



Evaluation Bodenfeuchtemessnetze

Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und
Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU) Abteilung Boden und Biotechnologie CH-3003 Bern
Datum	21.07.2016
Aktuelle Version	Version 1.1: Schlussbericht mit Ergänzungen
Ältere Versionen	21.01.2016 Zwischenbericht 30.04.2016 Schlussbericht
Projektnummer	15_073
Datei	Bericht_Evaluation_Bodenfeuchtemessnetze_v1.1
Autorinnen	Eva Stehrenberger und Barbara Huguenin-Landl
Kontrolliert durch	29.04.2016 Christoph Schilter
Genehmigt durch	29.04.2016 Beat Schaffner
Begleitung BAFU	Ruedi Stähli, Fabio Wegmann
Hinweis	Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht "Evaluation Bodenfeuchtemessnetze" gibt einen Überblick über die verfügbaren **Messmethoden** der Bodenfeuchte (Kapitel 3), die heute existierenden Bodenfeuchte-**Messnetze** in der Schweiz, deren Betreiber und ihren Anforderungen (Kapitel 4). Die erwarteten Nutzer der Bodenfeuchtemessungen wurden mit Hilfe einer Umfrage überprüft und deren zukünftige Anforderungen und Erwartungen an ein "**ideales Bodenfeuchte-Messnetz**" analysiert und zusammengefasst (Kapitel 5). Der Bericht zieht Bilanz aus den Umfrageergebnissen und zeigt auf, wo Handlungsbedarf besteht. Die für die Realisierung des idealen Messnetzes nötigen Ausbauschritte wurden analysiert und die damit verbundenen **Kosten** grob geschätzt (Kapitel 6).

Heute bestehen in der Schweiz verschiedene, sehr heterogene Bodenfeuchte-Messnetze. Praktisch alle Betreiber wünschen eine vermehrte Zusammenarbeit oder Vernetzung der verschiedenen Messnetze. Besonders häufig wird als Form der Vernetzung eine **zentrale Plattform** genannt, worauf alle Messwerte der Schweiz im Überblick eingesehen werden können. Ein zweiter wichtiger Punkt ist die **Standardisierung** der Methodik und Verbesserung der Datenvergleichbarkeit.

Bezüglich Messmethoden zeigte sich im Hinblick auf ein ideales Messnetz, dass für genaue, kontinuierliche Messungen mit aussagekräftigen Daten **Kombinationsmessungen** einerseits mit Tensiometern und andererseits mit TDR-Sensoren oder kapazitiven dielektrischen Sensoren sehr empfehlenswert, wenn nicht unabdingbar sind.

In der zweiten Phase des Projekts wurde für jede einzelne Nutzergruppe aus den vorliegenden Ergebnissen ein **Anforderungskatalog** an ein nutzergruppenspezifisches **ideales Messnetz** erstellt:

- **Hydrologie und Naturgefahren:** Die bestehenden Messungen sind ungenügend. Alpen und Voralpen sind für gravitative Naturgefahren besonders kritisch. Dies betrifft insbesondere Höhenlagen zwischen 800 und 1500 m. ü. M. Nur gerade 15 Messstationen sind heute im fragten Bereich. Regionen mit potentieller Trockenheit sind aktuell nur spärlich abgedeckt.
- **Bodenschutz:** Die Variabilität der Böden und Vegetation ist sehr gross. Deshalb ist es mit einem punktuellen Messnetz nicht möglich, genaue Angaben über sämtliche Böden in einem grossen Gebiet zu machen. Neben einer genügenden Anzahl Stationen in repräsentativen Bodentypen ist es wesentlich, dass die Eigenschaften der Böden und der Vegetation bekannt sind, um Messungen auf andere Standorte übertragen zu können. Kombinationsmessungen sind notwendig, um kritische Situationen (z.B. komplett durchnässter Boden) besser erfassen zu können.
- **Landwirtschaft:** Aktuelle Messnetze sind für die Fragestellung der "Befahrbarkeit" und nicht für die Landwirtschaft ausgelegt. Es ist für die Landwirt-

schaft zurzeit nicht möglich, bestehende Systeme im Rahmen der Bewässerung zu nutzen. Mit genauen Informationen über Boden, Vegetation und Niederschlag bei den Messstationen ist eine Interpretation und Nutzung für die Landwirtschaft besser möglich.

- **Meteorologie und Klimatologie:** Die langfristige Finanzierung und Qualitätssicherung des bestehenden Messnetzes (SwissSMEX) ist essentiell, aber nicht gesichert. Eine bessere Abdeckung von Regionen, welche in Zukunft potentiell trockener werden und von Gebieten, welche ausgeprägte Topografien aufweisen ist wichtig. Zudem sollten mehr Vegetationstypen abgedeckt werden.

Es wird skizziert, wie durch eine Weiterführung der bisherigen Messnetze, eines gezielten Ausbaus von Stationen für eine Standardisierung und qualitativ bessere Messungen sowie eines Zubaus weiterer Stationen pro Nutzergruppe ein ideales Messnetz aufgebaut werden kann.

Der Ausbau und Betrieb der heutigen Messnetze zu einem **nutzerübergreifenden idealen Messnetz** kostet gemäss den erarbeiteten Anforderungen und Schätzungen im Aufbau rund 10 Mio. CHF und im jährlichen Betrieb rund 2 Mio. CHF.

