalten (Tabelle 2). Beim Zusammenführen mussten dementsprechend folgende Fragen beantwortet werden:

- Wenn eine Limitierungstabelle für einen Faktor nur in einer NEK-Methode vorhanden ist, soll diese dann in der zusammengeführten, aktualisierten Version enthalten sein?
- Wenn beiden Methoden eine Limitierungstabelle für einen Faktor enthalten, welche der beiden Tabellen soll die Grundlage für die aktualisierte NEK-Methode bilden oder wie werden die Tabellen zusammengeführt?
- Sollen weitere Faktoren, die *innerhalb* einer Limitierungstabelle vorhanden sind, auch in der aktualisierten NEK beibehalten werden (Beispiel: Die Limitierungstabelle zum Wasserhaushalt der NEK-FAL enthält die Faktoren Wasserhaushaltsuntergruppe, pflanzennutzbare Gründigkeit, Geländeform, Humus im Oberboden; siehe Tabelle 2)?
- Wenn eine Limitierungstabelle für die aktualisierte NEK erstellt wurde, stimmen die darin enthaltenen NEK-Bewertungen mit den Expertenmeinungen überein, oder müssen sie noch angepasst werden?

Vor diesem Hintergrund wurden zunächst Vorschläge durch das KOBO erarbeitet und anschliessend den Experten unterbreitet. Ihre Aufgabe bestand darin, die für die aktualisierte NEK-Methode zentralen limitierenden Faktoren zu identifizieren. Mit dem Vorgehen konnte für einige der limitierenden Faktoren und deren Bewertung eine grosse Übereinstimmung erzielt werden. In einigen Fällen blieben jedoch Differenzen in der Einschätzung der Bedeutung von limitierenden Faktoren bestehen.

Im Weiteren wurde aufbauend auf den bisherigen Arbeitsschritten und Erkenntnissen folgende Grundsätze durch das KOBO angewendet, um die restlichen Differenzen zur Zusammenführung der beiden NEK-Methoden zu bereinigen:

- Die aktualisierte NEK-Methode soll möglichst einfach nachvollziehbar sein.
- Klassifikatorische Grössen sollen nur verwendet werden, wenn sie zwingend notwendig sind.
- Experteneinschätzungen sollen bestmöglich integriert werden.
- In Fällen, in denen die Experten Limitierungen unterschiedlich einschätzen, soll im Sinne der Nachhaltigkeit der künftigen Bodennutzung jeweils die strengere NEK ausgewählt werden.

Die Anwendung dieser Grundsätze führte zur aktualisierten NEK-Methode Version 2023. In dieser Version sind in jeder Limitierungstabelle nur die Interaktion von einem limitierenden Faktor mit dem Klima enthalten. Weitere Interaktionen wurden möglichst vermieden, zwei Interaktionen wurden aber als sehr wichtig erachtet, so dass diese in separaten Tabellen für Spezialfälle in die NEK-Methode Version 2023 integriert wurden. Ein allgemeiner Überblick über alle enthaltenen Faktoren und Interaktionen ist in Tabelle 9 dargestellt. Die Relevanz, der Herleitungsprozess und die Ausgestaltung wird im Folgenden für jeden dieser limitierenden Faktoren und Interaktionen einzeln im Detail beschrieben.

Tabelle 7. Überblick und Entstehung der limitierenden Faktoren der aktualisierten NEK-Methode

Limitierende Faktoren aktualisierte NEK-Methode Version 2023	
(immer in Interaktion mit dem Klima)	Entstehung
Wasserhaushalt	Zusammenführung und Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH
Skelett	Vereinfachung NEK-FAL
Textur	Zusammenführung und Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH
Humus	Vereinfachung NEK-ZH
pH	NEK-ZH
Terrain	Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH
Spezialfälle 1) Interaktion Wasserhaushalt und Terrain 2) Interaktion Wasserhaushalt, Terrain und Textur im Unterboden	Zusammenführung und Vereinfachung NEK-FAL und NEK-ZH

Limitierung Klima

Das Pflanzenwachstum wird zu einem wesentlichen Teil vom Klima bestimmt, insbesondere von Faktoren wie der Verteilung der Niederschlagsmengen, Temperaturverläufen, Sonneneinstrahlung und Verdunstung. Eine kurze Vegetationsdauer, Dürren, Frost oder ein Wasserüberschuss im Boden können die landwirtschaftliche Nutzungseignung massgeblich limitieren (Holzkämper et al. 2015).

Die Expert:innen und das KOBO waren sich einig, dass für einen aktuellen Blick auf die landwirtschaftliche Nutzungseignung der Faktor Klima dringend mit aktuellen Klimadaten beurteilt werden müsste, und die Grundlagen dazu vorzugsweise durch Expertinnen und Experten aus dem Themenbereich Klima und Landwirtschaft erarbeitet werden sollten. Weil dieser Überarbeitungsschritt noch aussteht, wird das Klima in der aktualisierten NEK-Methode, wie auch in der NEK-FAL und der NEK-ZH, über die Klimaeignungskarte beurteilt (Jeanneret und Vautier 1977). Die 20 Klimaeignungszonen der Klimaeignungskarte werden in vier klimatische Klassen mit unterschiedlichem Limitierungsgrad gruppiert. Diese vier Klassen bestimmen aus klimatischer Sicht, ob ein Standort grundsätzlich für Acker- oder Futterbau genutzt werden kann bzw. sich in den Übergangszonen zwischen Acker- und Futterbau befindet.

Limitierung Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt der Böden ist zentral für die landwirtschaftliche Nutzungseignung. Prozesse wie die Speicherung von pflanzenverfügbarem Wasser, die Infiltration und Verdunstung von Wasser an der Oberfläche oder der Transport von Wasser in tiefere Schichten werden im Wesentlichen von der Tiefgründigkeit und der Durchlässigkeit der Böden bestimmt (Bohne 2005). Ein ausreichend gründiger und normaldurchlässiger Boden mit einer guten Bodenstruktur ist grundsätzlich eine gute pedologische Voraussetzung für eine ausreichende Versorgung der Kulturen mit Wasser.

Der Wasserhaushalt erwies sich als einer der wichtigsten Faktoren bei der NEK-Bewertung (siehe Tabelle 11 und 12). Für die Limitierung der landwirtschaftliche Nutzungseignung anhand des Wasserhaushalts wurden die NEK-FAL und die NEK-ZH zusammengeführt und vereinfacht. Dieser Prozess gestaltete sich

herausfordernd, da die Bewertung möglicher Limitierungen durch den Wasserhaushalt sehr viel Erfahrung erfordert. Deswegen entstanden verschiedene Versionen von Limitierungstabellen für den Faktor Wasserhaushalt (auf Anfrage von den Autor:innen erhältlich).

Diesen verschiedenen Versionen wurden dann durch die Experten teilweise zusammengeführt. Die resultierende Limitierungstabellen zum Wasserhaushalt enthielten - nebst der Klimadifferenzierung - die Wasserhaushaltsuntergruppe (WHG), die pflanzennutzbare Gründigkeit (pnG), die Untertypen Stauwasser geprägte Böden (I), wechselnd Grund- und Hangwasser geprägte Böden (G) und dauernd Grund- und Hangwasser geprägte Böden (R), die Geländeform, die Textur des Unterbodens, den Untertyp Drainage (DD), den Humusgehalt im Oberboden. In zusätzlichen Interaktionstabellen wurden Interaktionen weiterer Grössen (Hangneigung, Untertyp «labil aggregiert» ZL, Textur Oberboden) mit dem Wasserhaushalt aufgeführt.

Bei der Beurteilung verschiedener Fälle innerhalb dieser Limitierungstabellen gab es Differenzen zwischen NEK-FAL und NEK-ZH. In 13% der Beurteilungen wichen die beiden NEK-Methoden 2 bis 3 NEK-Klassen voneinander ab. Derartige Differenzen wurden für folgende Fälle festgestellt:

- Wasserhaushaltsuntergruppe «d», «h», «m» und «o», leichte Klimalimitierung (= Nutzungsgebiet 2)
- Wasserhaushaltsuntergruppe «i», mittlere bis starke Klimalimitierung (= Nutzungsgebiet 3 und 4)
- Wasserhaushaltsuntergruppe «v» und «x», leichte bis starke Klimalimitierung (= Nutzungsgebiete 2-4)

In diesen Fällen wurde die aktualisierte NEK-Methode unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit beurteilt, d.h. es wurde die strengste (am meisten limitierende) NEK ausgewählt.

Im letzten Schritt wurden in der aktualisierten Limitierungstabelle nur die Interaktionen der Wasserhaushaltsuntergruppe mit dem Klima beibehalten. Die Wasserhaushaltsuntergruppe ist eine taxonomische Kenngrösse aus der FAL-Kartieranleitung (Brunner et al. 1997) und kombiniert die pflanzennutzbare Gründigkeit (pnG, in sieben Klassen von extrem tiefgründig bis sehr flachgründig) mit den drei Untertypen zu Vernässungsart und -grad eines Bodens: stauwasser geprägte Böden (I), wechselnd grund- und hangwasser geprägte Böden (G) und dauernd grund- und hangwasser geprägte Böden (R). Insgesamt werden 25 Wasserhaushaltsuntergruppen (WHUG) unterschieden, die mit den Buchstaben des Alphabets (ohne den Buchstaben «j») abgekürzt werden. Die Analysen haben gezeigt, dass die weiteren Interaktionen entweder redundant sind oder die Beurteilungen nur minimal beeinflussen. Die Diskussionen und Gründe für die Nichtberücksichtigung dieser Interaktionen bzw. ihre Aufnahme als Spezialfälle sind in Tabelle 10 dargelegt.

Auch in der aktualisierten NEK-Methode wird die landwirtschaftliche Nutzungseignung für den Anbau von Kulturen als nicht eingeschränkt beurteilt in tiefgründigen bis sehr tiefgründigen Böden, die normal durchlässig oder grund- oder hangwasser beeinflusst sind (WHUG a, b und k). Je flachgründiger ein Boden ist und je häufiger eine Vernässung auftreten kann, desto stärker ist die landwirtschaftliche Nutzungseignung im Allgemeinen eingeschränkt. Es existieren allerdings einige Ausnahmen. So wird beispielsweise flachgründigen Böden mit Grund- oder Hangwassereinfluss (WHUG n) eine bessere NEK zugewiesen als entsprechenden normaldurchlässigen Böden (WHUG e). In diesem Fall wird dem zusätzlich verfügbaren Wasser in Trockenzeiten ein positiver Effekt zugesprochen.

Tabelle 8. Begründung zur (Nicht)Berücksichtigung von Spezialfällen hinsichtlich der Limitierung des Wasserhaushalts in Interaktion mit anderen Faktoren für die aktualisierte NEK (pnG = pflanzennutzbare Gründigkeit, WHUG = Wasserhaushaltsuntergruppe).

Interaktionen Spezialfälle	und Beibe- halten	Begründung
WUHG- Untertyp DD	Nein	Der Untertyp «Drainage» (DD) wurde von der Beurteilung aus drei Gründen ausgeklammert: 1) Es ist oft nicht bekannt ob Drainagen überhaupt vorhanden sind bzw. noch funktionieren. 2) Die Erfassung von drainierten Böden ist im heutigen Stand der Technik nicht genügend verlässlich und stabil 3) Die Vereinfachungen (Anhang Tabelle 11 und 12) zeigten, dass es praktisch keine Rolle spielte, ob der Untertyp Drainage berücksichtigt wird oder nicht. Die NEK-Beurteilung mit oder ohne Berücksichtigung des Untertyps Drainage führte zu fast denselben Resultaten, siehe Anhang, Tabellen 11 und 12. Die Methode NEK-ZH empfiehlt die Berücksichtigung des Untertyps Drainage, weil damit eine differenzierte NEK-Beurteilung bei gleicher WHG möglich ist und die funktionierende Drainage den Grundwasserstand konstant hält.
WHUG - pnG - Untertypen I, G, R	Nein	Um die Anzahl der Limitierungstabellen reduzieren zu können, wurden die Limitierungen bezüglich pnG und Untertyp I, G und R von der aktualisierten NEK-Methode ausgeklammert. Dieser Entscheid begründet sich grundsätzlich auf den Ergebnissen zur Vereinfachung der beiden NEK-Methode (siehe Tabellen 11 und 12 im Anhang). Weil die pnG und die Untertypen I, G und R fast vollständig in den WHUG enthalten sind, würden diese Faktoren doppelt in die NEK-Methode einfließen. Für die Beibehaltung der pnG und des Untertyps R in der aktualisierten NEK-Methode wurde von den Experten vorgebracht, dass innerhalb der WHUG vor allem die Tiefe des reduzierten Horizonts («r» abgebildet durch Untertyp R) die WHUG noch genauer differenziere und dabei für die landwirtschaftliche Nutzungseignung relevant sei.
WHUG - Humus	Nein	Die Bedeutung dieser Interaktion war für die Profile im Bodendatensatz gering (Trefferquote = 0.98, Gerrity Score = 0.96 im Vergleich zur Anwendung der gesamten NEK-FAL, siehe Tabelle 11)
WHUG- Geländeform - Humusgehalt	Nein	Die Bedeutung dieser Interaktion war für die Profile im Bodendatensatz gering (Trefferquote = 0.96, Gerrity Score = 0.94 im Vergleich zur Anwendung der gesamten NEK-FAL, siehe Tabelle 11)
WHUG - Hangneigung	Nein	Die Interaktion zu WHUG und Hangneigung aus dem Expertenvorschlag wurde für die aktualisierte NEK weggelassen, da sie bereits über die Interaktion der WHUG und der Geländeform abgedeckt ist.

WHUG- Geländeform – Textur Oberboden	Nein	Laut den Experten wäre für die Interaktion von Wasserhaushalt, Geländeform und Textur im Oberboden weitere Entwicklungsarbeit notwendig. Deswegen wird diese Interaktion in der aktualisierten NEK nicht berücksichtigt.
WHUG - Geländeform - Gefüge	Nein	Der Untertyp «labil aggregiert» (ZL) ist nicht klar definiert und schwierig zu bestimmen. Die Bedeutung dieser Interaktion war für die Profile im Bodendatensatz gering (Trefferquote=0.95, Gerrity Score = 0.98 im Vergleich zur Anwendung der gesamten NEK-ZH, siehe Tabelle 12).
WHUG - Geländeform	Ja	Das Zusammenspiel von Wasserhaushalt und Geländeform führt in einigen wichtigen Fällen zu einer Anpassung der NEK-Beurteilung. Das Expertenwissen hierzu soll erhalten bleiben.
WHUG-Geländeform – Textur Unterboden	Ja	Das Zusammenspiel von Wasserhaushalt, Geländeform und Textur im Unterboden führt in einigen wichtigen Fällen zu einer Anpassung der NEK-Beurteilung. Das Expertenwissen hierzu soll erhalten bleiben.

Limitierung Skelett

Der Skelettgehalt in Böden beeinflusst generell die Wasserleitfähigkeit, die Bearbeitbarkeit, das Verdichtungsrisiko, sowie den Nährstoff-, Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens. Für die landwirtschaftliche Nutzung vor allem auf zwei Arten der Limitierung durch einen hohen Skelettgehalt relevant. Zum einen führt ein hoher Skelettgehalt im Oberboden zu schnelleren Abnutzungserscheinungen bei den Maschinen und limitiert die Bodenbearbeitung der Böden und die Mechanisierung. Zum anderen kann der Skelettgehalt ab einem gewissen Gehalt das Wurzelwachstum hemmen oder gänzlich verhindern. Je höher der Skelettgehalt, desto schwieriger wird es tendenziell für Wurzeln, Nährstoffe und Wasser aus dem Boden zu erschliessen. In skelettreichen Böden wird oftmals versucht, den Boden so zu bearbeiten, dass Steine aus dem Untergrund nicht an die Oberfläche kommen. Ebenso können Steine mechanisch zerkleinert werden, doch diese Praxis ist sehr teuer, wenig verbreitet und für einige Landnutzungen verboten (Wendling et al. 2022).

NEK-FAL und NEK-ZH unterscheiden sich nur geringfügig in der Beurteilung des Skeletts als Limitierung für die landwirtschaftliche Nutzungseignung. Hier hat man sich auf die Verwendung der NEK-FAL Limitierungstabelle geeinigt, wobei die Vereinfachung der Tabelle von Skelettklassen auf Skelettgehalte vorgenommen wurde. Weiter wurde im Sinne der Vereinfachung der Untertyp "blockig" (VB) nicht berücksichtigt, da sich daraus keine Auswirkungen in der Beurteilung der NABODAT-Standorte zeigten (siehe Anhang Tabelle 11 und 12).

Bis 10 Volumenprozent im Oberboden wird der Skelettgehalt in der aktualisierten NEK-Methode als nicht limitierend eingestuft. Bei Skelettgehalten von 10 bis 20 Volumenprozent ist bestenfalls eine NEK 3 (getreidebetonte Fruchtfolge) möglich, der Hackfruchtanbau ist bereits erschwert. Bei höheren Skelettgehalten (>20 Volumen-%) ist der Hackfruchtanbau stark erschwert und der Getreidebau erschwert. Im besten Fall wird eine NEK 4 (getreidebetonte Fruchtfolge mit geringer Ertragssicherheit) vergeben.