Inhalt

1	Einleitung	8
1.1	Ausgangslage	8
1.2	Auftrag und Ziele.....	9
2	Vorgehen	11
2.1	Messmethoden der Bodenfeuchte	11
2.2	Bestehende Messnetze.....	11
2.3	Nutzergruppen und ihre Ansprüche	11
2.4	Ideales Bodenfeuchte-Messnetz	11
3	Messmethoden der Bodenfeuchte.....	12
3.1	Überblick über die verschiedenen Messmethoden	13
3.2	In der Schweiz verwendete Messmethoden	14
3.3	Potential für die Frage der Wasserknappheit	14
4	Bestehende Messnetze.....	15
4.1	Betreiber bestehender Messnetze	15
4.2	Übersicht bestehender Messnetze	15
4.3	Resultate der Befragung der Messnetz-Betreiber.....	20
4.3.1	Zweck der Messungen und Nutzung der Messdaten	20
4.3.2	Auswahl der Sensoren und Standorte	22
4.3.3	Kosten des Betriebs	23
4.3.4	Beurteilung der eigenen Messdaten und zusätzliche Wünsche ...	23
4.3.5	Bekanntheit anderer Messnetze	24
4.3.6	Wunsch nach Zusammenarbeit	25
5	Nutzergruppen und ihre Ansprüche	26
5.1	Nutzergruppen	26
5.2	Resultate der Befragung von potentiellen Nutzern	28
5.2.1	Nutzung und Bedeutung von Bodenfeuchte-Daten	28
5.2.2	Bekanntheit der bestehenden Messnetze	29
5.2.3	Räumliches Interessensgebiet.....	30
5.2.4	Beurteilung der bestehenden Messungen und zusätzliche Anforderungen.....	32
6	Ideales Bodenfeuchte-Messnetz.....	34
6.1	Ideales Messnetz für den Bereich Hydrologie und Naturgefahren.....	36
6.2	Ideales Messnetz für den Bereich Bodenschutz.....	40
6.3	Ideales Messnetz für den Bereich Landwirtschaft	42
6.4	Ideales Messnetz für den Bereich Meteorologie/Klimatologie.....	45
6.5	Ideales Messnetz für den Bereich Naturschutz	49
6.6	Ideales Messnetz für den Bereich Forstwirtschaft	49
6.7	Ideales nutzergruppenübergreifendes Messnetz.....	50

7	Diskussion und Schlussfolgerungen	51
7.1	Messmethoden der Bodenfeuchte	51
7.2	Bestehende Messnetze.....	51
7.3	Nutzergruppen und ihre Ansprüche	52
7.4	Ideales Bodenfeuchte-Messnetz	52
8	Literaturverzeichnis	54
9	Anhang	56
9.1	Verschiedene Messmethoden.....	56
9.2	Fragebogen Messnetz-Betreiber	59
9.3	Fragebogen Nutzer	59
9.4	Antworten Befragung Betreiber ("Liste_Messstationen.xlsx" als Beilage, Antworten der Umfrage auf Anfrage).....	59
9.5	Antworten Befragung Nutzer (auf Anfrage)	59

Tabellen

Tabelle 1:	Betreiber und Auskunftspersonen der bestehenden Messnetze. .	15
Tabelle 2:	Erfüllung der Anforderungen der jeweiligen Messnetze.	21
Tabelle 3:	Bekanntheit der Messnetze bei anderen Messnetz-Betreibern.	24
Tabelle 4:	Erwartete Nutzergruppen und deren Anwendungsansprüche gemäss Pflichtenheft.	26
Tabelle 5:	Von den Nutzenden als bekannt aufgeführte Messnetze.	30
Tabelle 6:	Annahmen zu Kosten Sensoren.	34
Tabelle 7:	Annahmen zu Kosten Bau/Ergänzung von Stationen.	35
Tabelle 8:	Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für hydrologische Zwecke.....	39
Tabelle 9:	Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für Zwecke des Bodenschutzes.	42
Tabelle 10:	Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für landwirtschaftliche Zwecke.....	45
Tabelle 11:	Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für Meteorologie/Klimatologie.	49
Tabelle 12:	Grobe Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für ein ideales nutzergruppenübergreifendes Messnetz.....	50
Tabelle 13:	Übersicht über die Messmethoden der Bodenfeuchte.	56

Abbildungen

Abbildung 1: Übersichtskarte der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze in der Schweiz nach Betreibern (Stand: Dezember 2015).	16
Abbildung 2: Klimaeignungskarte - Niederschlagshaushalts.	17
Abbildung 3: Übersichtskarte der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze in der Schweiz nach Messmethode.	17
Abbildung 4: Anzahl der Messstationen (von total 108 aktiven), an welchen die Saugspannung, der Wassergehalt oder beides gemessen wird...18	
Abbildung 5: Übersichtskarte der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze in der Schweiz nach automatischer und manueller Messung.....	18
Abbildung 6: Anzahl der Umfrageteilnehmenden aufgeteilt nach Nutzergruppen (Fachgebieten).	27
Abbildung 7: Einstufung der Wichtigkeit von Bodenfeuchte-Daten für die eigene Arbeit auf einer Skala von 1 bis 4.	28
Abbildung 8: Bekanntheit der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze als Antwort auf die Frage, ob Messnetze für Bodenfeuchte bekannt sind.....	29
Abbildung 9: Das jeweils <i>grösste</i> Gebiet, wofür Interesse an Bodenfeuchte-Daten besteht.	31
Abbildung 10: Das jeweils <i>kleinste</i> Gebiet, wofür Interesse an Bodenfeuchte-Daten besteht.	31
Abbildung 11: Einschätzung der vorhandenen Messdaten als genügend.....	32
Abbildung 12: Bodeneignungskarte – Wasserspeicherung.....	36

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die wichtigste Ressource der Land-, Forst- und Bauwirtschaft ist der Boden. Er dient als Grundlage der Vegetation, als Wasserfilter, als Bauland und auch als Habitat vieler Lebewesen. In der Schweiz ist die Ressource Boden knapp. Im Nationalen Forschungsprogramm NFP 68 wird zurzeit eine Strategie zur nachhaltigen Bodennutzung erarbeitet.

Als Folge der Klimaveränderung wird in Zukunft unter anderem **zunehmende Trockenheit** erwartet. Dies kann negative Konsequenzen auf Umwelt und Wirtschaft haben. Denkbar sind unter anderem ein zunehmender Bedarf an Bewässerung, nötige Anpassungen in der Landwirtschaft, tiefere Grundwasserspiegel, eine erhöhte Waldbrandgefahr oder eine verminderte Energieproduktion der Wasserkraftwerke.

Eine vermehrt auftretende Trockenheit bedeutet Anpassungen in der Wasserressourcenbewirtschaftung. Das Forschungsprogramm NFP 61 zur nachhaltigen Wassernutzung erwartet zunehmende Nutzungskonflikte. Nationalrat Hansjörg Walter hat daher 2010 mit einem Postulat einen Bericht zur nachhaltigen Wasserstrategie in der Schweiz verlangt (Walter 2010).