Limitierung Textur

Je einseitiger die Korngrößenverteilung eines Bodens, desto nachteiliger ist in der Regel sein Wasser-, Luft- und Nährstoffhaushalt, was seine landwirtschaftliche Nutzungseignung entsprechend limitiert. Böden mit hohen Ton- und Sandgehalten weisen im Allgemeinen eine geringere nutzbare Feldkapazität auf, da

sie wenig pflanzenverfügbares Wasser speichern kann. Sind die Tongehalte sehr hoch, kann der Lufthaushalt zusätzlich das Pflanzenwachstum einschränken. Sind die Sandgehalte zu hoch, sind der Nährstoffrückhalt und das Wasserspeichervermögen ebenfalls eingeschränkt. Sehr schluffige Böden sind besonders hinsichtlich Erosion und Verschlammung an der Oberfläche gefährdet. Auch bei sehr sandigen Böden kann die Erosionsgefährdung erhöht sein, weil deren Bodenstruktur nur wenig entwickelt ist. Die Bodenbearbeitung von sehr tonigen Böden ist schwierig und aufwändig und limitiert somit die landwirtschaftliche Nutzungseignung (Schwab 2022, Wendling et al. 2022).

Für die Limitierung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung im Bereich der Textur wurden die NEK-FAL und die NEK-ZH in einem intensiven Diskussionsprozess zwischen den Experten zusammengeführt. Es entstanden verschiedene Versionen von Limitierungstabellen für den Faktor Textur, welche bei den Autor:innen nachgefragt werden können. Die von den Experten zusammengeführte Limitierungstabelle zur Textur enthält den Ton- und den Schluffgehalt und als zusätzliche Interaktion die Wasserhaushaltsuntergruppe. Dieser Spezialfall der Interaktion von Textur im Oberboden und der Wasserhaushaltsgruppe wurde nicht berücksichtigt, weil die Limitierung nur eine einzelne Texturklasse in einer einzelnen klimatischen Klasse betroffen hätte. Für alle anderen Fälle sind mögliche Limitierungen der landwirtschaftlichen Nutzungseignung bereits durch die einzelnen Faktoren WHG und Textur berücksichtigt.

Bei der Limitierung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung durch die Textur betrug in 4% der Fälle die Differenz in den Beurteilungen zwischen NEK-FAL und NEK-ZH mehr als eine NEK. Derartige Differenzen wurden für folgende Fälle festgestellt:

- Ton 0-5 %, Schluff 0-15% und keine Klimalimitierung (Nutzungsgebiet 1)
- Ton 5-10 %, Schluff 0-50% und keine Klimalimitierung (Nutzungsgebiet 1)

In diesen Fällen wurde die aktualisierte NEK-Methode unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit beurteilt, d.h. es wurde die strengste (am meisten limitierende) NEK ausgewählt.

In der aktualisierten NEK-Methode werden sandige Lehme (Tongehalt 15–20 %, Schluffgehalt 0–50 %) und Lehme (Tongehalt 20–30 %, Schluffgehalt 0–50 %) als nicht limitierend für Pflanzen beurteilt. Körnungsklassen mit eher extremen Anteilen an Ton, Schluff oder Sand werden hingegen als limitierend für die Nutzungseignung beurteilt, wobei Sande die landwirtschaftliche Nutzungseignung am stärksten einschränken, gefolgt von Tonen und Schluffen.

Limitierung Humus

Humus ist eine zentrale Bodeneigenschaft für fast alle Bodenprozesse und Bodenfunktionen. Im Hinblick auf die Landwirtschaft ist er als Nährstoffspeicher, als Wasserspeicher, als Filter für Schadstoffe und als Nahrungsgrundlage für Bodenorganismen von Bedeutung. Humus verbessert zudem die Bodenstruktur und verringert die Erosions- und Verdichtungsanfälligkeit. Daneben beeinflusst die organische Substanz die Bodenfarbe: Je höher der Humusgehalt ist, desto dunkler ist der Boden. Ein Boden mit dunkler Oberfläche kann sich zudem im Frühling leichter erwärmen und unterstützt damit das Keimen von Pflanzen (Wendling et al. 2022).

Der Humusgehalt wird in der aktualisierten NEK-Methode als separate Limitierung aufgeführt und basiert auf der Methode NEK-ZH. Es wird nur der Humusgehalt im Ober- und Unterboden mitberücksichtigt. Weder die Berücksichtigung der Untertypen PT und PU noch die Mächtigkeit des Unterbodens führten im betrachteten NABODAT-Datensatz zu einer anderen Bewertung (siehe Anhang Tabelle 12) und wurden – um dem Ziel der Vereinfachung der Methode näher zu kommen – nicht berücksichtigt.

In mineralischen Böden, in denen die Humusgehalte je nach Nutzungstyp in der Regel im Bereich zwischen 2 % und 10 % liegen, fördert ein höherer Humusgehalt das Pflanzenwachstum. In der aktualisierten NEK-Methode stellt dementsprechend ein Humusgehalt bis zu 10 % im Oberboden und 30 % im Unterboden keine Limitierung für die langfristige landwirtschaftliche Nutzungseignung dar. Böden mit sehr hohen Humusgehalten von über 30 % werden hingegen in der NEK-Methode als

eingeschränkt landwirtschaftlich nutzbar bewertet. Dies vor allem aufgrund des Kriteriums, dass eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung von organischen Böden langfristig nicht nachhaltig möglich ist.

Limitierung pH

Beim pH wird die Limitierung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung durch einen sehr sauren Ober- und Unterboden beurteilt. Der pH beeinflusst die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen, vor allem von Phosphor und Magnesium und den meisten Spurenelemente (Flisch et al. 2017), das Verhalten von Schadstoffen im Boden und dessen Eignung als Lebensraum für Bodenorganismen.

Der pH war nur in der Methode nach NEK-ZH als limitierender Faktor aufgenommen. Obwohl der pH nur in sehr wenigen Fällen im Bodendatensatz limitierend für die landwirtschaftliche Nutzungseignung war (siehe Tabelle 12), haben sich Experten und Autor:innen darauf geeinigt, den Faktor in der aktualisierten NEK-Methode beizubehalten.

In der aktualisierten NEK-Methode wird der pH-Wert in Böden als limitierend für die landwirtschaftliche Nutzungseignung bewertet, wenn er im Unterboden unter einem Wert von 5.1 liegt. Allerdings gilt diese Limitierung nur, wenn keine klimatische Limitierung vorliegt. Ist der betrachtete Standort schon klimatisch in der Nutzungseignung eingeschränkt, schränkt der pH-Wert des Bodens die landwirtschaftliche Nutzungseignung nicht zusätzlich ein.

Limitierung Terrain

Mit zunehmender Hangneigung ist der Einsatz von Maschinen zum Anbau von Kulturen limitiert. Ebenso erhöht sich die Erosionsgefährdung, was eine intensive ackerbauliche Nutzung und den Anbau spezifischer Kulturen einschränkt (Prashun et al. 2022, Wendling et al. 2022). Auch die Neigungsart kann die landwirtschaftliche Nutzung einschränken; beispielsweise kann die Bearbeitung von ungleichmässig geneigten Flächen viel anspruchsvoller sein als diejenige von gleichmässig geneigten Hängen.

Die Beurteilung des Terrains in Interaktion mit dem Klima unterscheidet sich nicht methodisch nach NEK-FAL und NEK-ZH. In der Methode nach NEK-FAL war das Terrain in der Limitierung zu Wasserhaushalt integriert.

Die Limitierungen des Terrains werden über die Hangneigung und die Neigungsart in die aktualisierte NEK-Methode integriert. Die Neigungsart wird entsprechend der Methode zur Herleitung der Geländeform gemäss der Revision der Bodenklassifikation und der Bodenkartieranleitung der Schweiz (www.boden-methoden.ch) bestimmt. Allerdings werden nur ungleichmässig geneigte von allen übrigen Neigungsarten – konvex, konkav und gleichmässig – unterschieden, weil nur diese Neigungsart einen Einfluss auf die NEK-Beurteilung hat. Ungleichmässig geneigt sind Flächen, die innerhalb der betrachteten Fläche mehrere Neigungsarten aufweisen. Die in der FAL-Kartieranleitung dokumentierten Einschätzungen (Brunner et al. 1997) der Limitierung der Mechanisierung durch das Terrain wurden in der aktualisierten NEK-Methode übernommen.

Unterhalb von 10 % ist die Hangneigung für die landwirtschaftliche Nutzungseignung nicht limitierend, eine Hangneigung von 10–15 % wird als leichte Limitierung beurteilt. Ist die Hangneigung nicht ungleichmässig, ist die Limitierung auch bei 15–20 % nur leicht einschränkend. Für Böden mit sehr ungleichmässiger Hangneigung oder einer Hangneigung grösser 25 % sind die Mechanisierung und die landwirtschaftliche Nutzungseignung stark eingeschränkt.

Limitierung Spezialfälle

Die Wechselwirkungen von Klima und mehreren Boden- und Standorteigenschaften können in gewissen Fällen in der Summe zu einer grösseren Limitierung führen, als wenn die limitierenden Faktoren nur einzeln betrachtet werden. In der aktualisierten NEK-Methode werden zwei solcher Wechselwirkungen zwischen den limitierenden Faktoren als Spezialfälle berücksichtigt.