Der Bundesrat hat 2012 einen Bericht zum Postulat Walter verabschiedet. Darin hält er fest, dass die Schweiz heute und voraussichtlich auch in Zukunft über genügend Wasser verfügt (UVEK 2012). Allerdings ist in Zukunft auch in der Schweiz vermehrt damit zu rechnen, dass langandauernde sommerliche Trockenperioden auftreten, während denen es zeitlich beschränkt lokal oder regional zu Wasserknappheit kommen kann.

Der Anteil des Wassers im Boden wird **Bodenfeuchte** genannt. Die Bodenfeuchte spielt beim Austausch von Wasser und Energie zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Unter anderem werden Lufttemperatur und Niederschlag von ihr beeinflusst (Mittelbach und Seneviratne, Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz) - Zusatzkapitel Bodenfeuchte 2015). Die Bodenfeuchte reagiert beispielsweise verzögert auf starke Niederschläge, während ein feuchter Boden seinerseits den Temperaturanstieg bei einer Hitzewelle verlangsamt. Dieser Effekt wird auch als das "Gedächtnis der Bodenfeuchte" bezeichnet (soil moisture memory).

Auf Grund dieses Gedächtnisses beeinflusst die Bodenfeuchte die Dauer und Ausprägung einer Hitzewelle. Jaeger und Seneviratne (2011) stellten fest, dass die jährlichen Unterschiede der Bodenfeuchte 10–40% der Temperaturanomalie einer Hitzewelle erklären können. Die Dauer einer Hitzewelle wird bis zu 10% von der Bodenfeuchte beeinflusst (Lorenz, Jaeger und Seneviratne 2010).

Um bei der Nutzung der Wasserressourcen vorausschauend handeln zu können, sind möglichst flächendeckende Informationen über die Bodenwassersituation von grosser Wichtigkeit (UVEK 2012).

Nicht nur Trockenheit des Bodens kann problematisch sein. Auch nasse Böden stellen eine Herausforderung dar. Die Bau- und Landwirtschaft ist verpflichtet, den Boden schonend zu nutzen, um quantitative und qualitative Beeinträchtigungen gering zu halten. Im Umweltschutzgesetz ist festgehalten, dass die Bodenbelastung die Fruchtbarkeit nicht nachhaltig beeinträchtigen darf (USG 2015, Art. 33). Insbesondere das Befahren oder Bewegen von nassem Boden führt zu **Bodenverdichtung** und damit zu Qualitätsverlust. Auf verdichteten Böden ist zum Beispiel das Pflanzenwachstum eingeschränkt.

Um eine schonende Bodennutzung sicherzustellen und damit die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten, sind ebenfalls möglichst verbreitete Informationen über die Bodenfeuchte notwendig. Das Wissen über die Wassersättigung des Bodens kann überdies in der Hochwasserprognose genutzt werden. So kann zum Beispiel ein gesättigter Boden keine zusätzlichen Niederschläge mehr aufnehmen, der Niederschlag gelangt vollständig in den Abfluss und lässt Bäche und Flüsse anschwellen.

Die Wichtigkeit von aktuellen Informationen zur Bodenfeuchte ist eindeutig. Heute verfügt die Schweiz allerdings über keine flächendeckenden Bodeninformationen. Der Niederschlag wird zwar an über 500 Stationen in der ganzen Schweiz gemessen, an rund 255 davon automatisch alle 10 Minuten¹, an den übrigen täglich. Die Menge des Wassers im Boden wird hingegen nur punktuell von einigen sehr unterschiedlich ausgestalteten Messnetzen erfasst. Für die langfristige Beobachtung der Bodenfeuchte gibt es zurzeit auch keine gesetzliche Grundlage.

1.2 Auftrag und Ziele

Der Bericht des Bundesrats (UVEK 2012) verlangt die Überprüfung einer Überführung des bestehenden Forschungs-Messnetzes SwissSMEX in ein nachhaltiges Monitoring-Netz für Bodenfeuchte für eine langfristige Sicherung der bereits bestehende Messreihen.

Um die Frage nach der Notwendigkeit eines schweizweiten Messnetzes umfassend beantworten zu können, werden im vorliegenden Bericht weitere bestehende Bodenfeuchte-Messnetze evaluiert.

Die **Evaluation bestehender Messnetze** umfasst gemäss Pflichtenheft:

- eine Zusammenstellung aller Messnetze im Bereich Bodenfeuchte

¹ aktuelle Liste unter <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html>

- eine Einschätzung über die mögliche Generalisierung und Repräsentativität deren Ergebnisse
- einen Vergleich verschiedener Messmethoden bezüglich ihrem Potential für die Frage der Wasserknappheit
- Informationen zu Datenmanagement, harmonisierte Datenmodelle, digitale Verfügbarkeit der Messungen
- zudem eine Überprüfung der erwarteten Nutzer von Bodenfeuchte-Messdaten, sowie ihre Erwartungen an ein Bodenfeuchte-Messenetz
- dadurch die Klärung, ob die Bedürfnisse der Nutzer mit den bestehenden Messnetzen erfüllt werden

Die Annahme, dass ein **Ausbau der Messnetze** nötig ist, wird durch die Befragung der verschiedenen Nutzergruppen geprüft. In einem nächsten Schritt wird daraus:

- ein Anforderungskatalog für ein flächendeckendes Messnetz erarbeitet (am Expertentreffen zur Diskussion des Zwischenberichts wurde dieser Punkt folgendermassen angepasst: ein Anforderungskatalog für eine Messnetzerweiterung für die einzelnen Nutzergruppen)
- der Umfang einer Erweiterung der Messnetze festgelegt, womit die Anforderungen erfüllt werden können
- sowie eine Kostenschätzung für den Weiterbetrieb der bestehenden Messnetze einerseits und Einrichtung und Betrieb eines erweiterten Messnetzes andererseits erstellt.

2 Vorgehen

2.1 Messmethoden der Bodenfeuchte

Als erster Schritt wurde eine Literaturrecherche zu den verschiedenen Messmethoden gemacht sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden beschrieben (Kapitel 3). Da sich die Messmethoden in der Schweiz im Wesentlichen auf zwei Hauptmethoden beschränken, werden diese beiden näher beschrieben.