Das KOBO hat von der NEK-FAL und der NEK-ZH berücksichtigte Limitierungen, welche die Interaktion mehrere Boden- oder Terraingrössen berücksichtigen, aus den obigen Limitierungen herausgelöst und unter «Spezialfälle» aufgeführt. Die Spezialfälle wurden dabei so gekürzt, dass nur Fälle beschrieben sind,

die zusätzliche Limitierungen ergeben, also Limitierungen, die mit denselben Eigenschaften in einer der anderen Limitierung nicht abgedeckt sind. Von den vorgeschlagenen Interaktionen wurden zwei beibehalten. Hauptgründe für die Weglassung der anderen Interaktionen waren, dass die Interaktion bereits anderweitig berücksichtigt wurde, die Bedeutung der Interaktion in der NABODAT-Datensatz-Analyse gering war oder die Erfassung der benötigten Grösse schwierig ist. Trotzdem sollte in der aktualisierten NEK-Methode möglichst viel Expertenwissen erhalten werden. Deswegen werden in der aktualisierten NEK zwei Interaktionen als Spezialfälle berücksichtigt (Klima-Wasserhaushalt-Terrain, Klima-Wasserhaushalt-Terrain-Textur Unterboden), welche eine differenziertere Beurteilung von Wasserhaushalt und Bodenbedingungen im Hinblick auf Mechanisierung, Sommertrockenheit, Erosion und Verschlammung erlauben.

Die aktualisierte NEK-Methode Version 2023

Die aktualisierte NEK-Methode resultiert im Ergebnis aus den oben aufgeführten Arbeitsschritten 1 bis 4 und stellt eine Zusammenführung und Vereinfachung der NEK-FAL und der NEK-ZH dar. Eine Zusammenfassung der betrachteten Limitierungen und der dabei relevanten Eingangsgrössen für die Beurteilung ist in Tabelle 9 dargestellt. Die am stärksten limitierende Grösse bestimmt die NEK eines Standorts. Eine detaillierte Anleitung der aktualisierten NEK-Methode wurde separat erstellt und wird im Kontext der revidierten Kartieranleitung veröffentlicht (Greiner et al. 2023).

Tabelle 9. Überblick der Limitierungen in der aktualisierten NEK-Methode (Version 2023) mit den entsprechenden Eingangsgrössen. Alle Limitierungen werden immer in Interaktion mit dem Klima bewertet (ausser dem Klima selbst).

Limitierungen aktualisierte NEK-Methode	Eingangsgrössen	Einheiten
Klima	Klimaeignungsklassen	20 Kategorien
Wasserhaushalt	Wasserhaushaltsuntergruppe	25 Kategorien
Skelett	Skelettgehalt Oberboden	Vol-% (Gesamtprobe)
Textur	Tongehalt Oberboden Schluffgehalt Oberboden	% (der mineralischen Feinerde)
Humus	Humusgehalt Oberboden	% (der Feinerde)
pH	pH Ober- und Unterboden	-
Terrain	Hangneigung Index ungleichmässige Hangneigung	% Ja/nein
Spezialfälle	Wasserhaushaltsuntergruppe	26 Kategorien
<i>WGH-Terrain</i>	Hangneigung	%
<i>WHG-Terrain-Textur UB</i>	Index ungleichmässige Hangneigung	Ja/nein
	Tongehalt Unterboden	% (der mineralischen Feinerde)
	Schluffgehalt Unterboden	% (der mineralischen Feinerde)

3.5 Schritt 5: Vergleich der aktualisierten NEK-Methode mit bisherigen NEK-Versionen

Die aktualisierte NEK-Methode Version 2023 haben wir auf den NABODAT-Bodendatensatz angewendet und die resultierende aktualisierte NEK mit der NEK-FAL und NEK-ZH verglichen. In Tabelle 10 sind die Trefferquoten und Gerrity Scores der Vergleiche aufgelistet, Abbildung 7 zeigt die visuellen Vergleiche. Die aktualisierte NEK zeigt grundsätzlich ähnliche Tendenzen wie NEK-FAL und NEK-ZH. Jeweils rund 60% der Standorte werden mit der aktualisierten NEK-Methode und den Methode nach NEK-FAL oder NEK-ZH gleich bewertet. In über 30% der Fälle unterscheiden sich die aktualisierte NEK und die NEK-FAL und die NEK-ZH für die betrachteten Standorte um nur eine Klasse. Mit der aktualisierten NEK-Methode wurde eine Annäherung der Beurteilungsmethoden NEK-FAL und NEK-ZH erreicht, die Trefferquoten und Gerrity Scores zwischen der aktualisierten NEK und NEK-FAL und NEK-ZH sind höher als jene zwischen der NEK-FAL und NEK-ZH, dies ist auch visuell sichtbar, der Vergleich zwischen NEK-FAL und NEK-ZH zeigt mehr Streuung als der Vergleich von NEK-FAL und NEK-ZH mit der aktualisierten NEK (Abbildung 7).

Tabelle 10. Vergleich der NEK-Beurteilungen anhand des NABODAT-Datensatz (Version 5.1) für verschiedene NEK-Methoden. Für 2906 Profile war die Bewertung der aktualisierten NEK, der NEK-FAL und der NEK-ZH möglich.

n	Treffer- quote	Gerrity Score	Bias NEK1	Bias NEK2	Bias NEK3	Bias NEK4	Bias NEK5	Bias NEK6	Bias NEK7	Bias NEK8	Bias NEK9	Bias NEK10
Vergleich aktualisierte NEK und NEK-ZH												
2906	0.61	0.78	1.07	1.7	0.46	0.83	0.71	1.8	1.13	0.52	1.06	0.55
Vergleich aktualisierte NEK und NEK-FAL												
2906	0.6	0.67	0.92	2.01	0.47	1.29	1	1.27	0.69	0.12	1.13	0.27
Vergleich NEK-ZH und NEK-FAL												
2906	0.48	0.62	0.86	1.18	1.03	1.56	1.42	0.7	0.62	0.24	1.06	0.5

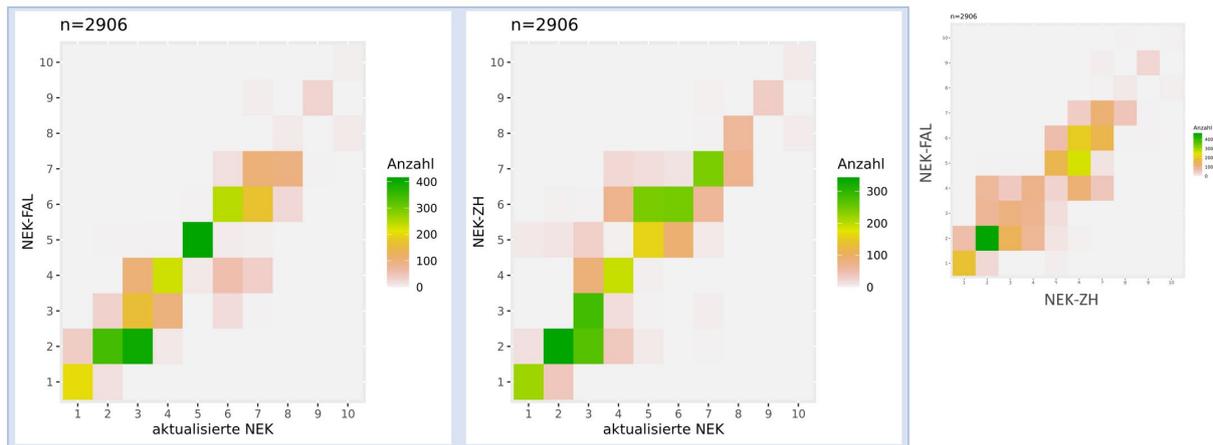


Abbildung 7. Blau umrandet: Vergleich der aktualisierten NEK mit NEK-FAL und NEK-ZH für den NABODAT-Bodendatensatz für 2906 Standorte (für diese Schnittmenge waren die Daten für alle drei Bewertungen vorhanden). Rechts: Vergleich der NEK-FAL und der NEK-ZH für den NABODAT-Bodendatensatz für dieselben 2906 Standorte.

3.6 Schritt 6: Plausibilität der aktualisierten NEK-Methode

Die aktualisierte NEK ist im Vergleich mit Datensätzen zur tatsächlichen Landnutzung bzw. Nutzungsintensität plausibel, wie auch NEK-FAL und NEK-ZH (Abbildung 8). Je besser die landwirtschaftliche Nutzungseignung bewertet wird, desto intensiver werden die Standorte landwirtschaftlich genutzt und mit zunehmender Limitierung steigt im Mittel der Anteil der Standorte, die als Grasland genutzt werden (Abbildung 8a-b). Die Plausibilisierung mittels Crop Intensity Index zeigt ebenfalls den Trend zur Abnahme der Nutzungsintensität bei höheren NEK (Abbildung 8c-d). Standorte mit NEK 1- 4 scheinen gemäss Crop Intensity Index intensiver genutzt zu werden als Standorte mit NEK 5-10.

Getreide- und Hackfruchtanbau ist auf besseren NEK deutlich häufiger, sei es über eine grössere Fläche (Abbildung 8e-f) oder auch über die Zeit (Abbildung 8g-h). Wie bereits oben erwähnt, sind aber auch aus agrarökonomischen Gründen auf Böden mit eher schlechten Nutzungseignung in der Praxis intensivere Nutzungen möglich. Dazu stechen in Abbildung 8a und g die Kulturgruppe NEK 8 «Feuchte Mähwiesen» und die NEK 10 «sehr feuchtes Streuland» heraus. Obwohl diese Standorte nach der aktualisierten NEK-Methode als sehr nass beurteilt werden, werden sie in der Praxis intensiver genutzt als mit der NEK-Methode empfohlen wird. Ein Standort wird mit einer NEK 8 oder NEK 10 beurteilt, wenn der Wasserhaushalt für die landwirtschaftliche Nutzung limitierend ist. Es wird angenommen, dass diese Standorte drainiert sind, was eine intensivere Nutzung erlauben würde.

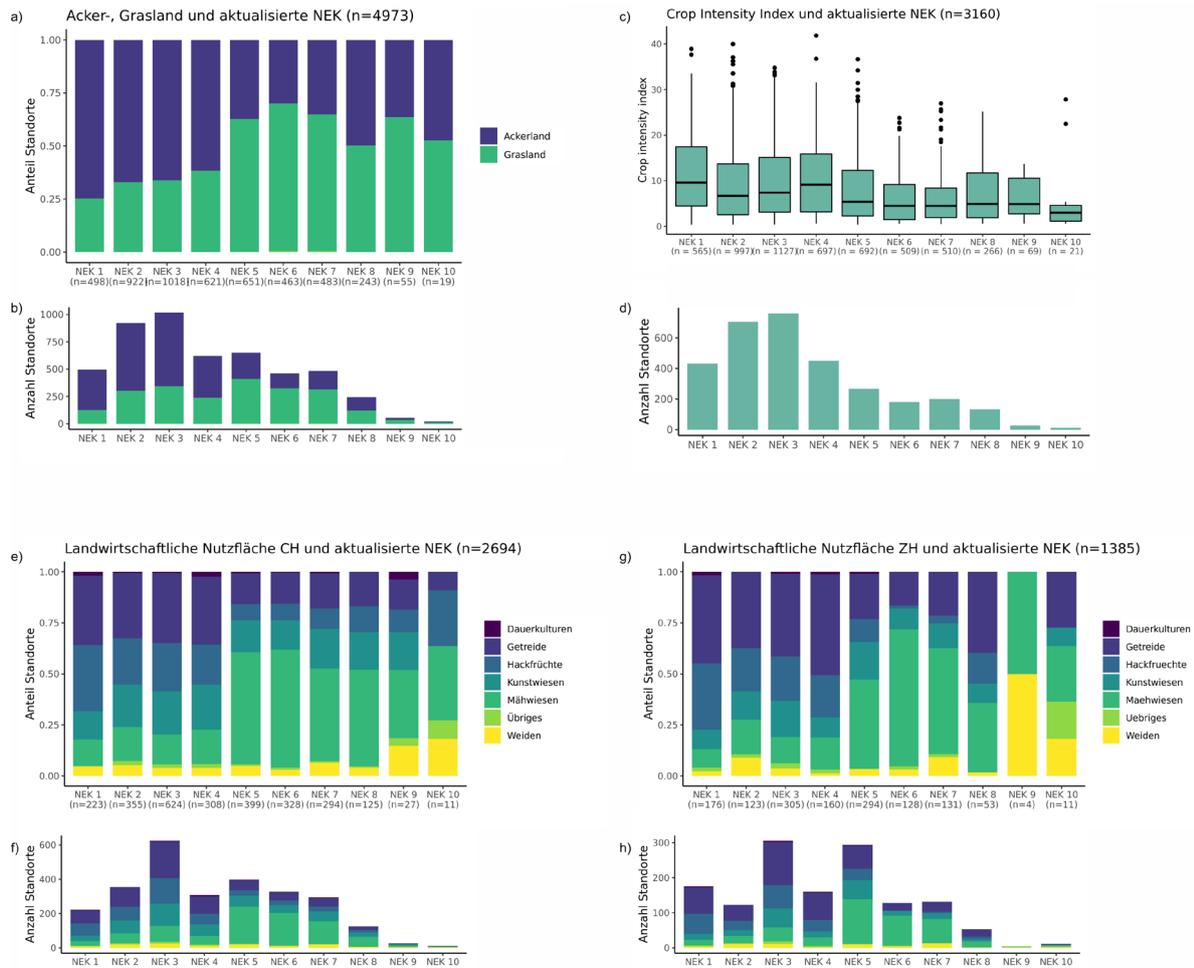


Abbildung 8. Plausibilisierung der aktualisierten NEK anhand der Nutzung (nach Hauptnutzungen Acker- und Grasland und nach Kulturgruppen für unterschiedlich verfügbare Datensätze. Der Crop Intensity Index – abgeleitet aus der Fernerkundung – beschreibt wie häufig Kulturen auf dem Standort wechseln).

4 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Bericht zeigt auf, wie die bisherige NEK-Methode zur NEK-Methode Version 2023 aktualisiert wurde. Basierend auf den beiden bestehenden NEK-Methoden NEK-ZH und NEK-FAL, dem heutigen Stand der Anwendung in der Praxis, Expertenwissen und anhand von verfügbaren Boden- und Landnutzungsdaten konnte in 6 Arbeitsschritten eine Vereinfachung der Methode erzielt werden. Die Aktualisierung berücksichtigt somit den heutigen Stand des bodenkundlichen Expertenwissens und die Kenntnisse der bisher in der Schweiz kartierten Böden.

Das Augenmerk lag bei der Aktualisierung neben der Behebung von bekannten Fehlern und Inkonsistenzen darauf, die NEK-Methode zu vereinfachen, lesbarer zu machen, möglichst wenig klassifikatorische Grössen zu verwenden und die empirische Basis der Methode mit verfügbaren Daten zu dokumentieren.

Die NEK-Methode 2023 geht im Grundsatz -- wie bis anhin -- von einer nachhaltigen Nutzung der Böden aus. Entsprechend steht eine langfristige Perspektive im Fokus der Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung eines Standorts. Der Vergleich der zahlreichen Varianten für beide NEK-Methoden mit den Originalmethoden hat deutlich aufgezeigt, dass manche limitierende Faktoren die NEK-Bewertungen nur wenig beeinflussen. Dies kann damit erklärt werden, dass in der Regel mehrere Eingangsgrössen für die Bewertung der limitierenden Faktoren stark korreliert sind, und folglich (rein rechnerisch) die Bewertungsmethoden vereinfacht werden können. Die Berechnungen der verschiedenen Methodenvarianten zeigen jedoch deutlich auf, dass die Faktoren Textur und Wasserhaushalt für die Bewertung der NEK besonders wichtig sind. Auch die NEK-Methode Version 2023 stützt sich stark auf die Wasserhaushaltgruppen der Schweizer Klassifikation der Böden ab. Die Wasserhaushaltsuntergruppen bleiben ein essenzieller Bestandteil der NEK-Methode. Sie sind für die NEK-2023 der am häufigsten limitierende Faktor. Mit der Aktualisierung der NEK-Methode konnten zudem einige Inkonsistenzen in den Bewertungstabellen der früheren NEK-Methoden behoben werden.

Weitere Entwicklungen der NEK-Methode 2023 und laufende Erfahrungen in der Praxis sollten zukünftig mit regelmässigen Aktualisierungen der Beurteilungsmethode aufgenommen werden. Technisch könnte die Erfassung der erforderlichen Eingangsgrössen sowie die Berechnung der NEK über ein Erfassungstool (digitale Erfassung in Soildat) erfolgen. Ein solches digitales Tool könnte zudem die Qualitätssicherung gewährleisten und eine Weiterentwicklung der NEK-Methode unterstützen.

Vorarbeiten für eine automatische Herleitung der Terrainfaktoren für die Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung wurden durch das KOBO durchgeführt. Es ist geplant, hierzu eine Anleitung in Form eines Faktenblatts zur Verfügung zu stellen.