2.2 Bestehende Messnetze

Um die zurzeit bestehenden Messnetze der Bodenfeuchte in der Schweiz zusammenzustellen, wurden zunächst bekannte und dokumentierte Messnetze recherchiert. Den Betreibern dieser Messnetze wurde eine Liste mit den dokumentierten Messstationen zur Kontrolle und für Ergänzungen verschickt (s. Beilage "Liste_Messstationen.xlsx"). Dazu erhielten sie per E-Mail eine Umfrage mit einem Dutzend weiterer Fragen zu ihrem Messnetz. Die Umfrage für die Messnetze befindet sich im Anhang 9.4. Die Betreiber, Messnetze und Umfrageergebnisse sind in Kapitel 4 zusammengestellt.

2.3 Nutzergruppen und ihre Ansprüche

Für die Überprüfung der erwarteten Nutzer von Bodenfeuchte-Messdaten wurde für jede Nutzergruppe eine Person aus der Expertengruppe des Projekts "Konzept Bodeninformationssystem (KOBI)" oder weiteren relevanten Gremien kontaktiert und um eine Liste mit möglichen Nutzern gebeten. Somit sollte erreicht werden, möglichst viele Personen in der Schweiz zu erreichen, für welche in ihrem Fachgebiet Bodenfeuchte ein relevanter Parameter ist.

Ein Online-Fragebogen (s. Anhang 9.3) wurde in deutscher und französischer Sprache verfasst und alle aufgeführten potenziellen Nutzer wurden aufgefordert, daran teilzunehmen. Die Umfrageergebnisse sind in Kapitel 5 zusammengestellt.

2.4 Ideales Bodenfeuchte-Messnetz

Am Expertentreffen zur Diskussion des Zwischenberichts wurde dieser Punkt neu formuliert. Zusätzlich zu den Anforderungen jeder Nutzergruppe an ein Bodenfeuchtemessnetz sollte dargestellt werden, welche Erweiterungen für die jeweilige Nutzergruppe notwendig sind, damit die "Grundbedürfnisse" erfüllt sind.

Teilweise waren diese Informationen mit dem Fragebogen unzureichend vorhanden. Ausgewählte Experten (als Repräsentanten für die einzelnen Nutzergruppen) wurden um zusätzliche Informationen angefragt. Auf dieser Basis wurden die Anforderungen definiert und die entsprechenden Kosten geschätzt (Kapitel 6).

3 Messmethoden der Bodenfeuchte

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Grössen für die Messung Bodenfeuchte, welche (direkt oder meist indirekt) bestimmt werden.

Einerseits kann der gesamte **Bodenwassergehalt** bestimmt werden. Er beinhaltet sowohl bewegliches Bodenwasser (Sickerwasser) als auch Haftwasser, das in den Poren gegen die Schwerkraft festgehalten wird. Der Wassergehalt fliesst als Grösse in hydrologische und klimatologische Modelle ein, wenn die gekoppelten Prozesse von Energie- und Wasseraustausch zwischen Boden und Atmosphäre untersucht werden.

Der Bodenwassergehalt wird in kg/m^3 (gravimetrisch) oder m^3/m^3 bzw. % (volumetrisch) angegeben. Diese beiden Grössen lassen sich mit der Dichte des Wassers umrechnen.

Die zweite Messgrösse, die häufig bestimmt wird, ist das **Matrixpotential**. Es beschreibt die Energieverhältnisse im Porenwasser des Bodens. Dabei wird gemessen, mit welcher Kraft die Poren im Boden das Wasser gegen die Schwerkraft festhalten. Diese Kraft (physikalisch ein Unterdruck) wird **Saugspannung** genannt. Die Saugspannung entspricht der Kraft, welche Pflanzen aufbringen müssen, um dem Boden Wasser entziehen zu können. Mit zunehmendem Unterdruck wird die Bodenmatrix besser stabilisiert. Daher ist die Saugspannung auch ein Mass für die mechanische Belastbarkeit des Bodens.

Die Saugspannung wird in Druckeinheiten gemessen. Oft wird die Einheit cbar verwendet, was Zahlen im praktischen ein- bis zweistelligen Bereich ergibt.

Die **Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential** ist eine charakteristische Eigenschaft des Bodens und wird als Boden-Wasser-Charakteristik bezeichnet (Gisi, et al. 1997). Die Wassermenge, die bei einem bestimmten Matrixpotential an einem Ort in einem Boden vorliegt, ist vom Porenvolumen und von der Porengrössenverteilung abhängig. Der Verlauf der Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential bzw. Wasserspannung ist daher für jeden Bodenhorizont und jede Schicht charakteristisch und wird als Matrixpotentialkurve bezeichnet. Die Matrixpotentialkurve stellt einen idealisierten Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Matrixpotential dar (Scheffer/Schachtschabel 2010). Die Matrixpotentialkurve ist nicht nur von Körnung und Gefüge bzw. Spannungszustand abhängig, sondern auch von der Richtung der Wassergehaltsänderung. Bei gleichem Wassergehalt unterscheidet sich nämlich das Matrixpotential bei Entwässerung bzw. Bewässerung des Bodens; es besteht eine Hysterese. Aus diesem Grund ist es für die praktische Anwendung nur bedingt möglich, diese Beziehung zwischen den beiden Messgrössen zu nutzen. Um die jeweilige Matrixpotentialkurve eines Bodens zu bestimmen sind viele Zusatzinformationen zu den Bodenbestandteilen (Sand-, Schluff-, Tongehalt und Porenvolumen) notwendig.

3.1 Überblick über die verschiedenen Messmethoden

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte ist eine Vielzahl von Messmethoden zur Bestimmung der Bodenfeuchte eingesetzt worden. Die in der Literatur recherchierten 19 verschiedenen Techniken sind in der Tabelle im Anhang 9.1 aufgeführt. Darin sind Messgrösse, Funktionsweise der Messtechnik und die wichtigsten Vor- und Nachteile aufgelistet.

Während eine gravimetrische Messung als Referenz betrachtet werden kann (beispielsweise für Sensor-Kalibrationen), ist diese Methode für ein kontinuierlich messendes Stationsnetz nicht geeignet, weil sie destruktiv und sehr zeitaufwändig ist und nur einzelne, diskrete Werte liefert.