Der Faktor Klima wird auch in der NEK-Methode 2023 über die Klimaeignungskarte von 1977 (Jeanneret und Vauter 1977) berücksichtigt. Die Klimaeignungskarte zeigt auf, welche Gebiete sich aufgrund der klimatischen Bedingungen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts besonders gut für die in der Schweiz vorherrschenden Kulturen und Anbaumöglichkeiten eigneten. Die Vegetationsperiode dürfte sich mittlerweile nach rund einem halben Jahrhundert in vielen Regionen signifikant verschoben haben. Für einen aktuellen Blick auf die landwirtschaftliche Nutzungseignung müsste der Faktor Klima dringend mit aktuellen Klimadaten beurteilt werden. Eine Aktualisierung und Überarbeitung des Klimaaspekts für die NEK, sei es in Form einer überarbeiteten Klimaeignungskarte oder in anderer Form, wird für eine weitere Überarbeitung der NEK-Methode als dringlich erachtet. Diese sollte vorzugsweise durch Expert:innen aus dem Themenbereich Klima und Landwirtschaft durchgeführt werden.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Standorte aus dem NABODAT-Datensatz (Version 5.1), für die eine Bewertung mit der aktualisierten NEK-Methode durchgeführt werden konnte (n = 5'453).	9
Abbildung 2. Vorgehensweise zur Aktualisierung der NEK-Methode (Version 2023). Zunächst wurden die existierenden NEK-Methoden (NEK-FAL, NEK-ZH) miteinander verglichen, anhand von Daten zur Nutzung bzw. Nutzungsintensität plausibilisiert und vereinfacht. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden die beiden NEK-Methoden zu einer aktualisierten NEK-Methode Version 2023 zusammengeführt, mit der NEK-FAL und NEK-ZH verglichen und ebenfalls plausibilisiert.	13
Abbildung 3. Die "Heatmap" visualisiert die Häufigkeit der NEK-Kombinationen aus zwei NEK-Methoden, wobei die NEK aus einer Methode auf der x-Achse, die NEK aus der anderen Methode auf die y-Achse aufgetragen sind und die Häufigkeit der Kombinationen farblich codiert ist. Auf der 1:1-Geraden der Grafik finden sich Standorte mit übereinstimmender NEK. Häufig gemeinsam auftretende NEK sind im Beispiel hier dunkler eingefärbt. Kombinationen, welche seltener vorkommen, sind transparenter eingefärbt. Die «Heatmap» wird als Vergleichswerkzeug zwischen zwei NEK-Varianten verwendet.	14
Abbildung 4. Vergleich NEK-FAL und NEK-ZH für den NABODAT-Bodendatensatz V5.1 (n= 3024 Profile als Schnittmenge für beide Bewertungsmethoden). Siehe Abbildung 3 für Hinweise zur Interpretation dieser Abbildung.	16
Abbildung 5. Plausibilisierung der NEK-FAL anhand der Nutzung (nach Hauptnutzungen Acker- und Grasland und nach Kulturgruppen für unterschiedlich verfügbare Datensätze. Der Crop Intensity Index – abgeleitet aus der Fernerkundung – beschreibt wie häufig Kulturen auf dem Standort wechseln).	17
Abbildung 6. Plausibilisierung der NEK-ZH anhand der Nutzung (nach Hauptnutzungen Acker- und Grasland und nach Kulturgruppen für unterschiedlich verfügbare Datensätze. Der Crop Intensity Index – abgeleitet aus der Fernerkundung – beschreibt wie häufig Kulturen auf dem Standort wechseln).	18
Abbildung 7. Blau umrandet: Vergleich der aktualisierten NEK mit NEK-FAL und NEK-ZH für den NABODAT-Bodendatensatz für 2906 Standorte (für diese Schnittmenge waren die Daten für alle drei Bewertungen vorhanden). Rechts: Vergleich der NEK-FAL und der NEK-ZH für den NABODAT-Bodendatensatz für dieselben 2906 Standorte.	28
Abbildung 8. Plausibilisierung der aktualisierten NEK anhand der Nutzung (nach Hauptnutzungen Acker- und Grasland und nach Kulturgruppen für unterschiedlich verfügbare Datensätze. Der Crop Intensity Index – abgeleitet aus der Fernerkundung – beschreibt wie häufig Kulturen auf dem Standort wechseln).	29

6 Tabellenverzeichnis

<p>Tabelle 3. Auflistung der Nutzungseignungsklassen der NEK-Methode 2023 inklusive der Bewertungskriterien. Die Beschreibung basiert auf den Beschreibungen der NEK nach FAL und Kanton Zürich (Brunner et al. 1997; Jäggli et al. 1998) und wurde überarbeitet durch P. Schwab und O. Heller (2022) und anschliessend weiter angepasst durch die Autor:innen. Weil in NEK 1 und 2 alle Kulturen angebaut werden können, wird bei den Bewertungskriterien nicht zwischen den Kulturen unterschieden. Bei NEK 3-6 unterscheiden sich die Beurteilungen zwischen den Kulturen. Da Ackerbau in NEK 7- 9 nicht vorgesehen ist, wird hier nur der Futterbau beurteilt. Die Beurteilung erfolgt über alle NEK in fünf Klassen (++ = sehr gut, (+) = gut bis sehr gut, + = gut, (+) = mittel bis gut, 0 = mittel, - = schlecht, -- = sehr schlecht). Es gibt kein starres Vorgehen, wie die Gesamteinschätzung aus der nachhaltigen Nutzung und Anbaubreite, dem Ertragsvermögen, der Ertragssicherheit und den Bewirtschaftungsbedingungen hergeleitet wird.</p>	6
<p>Tabelle 2. Beschrieb der Limitierungen in NEK-FAL und NEK-ZH. (Fett= Hauptsächliche Limitierung, Normal = In der Limitierungstabelle enthaltene Grössen. DD = drainiert, OB = Oberboden, pnG = pflanzennutzbare Gründigkeit, PT = mit Torfzwichenschichten, PU = überschüttet, UB = Unterboden, VB = blockig, WHG = Wasserhaushaltsuntergruppe, ZL = labil aggregiert)</p>	8
<p>Tabelle 3. Anzahl (n) der mit den jeweiligen NEK-Methoden bewertbaren Standorte von den insgesamt über 25'000 Standorten des Bodendatensatzes (NABODAT 2020). Die NEK-Methoden benötigen unterschiedliche minimale Datensätze, die nicht an allen zwischen 1960 und 2018 erfasst Standorten vorliegen. In den Fällen, in denen mehrere Methoden aufgeführt sind, gibt n die Anzahl der mit allen Methoden gleichzeitig bewertbaren Standorte an.</p>	10
<p>Tabelle 4. Überblick zu Boden- und Standorteigenschaften der 5453 mit der NEK-Methode Version 2023 bewertbaren NABODAT-Profile. Die Bodeneigenschaften (OB = Oberboden) sind dem Bodendatensatz entnommen, die Höhe stammt aus dem SwissAlti3D-Datensatz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021), Temperatur und Niederschlag aus den Daten von MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz 2019).</p>	10
<p>Tabelle 5. Überblick der Datensätze zur Plausibilisierung der NEK-Methoden anhand der Nutzungsintensität bzw. der landwirtschaftlichen Nutzung an den jeweiligen Standorten. Die ersten drei Datensätze liegen landesweit vor, der vierte Datensatz für den Kanton Zürich. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung unterscheidet sich die Anzahl der Standorte, für die die NEK bewertbar ist und gleichzeitig innerhalb der Perimeter der Datensätze liegt. Die Plausibilisierungen wurde für alle NEK-Methoden (NEK-FAL, NEK-ZH, aktualisierte NEK Version 2023) durchgeführt, als Anhaltspunkt wurde hier die Anzahl der Standorte, die in den Analysen verwendet wurden, für die aktualisierte NEK Version 2023 dargestellt.</p>	11
<p>Tabelle 6. Zusammenstellung der Hauptkulturen in Kulturgruppen nach Celio (2021).</p>	12
<p>Tabelle 7. Überblick und Entstehung der limitierenden Faktoren der aktualisierten NEK-Methode</p>	20
<p>Tabelle 8. Begründung zur (Nicht)Berücksichtigung von Spezialfällen hinsichtlich der Limitierung des Wasserhaushalts in Interaktion mit anderen Faktoren für die aktualisierte NEK (pnG = pflanzennutzbare Gründigkeit, WHUG = Wasserhaushaltsuntergruppe).</p>	22
<p>Tabelle 9. Überblick der Limitierungen in der aktualisierten NEK-Methode (Version 2023) mit den entsprechenden Eingangsgrössen. Alle Limitierungen werden immer in Interaktion mit dem Klima bewertet (ausser dem Klima selbst).</p>	26

Tabelle 10. Vergleich der NEK-Beurteilungen anhand des NABODAT-Datensatz (Version 5.1) für verschiedene NEK-Methoden. Für 2906 Profile war die Bewertung der aktualisierten NEK, der NEK-FAL und der NEK-ZH möglich.	27
Tabelle 11. Verschiedene Vereinfachungsvarianten NEK-FAL mit Scores. (WH = Wasserhaushalt)	37
Tabelle 12. Verschiedene Vereinfachungsvarianten NEK-ZH mit Scores. (WH = Wasserhaushalt)	38

7 Literaturverzeichnis

Amt für Landschaft und Natur, Abteilung Landwirtschaft, Kanton Zürich (2022): Geodatenatz Landwirtschaftliche Nutzungsflächen.

Bibby, J. S.; Douglas, H. A.; Thomasson, A. J. (1991): Land Capability Classification for Agriculture. Macaulay Land Use Research Institute. Available online at <https://www.hutton.ac.uk/sites/default/files/files/soils/LAND%20CAPABILITY%20CLASSIFICATION%20FOR%20AGRICULTURE.PDF> , checked on 1/16/2023.

BLW (1977): Klimaeignungskarten für die Landwirtschaft in der Schweiz. mit Beilagen. With assistance of François Jeanneret, Philippe Vautier. Edited by Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement. Bern.

Bock, M.; Gasser, P.; Pettapiece, W.; Brierley, A.; Bootsma, A.; Schut, P. et al. (2018): The Land Suitability Rating System Is a Spatial Planning Tool to Assess Crop Suitability in Canada. In *Frontiers in Environmental Science* 6, p. 77. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00077.

Bohne, K. (2005). An introduction into applied soil hydrology. Reiskirchen: Catena Verlag (Lecture notes in GeoEcology).

Brunner, J.; Jäggli, F.; Nievergelt, J.; Peyer, K. (1997): Kartieranleitung. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Zürich Reckenholz: Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz FAL.

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2021): swissALTI3D. Available online at <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html> , updated on 1/18/2023.

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2019): Schweizer Klima im Detail. Available online at <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/raeumliche-klimaanalysen.html>.

Bundesamt für Statistik (2010): Arealstatistik (AS09_72). Bern.

Bünemann, E. ; Bongiorno, G. ; Bai, Z.; Creamer, R.; Deyn, G.; Goede, R. et al. (2018): Soil quality – A critical review. In *Soil Biol Biochem* 120, pp. 105–125. DOI: 10.1016/J.SOILBIO.2018.01.030.

Celio, E. (2021): Analyse der Fruchtfolgeflächen & Nutzungseignungsklassen: Voranalyse & Vertiefung. Kurzdokumentation zu Handen Kanton Zürich - Amt für Landschaft und Natur – Fachstelle Bodenschutz. Incolab.

Environment Canada (1972): The Canada Land Inventory. Soil capability classification for agriculture. Geoinformations- und Katasterstellen der Kantone (2022): geodienste.ch. <https://geodienste.ch/>.

Fisch, R.; Neuweiler, R.; Kuster, T.; Oberholzer, H.; Huguenin-Elie, O.; Richner, W. (2017). Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. In *Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017)* (Hrsg. W. Richner & S. Sinaj). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), p. 34.

Greiner, L.; Petter, G.; Keller, A. (2023): Anleitung zur Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung. Methode der Nutzungseignungsklassen (NEK-Methode). Aktualisierte Version 2023. Kompetenzzentrum Boden KOBO. BFH-HAFL.

Gross, T.; Keller, A.; Müller, M.; Gubler, A. (2021): Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung Nährstoffe und Schwermetalle 1985–2017. In *Agroscope Science* 123, p. 99. DOI: 10.34776/as123g.

Holzkämper, A.; Calanca, P.; Fuhrer, J. (2013): Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. In *Agricultural and Forest Meteorology* 168, pp. 149–159. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.09.004.

Holzkämper, A.; Fossati, D.; Hiltbrunner, J.; Fuhrer, J. (2015). Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. In *Reg Environ Change* 15 (1), pp. 109–122. DOI: 10.1007/s10113-014-0627-7

Jäggli, F.; Peyer, K.; Pazeller, A.; Schwab, P. (1998): Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich und Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich Reckenholz FAL.

Jeanneret, F.; Vautier, P. (1977). Klimateignungskarten für die Landwirtschaft in der Schweiz. Mit Beilagen. Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement. Bern.

Klingebiel, A.; Montgomery, P. H. (1961): Land-capability classification. Washington.

Koordinationsgruppe Richtlinien Tessin und Deutschschweiz (2021): KIP-Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN). 8. Auflage. KIP, AGRIDEA.

Lynn, I.; Manderson, A.; Page, M.; Harmsworth, G.; Eyles, G.; Douglas, G. et al. (2009): Land use capability survey handbook. A New Zealand handbook for the classification of land. 3rd (ISBN 978-0-477-10091-5).
https://www.landcareresearch.co.nz/_data/assets/pdf_file/0017/50048/luc_handbook.pdf, checked on 2/27/2020.

Moebius-Clune, B. N.; Gugino, B. K.; Idowu, O. J.; Schindelbeck, Robert R.; Ristow, A. J. et al. (2017): Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework. Geneva, NY.

Mueller, L.; Schindler, U.; Behrendt, A.; Eulenstein, F.; Dannowski, R. (2007): The Muenchenberg Soil Quality Rating (SQR). Field manual for detecting and assessing properties and limitations of soils for cropping and grazing. Muenchenberg, Deutschland.

NABODAT, Verbund (2020): NABODAT-Datensatz v5.1. Available online at <https://www.nabodat.ch/index.php/de/service/bodendatensatz>.

NCAR - Research Applications Laboratory (2015). verification: Weather Forecast Verification Utilities. R package version 1.42. <https://CRAN.R-project.org/package=verification>

O'Geen, A.; Southard, S.; Southard, R. (2008): A revised Storie Index for use with digital soils information (ANR Publication 8335).

Pazúr, R.; Huber, N.; Weber, D.; Ginzler, C.; Price, B. (2021): Cropland and grassland map of Switzerland based on Sentinel-2 data: EnviDat. <https://www.envidat.ch/dataset/cropland-and-grassland-map-of-switzerland-based-on-sentinel-2-data>.

Prasuhn, V.; Hofer, P.; Liniger, H. (2022). 24 Jahre Erosionsmonitoring in der Region Frienisberg. DOI: 10.34776/AFS13-86

Schwab, P. (2022). Vorschlag zur Berücksichtigung der Erosionsgefährdung durch unterschiedliche Feinerdekörnung (Textur) im Oberboden / Erodierbarkeit des Bodens (Erodibilität). Auf Anfrage verfügbar bei info@ccsols.ch

Schwab, P. (2021): NEK-Einstufung nach Boka ZH. Überarbeitung im Auftrag des Kompetenzzentrums Boden (KOBO).

Schwab, P.; Günter, M. (2016): Vergleich der Methoden BoKa ZH und FAL 24 zur Beurteilung der Nutzungseignungsklassen. mit Ergänzungen der FABO vom 16.1.2017. Amt für Landschaft und Natur, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich.

Storie, E. (1978): Storie Index Soil Rating: Division of Agricultural Sciences University of California. Special Publication Nr. 3203. <http://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/3203.pdf>.

Stumpf, F. (2021): baresoil.

Wendling, M. ; Schmid, N. ; Charles, R. (2022): Etude de l'importance des paramètres sol permettant d'évaluer l'aptitude agricole d'un site. Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL.

Wendling, M. (2022): Utilisation de la méthode d'estimation de la classe d'aptitude agricole. FiBL. <https://ccsols.ch/de/nutzen-schutz/bewertung-landwirtschaftliche-nutzungseignung/>.

World Meteorological Organization (2017): 7th International Verification Methods Workshop. Berlin, Germany, 8.5.-11.5.2017. <https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>.

Zürcher, M.; Heller, O.; Bräm, E. (2021): Revision Kartieranleitung FAL 24 - Überarbeitung Anleitung Nutzungseignungsklassen. Bericht im Auftrag des Kompetenzzentrums Boden (KOBO).

8 Anhang

Tabelle 11. Verschiedene Vereinfachungsvarianten NEK-FAL mit Scores. (WH = Wasserhaushalt)