Von den vielen weiteren Messmethoden sind nur einige wenige bisher für längerfristige Messungen eingesetzt worden. Dabei stehen zwei Typen der Sensorik im Vordergrund: Einerseits die Messungen der **Dielektrizitätskonstante** des Bodens zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes, andererseits die Messung der **Saugspannung** zur Bestimmung des Matrixpotentials.

Die **dielektrischen Methoden** (Time Domain Reflectometry(TDR), Frequency Domain Response(FDR), kapazitive Messung) werden oft eingesetzt und sind gut untersucht. Die Messgeräte liefern in grosser Geschwindigkeit kontinuierlich Werte bei allen Bodenfeuchten; wenn auch mit teils unterschiedlicher Genauigkeit. Grundsätzlich messen TDR-Sensoren den Wassergehalt mit der grössten Genauigkeit. Sie arbeiten bei einer Frequenz, bei der der Imaginärteil (und somit der Fehler) der Dielektrizitätskonstante deutlich kleiner ist als der Realteil. Dies ist allerdings mit entsprechend hohen Gerätekosten verbunden. Günstigere Sensoren messen bei höheren Frequenzen, bei denen der Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante entsprechend grösser ist.

In den letzten Jahren wurden die Mängel bei der Genauigkeit einiger günstiger dielektrischer Sensoren detailliert aufgezeigt (Mittelbach 2011). Besonders unter feuchten Bedingungen (volumetrischer Wassergehalt über 40%), zeigen kostengünstige Messgeräte grosse Abweichungen gegenüber der TDR- oder Wägemessungen. Mittelbach (2011) stellte ebenfalls fest, dass die Laborkalibrierung günstiger kapazitiver Sensoren nicht ausreicht und die Feuchtemessung von Bodencharakteristiken abhängig ist. Dadurch wird eine zusätzliche Kalibrierung vor Ort notwendig. Die Genauigkeit nach Herstellerangaben wird dabei kaum erreicht. Ein untersuchter Sensortyp wies gar eine zweifelhafte Temperaturabhängigkeit auf. Die von Herstellern bereitgestellte Korrekturfunktion reichte nicht aus, um diese zu beheben.

Tensiometer bieten den Vorteil, dass aus den Messungen direkt auf das pflanzenverfügbare Wasser sowie die Belastbarkeit des Bodens geschlossen werden kann. Das System des Bodens in seiner ganzen Komplexität (Schichten, Zusammensetzung) beeinflusst die Werte der Saugspannung. Somit sind zum Beispiel konkrete Aussagen über Trockenstress von Pflanzen möglich, ohne dass die Porengrösse eines Bodenhorizontes bekannt sein muss.

Im Gegenzug dazu sind Tensiometer je nach Verlauf des Sommers (Trockenperioden) nicht in der Lage, kontinuierlich zu messen. Die mit Wasser gefüllte Keramikkerze ist in Kontakt mit dem Boden und gibt bei trockenen Verhältnissen Wasser an den Boden ab. Die Keramikkerze entleert sich und muss nachgefüllt werden. Bei lange andauernden Trockenperioden entleeren sie sich ganz und können erst nach genügender Befeuchtung des Bodens nachgefüllt werden. Für dauerhaft trockene Böden ist eine Messung mit Tensiometern daher nicht möglich. Zudem wird von den Herstellern empfohlen, bei Frostgefahr (je nach Höhenlage und Einbautiefe) die Geräte entweder auszubauen, oder mit Frostschutzmittel zu befüllen. In der Praxis werden Tensiometer im Mittelland das ganze Jahr verwendet, da der Boden nicht bis in die Tiefen der Messungen gefriert.

3.2 In der Schweiz verwendete Messmethoden

Derzeit werden in der Schweiz bei den kantonalen Messnetzen vor allem Tensiometer eingesetzt, um die Saugspannung zu messen. Forschungsmessnetze bestimmen vornehmlich den Wassergehalt mit dielektrischen Methoden und verwenden dazu meist TDR- oder günstigere FDR- oder kapazitive Sensoren.

Weil die Wasserspannungskurve (Verhältnis zwischen Matrixpotential und Wassergehalt) im Feld zu wenig bekannt ist, wird die theoretisch mögliche Umrechnung aus Abschnitt 3.1 kaum eingesetzt. Zurzeit wird daher die Saugspannung gemessen, wenn es um die Frage der Bodenbelastbarkeit oder des pflanzenverfügbaren Wassers geht. Sollen die Wechselwirkungen zwischen Wasser, Boden, Luftfeuchte und Temperatur untersucht werden, wird der absolute Wassergehalt bestimmt.

3.3 Potential für die Frage der Wasserknappheit

Die dielektrischen Messmethoden liefern bei geringer Bodenfeuchte genauere Daten (insbesondere TDR-Sensoren) und können auch bei lange trockenen Böden Werte messen. So scheint es, dass sie besser geeignet sind, um Wasserknappheit zu erkennen oder zu beurteilen. Allerdings sagt ein Wert des absoluten Wassergehalts wenig aus über die Wirkung des trockenen Bodens auf die Vegetation. Stellt sich beispielsweise die Frage nach Wasserknappheit in der Landwirtschaft (Trockenstress der Pflanzen), sind zusätzlich zum Wassergehalt ausführliche Informationen über den entsprechenden Boden notwendig (mineralische Zusammensetzung und Porenvolumen aller Schichten).

Um direkt die Wirkung des geringen Bodenwassergehalts auf die Vegetation beurteilen zu können, sind Messungen der Saugspannung (Tensiometer) von größerem Nutzen. Im Messbereich (zeitliche beschränkter) trockener Böden bis zur Welke der Pflanzen liefern Tensiometer-Messungen bei entsprechender Wartung genügend genaue Werte.

4 Bestehende Messnetze

4.1 Betreiber bestehender Messnetze

Tabelle 1 listet die Betreiber der Messnetze auf. Die Umfrage wurde von den aufgeführten Personen beantwortet.

Tabelle 1: Betreiber und Auskunftspersonen der bestehenden Messnetze.

Messnetz	Betreiber	Auskunftsperson
SwissSMEX	IAC ETH	Dr. Heidi Mittelbach
LFW, Fireless	WSL	Dr. Peter Waldner
SOMOMOUNT	Universität Fribourg	Cécile Pellet
Zentralschweiz	Amt für Umwelt und Energie LU	David Widmer
inNET BAFU Pilot	inNET AG	Dr. Christian Ruckstuhl
OstBoden	Bodenfachstellen der Kantone SG, GR, TG, GL, SH AR und AI sowie Liechtenstein	Roman Sutter Marco Lanfranchi Achim Kayser Julia Stauffacher Iwan Stössel
Kanton ZH	Fachstelle Bodenschutz ZH	Reto Mani
Bodenmessnetz NW-Schweiz	Bodenfachstellen der Kantone SO, BL, AG und ZG	Christine Hauert Daniel Schmutz Dominik Mösch Sibille Jenni
Kanton BE	Amt für Landwirtschaft & Natur BE	Lorenz Ramseier
Kanton UR	Amt für Umweltschutz UR	Harry Ilg
Kanton TI	Ufficio della gestione dei rischi ambientali e del suolo UGRAS	Ulrich Joss, Valentina Togni

4.2 Übersicht bestehender Messnetze

Im November 2015 waren elf verschiedene Messnetze in Betrieb; betreut von 18 verschiedenen, meist kantonalen Stellen. Insgesamt waren 108 Messstationen aktiv, acht inaktiv und acht weitere in Planung. Von den 108 Stationen befinden sich an sieben Standorten jeweils zwei innerhalb weniger Meter.

In dieser Zusammenstellung nicht berücksichtigt sind private Messungen von einzelnen Landwirtschaftsbetrieben oder Baustellen sowie kurzzeitige Forschungsprojekte. Sehr häufig werden diese jedoch nur zeitlich begrenzt und für

lokale Anwendungen installiert und sind somit für diese Evaluation nicht von direkter Bedeutung.

In der Beilage *Messnetze_einzeln.xls* sind die von den Messnetzbetreibern ergänzten detaillierten Informationen zu den einzelnen Messstationen enthalten. Im vorliegenden Abschnitt fassen wir die wichtigsten Informationen zusammen.

In Abbildung 1 sind sämtliche **aktive Stationen der bestehenden Messnetze** auf einer Karte dargestellt. Die unterschiedlichen Symbole repräsentieren die Betreiber der Messnetze.

In Abbildung 2 ist die Stationskarte mit einer Klimaeignungskarte hinterlegt, welche verschiedene Klassen des Niederschlagshaushalts darstellt.

In Abbildung 3 sind die Stationen der bestehenden Messnetze nach **Messgrösse** dargestellt. Messungen der Saugspannung werden mit orangenen Kreisen dargestellt, Stationen, die den Bodenwassergehalt messen, sind durch blaue Kreise repräsentiert und Stationen mit beiden Messmethoden werden durch einen violetten Kreis symbolisiert.

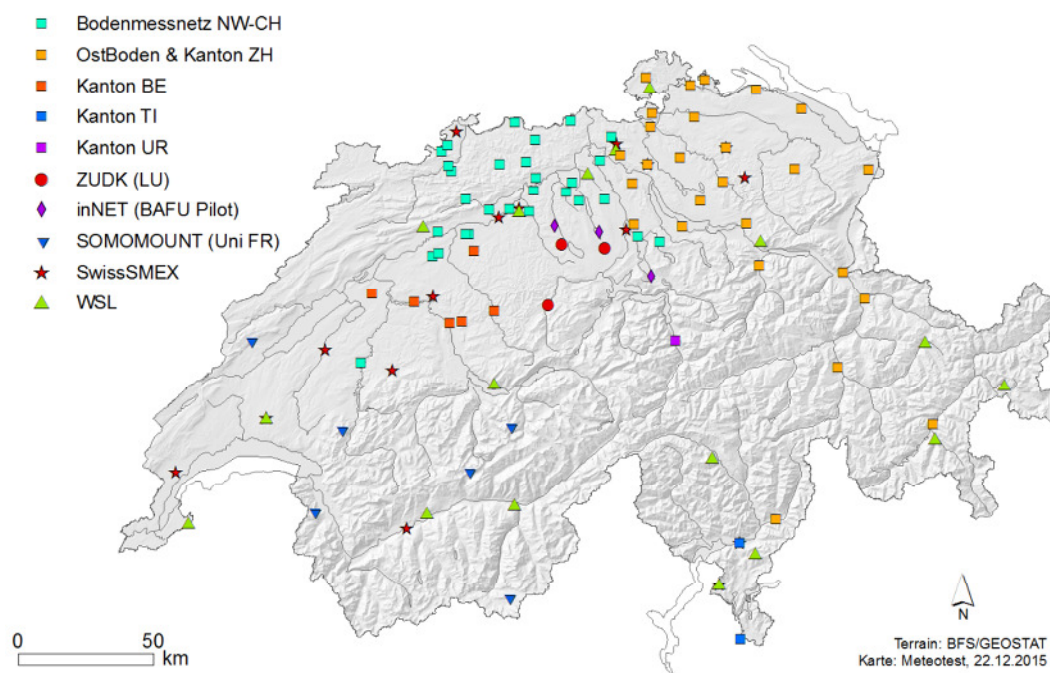


Abbildung 1: Übersichtskarte der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze in der Schweiz nach Betreibern (Stand: Dezember 2015).