Weggelassen	Hinzugefügt aus NEK-ZH	n	Trefferquote	Gerrity Score	biasNEK1	biasNEK2	biasNEK3	biasNEK4	biasNEK5	biasNEK6	biasNEK7	biasNEK8	biasNEK9	biasNEK10
pnG (in Limitierung WH)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	1	1	1
VB (in Limitierung Skelett)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pnG (in Limitierung WH), VB (in Limitierung Skelett)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	1	1	1
-	Limitierung pH	3024	0.99	0.99	0.92	1.02	1	1	1	1	1	1	1	1
-	Limitierung Geländeform	3024	0.98	0.99	1	1.04	0.93	0.99	1	1.03	0.93	1	0.95	1
Limitierung Skelett	-	3024	0.96	0.99	1.42	0.94	0.86	0.99	1	1	1	1	1	1
Geländeform (in Limitierung WH)	-	3024	0.98	0.98	1.04	1.03	0.93	0.99	1	1.05	0.89	1	0.95	1
pnG (in Limitierung WH), VB (in Limitierung Skelett)	-	3024	0.98	0.98	1.04	1.03	0.93	0.99	1	1.05	0.89	1	0.95	1
Humus OB (in Limitierung WH)	-	3024	0.99	0.96	1	1	1	1	1	1	1.19	0.4	1	1
Humus OB (in Limitierung WH)	Limitierung Humus	3024	0.98	0.96	1	1	1	0.99	1.01	1	1.19	0.4	1	1
pnG, Humus OB (in Limitierung WH), VB (in Limitierung Skelett)	-	3024	0.98	0.96	1	1	1	1	1	1	1.18	0.4	1	1
Limitierungen I, G und R	-	3024	0.99	0.95	1	1.01	0.99	1.01	0.99	1	1.02	0.93	0.92	0.8
Limitierungen I, G, R und Skelett	-	3024	0.95	0.95	1.42	0.95	0.85	1	0.99	1	1.02	0.93	0.92	0.8
pnG (in Limitierung WH), Limitierungen I, G, R und Skelett	-	3024	0.95	0.95	1.42	0.95	0.85	1	0.99	1.01	1.01	0.93	0.92	0.8
pnG, Humus OB, Geländeform (in Limitierung WH), VB (in Limitierung Skelett)	-	3024	0.96	0.94	1.04	1.03	0.93	0.99	1	1.05	1.08	0.4	0.95	1
Limitierung Textur	-	3024	0.76	0.9	1.9	1.15	0.99	0.52	1.23	0.7	0.74	1	1	1
Limitierungen Skelett, Textur, I, G, R,	-	3024	0.71	0.85	2.41	1.08	0.81	0.53	1.22	0.7	0.77	0.93	0.92	0.8
pnG (Limitierung WH), Limitierungen Skelett, Textur, I, G, R,	-	3024	0.71	0.85	2.41	1.08	0.81	0.53	1.22	0.71	0.75	0.93	0.92	0.8
pnG, Geländeform (Limitierung WH), Limitierungen Skelett, Textur, I, G, R,	-	3024	0.68	0.82	2.52	1.14	0.65	0.5	1.24	0.75	0.64	0.93	0.87	0.8
pnG, Humus OB (Limitierung WH), Limitierungen Skelett, Textur, I, G, R,	-	3024	0.69	0.79	2.41	1.08	0.81	0.53	1.22	0.71	1	0.17	0.92	0.8
pnG, Humus OB, Geländeform (Limitierung WH), Limitierungen Skelett, Textur, I, G, R	-	3024	0.66	0.77	2.52	1.14	0.65	0.5	1.24	0.75	0.88	0.17	0.87	0.8
WHG (in Limitierung WH)	-	3024	0.88	0.73	1.05	1.09	0.85	1.06	1.14	1.01	0.8	0.33	0.08	0.7
-	Limitierung Interaktionen	433	0.88	0.7	0	0.98	1	0.6	1.07	0.94	3.17	NA	NA	NA
Limitierung WH	-	3024	0.82	0.69	1.33	1.1	0.93	0.91	1.23	0.96	0.64	0.33	0.08	0.7

Tabelle 12. Verschiedene Vereinfachungsvarianten NEK-ZH mit Scores. (WH = Wasserhaushalt)

Weggelassen	Hinzugefügt aus NEK-FAL	n	Trefferquote	Gerrity Score	biasNEK1	biasNEK2	biasNEK3	biasNEK4	biasNEK5	biasNEK6	biasNEK7	biasNEK8	biasNEK9	biasNEK10
Hangneigung (in Limitierung Interaktionen)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geländeform (in Limitierung Interaktionen)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Textur OB (in Limitierung Interaktionen)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Textur OB, UB (in Limitierung Interaktionen)	-	3024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pnG, I, G, R (in Limitierung WH)	-	2997	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DD (in Limitierung WH)	-	3024	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Limitierung pH	-	3024	0.99	1	1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geländeform (in Limitierung WH)	-	3024	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1
Limitierung Geländeform	-	3024	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
PU, PT (in Limitierung Humus)	-	3024	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mächtigkeit UB (in Limitierung Humus)	-	3024	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Limitierung Humus	-	3024	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Limitierungen Humus und Geländeform	-	3024	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Limitierungen pH und Humus	-	3024	0.98	0.99	1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Limitierungen pH und Geländeform	-	3024	0.98	0.99	1.1	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Limitierungen pH, Humus und Geländeform	-	3024	0.98	0.99	1.1	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
pnG, I, G, R (in Limitierung WH), Limitierungen pH, Humus und Geländeform	-	2997	0.98	0.99	1.1	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Textur OB, UB, Geländeform (in Limitierung Interaktionen) Limitierungen pH, Humus und Geländeform	-	3024	0.98	0.99	1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Limitierung Interaktionen	-	3024	0.97	0.99	1.2	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Limitierungen Humus und Interaktionen	-	3024	0.97	0.99	1.2	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1

Limitierungen pH und Interaktionen	-	3024	0.96	0.99	1.3	0.9	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Limitierung Skelett	-	3024	0.95	0.99	1.4	0.9	1.1	0.9	0.9	1	1	1	1	1
WHG (in Limitierung Textur)	-	3024	0.97	0.98	1	1	1	1.2	1	0.9	1	1	1	1
-	Limitierungen I, G und R	3024	0.97	0.98	0.9	1.1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1
Limitierungen Geländeform und Interaktionen	-	3024	0.97	0.98	1.2	1	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Geländeform (in Limitierung WH), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.97	0.98	1.1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1
pnG, I, G, R, Geländeform (in Limitierung WH), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3019	0.97	0.98	1.1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1
Limitierungen pH, Humus, Interaktionen	-	3024	0.96	0.98	1.3	0.9	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Limitierungen pH, Geländeform, Interaktionen	-	3024	0.96	0.98	1.3	0.9	1	1	1	1	0.9	1	1	1
Textur UB (in Limitierung WH)	-	3024	0.95	0.98	1	1	1.4	0.7	0.9	1	1	1	0.9	1
Limitierungen Humus und Skelett	-	3024	0.95	0.98	1.4	0.9	1.1	0.9	0.9	1	1	1	1	1
Limitierungen pH und Skelett	-	3024	0.94	0.98	1.5	0.8	1.1	0.9	0.9	1	1	1	1	1
Limitierungen Geländeform und Skelett	-	3024	0.94	0.98	1.4	0.9	1.1	0.9	0.9	1	0.9	1	1	1
Limitierungen pH, Humus, Skelett	-	3024	0.94	0.98	1.5	0.9	1.1	0.9	0.9	1	1	1	1	1
Hangneigung, Geländeform (in Limitierung Interaktionen)	-	3024	0.93	0.98	1	1	1	1	0.8	0.8	1.5	1	1	1
Limitierungen pH, Geländeform, Skelett	-	3024	0.93	0.98	1.6	0.8	1.1	0.9	0.9	1	0.9	1	1	1
ZL (in Limitierung Interaktion)	-	3024	0.96	0.97	1	1	1	1	1.1	1	1	1	1	1
Limitierungen pH, Interaktion, Skelett	-	3024	0.91	0.97	1.7	0.8	1.1	0.9	0.9	1	0.9	1	1	1
Limitierungen pH, Humus, Geländeform, Interaktion, Skelett	-	3024	0.91	0.97	1.8	0.8	1.1	0.9	0.9	1	0.9	1	1	1
Limitierung Textur	-	3024	0.8	0.92	1.5	0.9	1.2	1	2	0.4	0.9	1	1	1
WHG (in Limitierung WH)	-	2836	0.89	0.83	1.1	1	0.9	0.9	1.2	1.1	0.8	0.9	0.9	0.6
Limitierung pH, Humus, Geländeform, pnG,	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1	1.2	0.2	0.9	0

I, G, R, DD (in Limitierung WH), Geländeform, ZL, Textur (in Limitierung Interaktion)															
DD (in Limitierung WH), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1.1	1.1	0.2	1	0	
pnG, I, G, R, DD (in Limitierung WH), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1.1	1.1	0.2	0.9	0	
pnG, I, G, R, DD, Geländeform (in Limitierung WH), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1.1	1.1	0.2	0.9	0	
DD, Geländeform (in Limitierung WH), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1.1	1.1	0.2	0.9	0	
pnG, I, G, R, DD (in Limitierung WH), Textur OB, UB, Geländeform (in Limitierung Interaktion), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1	1.2	0.2	0.9	0	
pnG, I, G, R, DD (in Limitierung WH), Textur OB, UB, Hangneigung (in Limitierung Interaktion), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.93	0.77	1.1	1	1	1	1	1.1	1.2	0.2	0.9	0	
pnG, I, G, R, DD, Geländeform (in Limitierung WH), WHG (in Limitierung Textur), PT, PU, Mächtigkeit UB (in Limitierung Humus), Geländeform, ZL (in Limitierung Interaktion)	-	3024	0.92	0.76	1	1	1	1.2	1	0.9	1.2	0.2	0.9	0	
pnG, I, G, R, DD (in Limitierung WH), ZL (in Limitierung Interaktion), Limitierungen Humus, pH, Geländeform	-	3024	0.89	0.74	1.2	0.9	1	1	1	1.1	1.1	0.2	0.9	0	
Limitierung WH	-	3024	0.62	0.44	1.7	2	0	0.4	1.1	1.1	0.3	0	0	0	