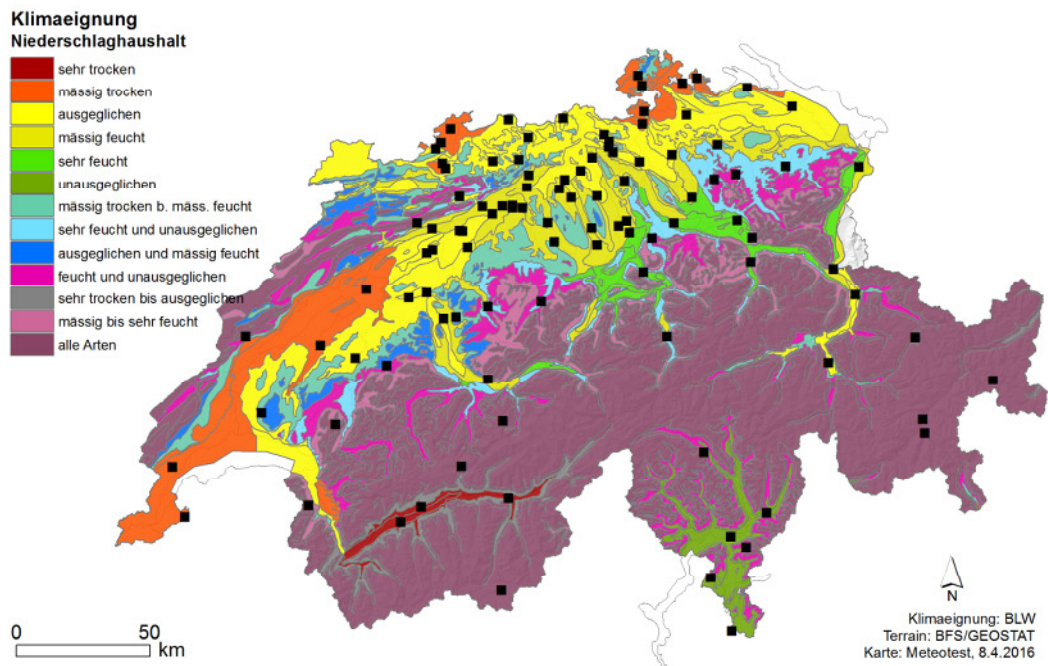


Abbildung 2: Klimaeignungskarte - Niederschlagshaushalts.

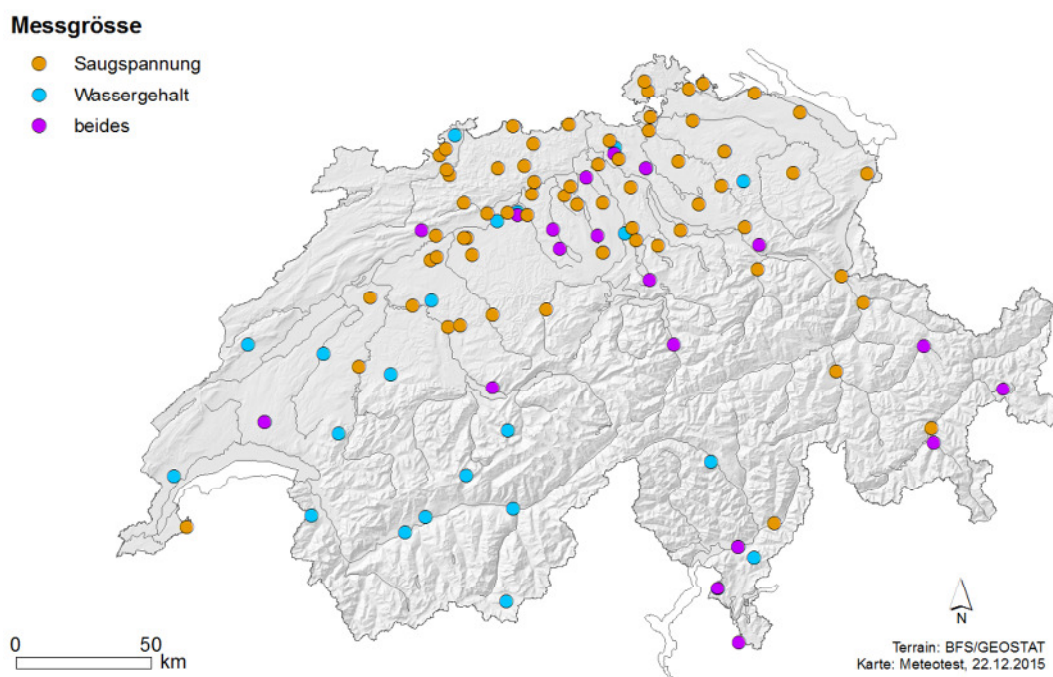


Abbildung 3: Übersichtskarte der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze in der Schweiz nach Messmethode.

Insgesamt wird an 61 Stationen die Bodenfeuchte in mindestens einer Tiefe als Saugspannung gemessen, an 26 Standorten wird der Gesamtwassergehalt bestimmt und an weiteren 19 Stationen werden beide Messgrössen ermittelt. Die Anteile der verschiedenen Messgrössen sind in Abbildung 4 dargestellt.

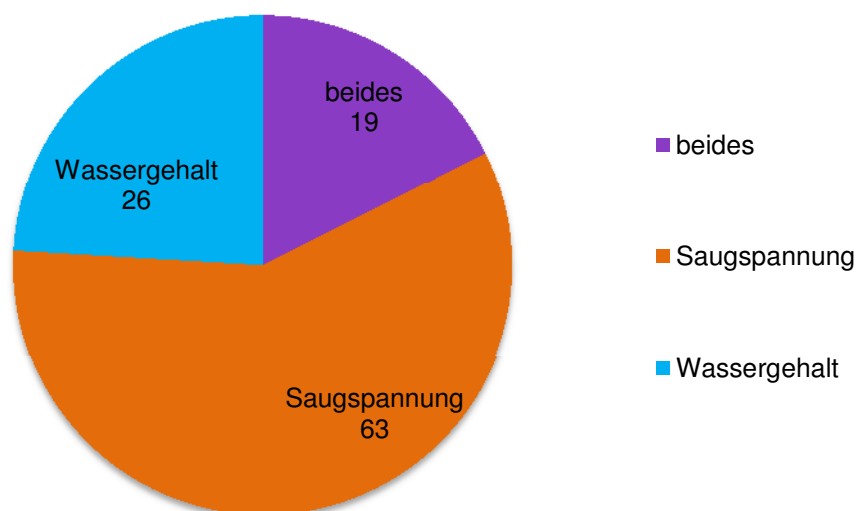


Abbildung 4: Anzahl der Messstationen (von total 108 aktiven), an welchen die Saugspannung, der Wassergehalt oder beides gemessen wird.

In Abbildung 5 sind die Stationen der bestehenden Messnetze nach Betriebsart dargestellt. Automatische Messungen werden mit gelben Quadraten dargestellt, Stationen, wo manuell gemessen wird, sind durch orange Quadrate repräsentiert und Stationen mit beiden Messmethoden werden durch blaue Quadrate symbolisiert.

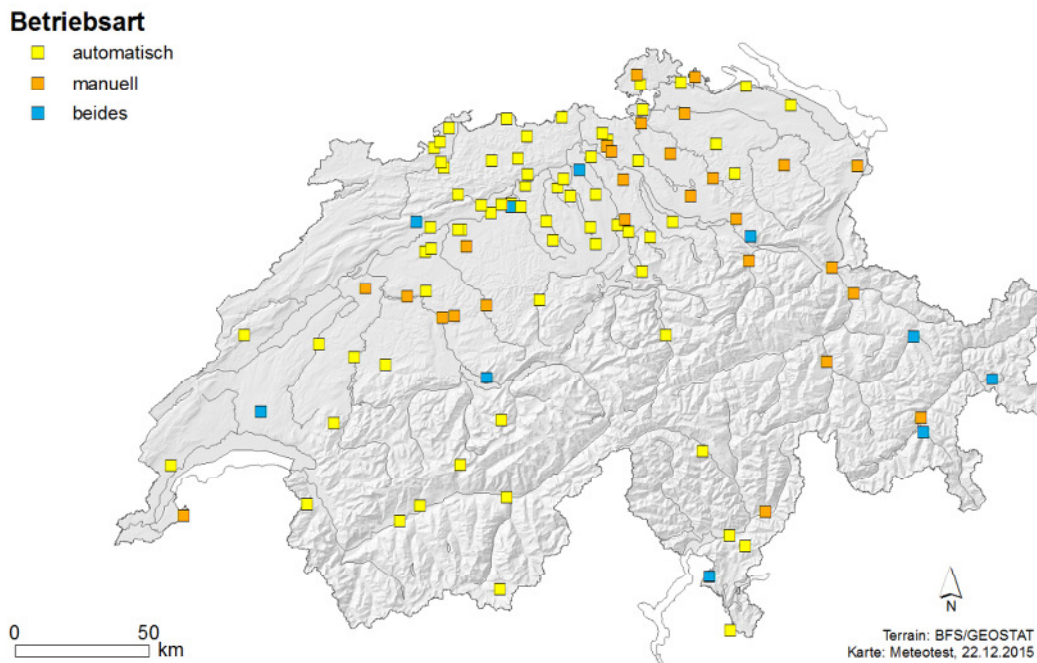


Abbildung 5: Übersichtskarte der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze in der Schweiz nach automatischer und manueller Messung.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass kantonalen Messnetze mehrheitlich die Saugspannung als **Messgrösse** bestimmen. Hierbei messen 60% der eingesetzten Tensiometer automatisch, während rund 40% manuell abgelesen werden. Letzteres sind vor allem Stationen, die vor 2008 erstellt worden sind. Forschungsmessnetze bestimmen eher den absoluten Wassergehalt, der stets automatisch gemessen wird. Hierfür werden verschiedene TDR-/FDR- und auch kapazitive Messgeräte eingesetzt.

Zusätzlich werden an 19 Stationen beide Messgrössen bestimmt: Die WSL misst an elf Standorten sowohl die Saugspannung als auch den Wassergehalt. In der Zentralschweiz sind fünf Stationen mit beiden Messtechniken ausgerüstet (drei des BAFU Pilotprojektes, eine des Kantons LU, die einzige Station des Kantons UR). Ansonsten sind doppelte Messungen eher selten: Der Kanton ZH hat eine seiner elf Stationen mit beiden Sensortypen erstellt. Der Kanton TI betreibt seine beiden Stationen mit Tensiometern und FDR-Sensoren.

Somit wird die Saugspannung an insgesamt 75% der Messstationen erhoben, der Wassergehalt an 45% der Standorte.

Auch die **Messtiefen** unterscheiden sich erheblich: Während einzelne Stationen die Bodenfeuchte nur in einer einzigen Tiefe von 5 cm messen, gibt es Standorte, wo die Messungen in sechs oder sieben Tiefen von 5 cm bis 150 cm durchgeführt werden.

Bedingt durch den Einsatz von manuellen und automatischen Messungen und die verschiedenen Messgeräte unterscheiden sich die **Messintervalle** ebenfalls enorm. Rund die Hälfte der Messungen weist eine zeitliche Auflösung von weniger als einer Stunde auf. Dies sind 10-, 15- oder 30-minütliche Werte (teilweise als Mittel-, teilweise als Momentanwerte). Etwa ein Viertel der Stationen übermitteln stündlich Werte, während ein weiteres Viertel der Stationen nur Werte im Abstand von mehreren Tagen oder Wochen messen. Letzteres trifft ausschliesslich auf manuell abgelesene Messungen zu.

Die Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte, Niederschlag und Lufttemperatur sind für die Ersteller und Betreiber der Bodenfeuchte-Messnetze von grosser Wichtigkeit. Praktisch alle Messstationen haben Sensoren für Niederschlag und Lufttemperatur integriert oder sie wurden so platziert, dass in unmittelbarer Nähe Messungen dieser **meteorologischen Parameter** zur Verfügung stehen. Einzig die älteren manuellen Tensiometer-Stationen im Kanton Bern und der Region Zürich-Ostschweiz verfügen über keine Temperaturmessungen in der unmittelbaren Umgebung. Auch hier wird aber zumindest der Niederschlag erfasst. Rund die Hälfte aller Messstationen erhebt zudem Daten über die Bodentemperatur in mindestens einer Tiefe.

Entsprechend dem Fokus der einzelnen Messnetze wurden die **Standorte** unterschiedlich gewählt. Während ein Grossteil der SwissSMEX Messstandorte den Standorttyp "Wiese" hat, wurden für das LWF-Netz Standorte im Wald ausgewählt. Das SOMOUNT Messnetz der Universität Fribourg untersucht den Einfluss der Feuchte auf thermische Regime und Permafrost und dementsprechend be-

finden sich die Standorte im Gebirge. Die kantonalen Messnetze sind mehrheitlich auf Wiesen positioniert, nur der Kanton Solothurn hat wenige Waldstandorte.

Die Messnetze mit den längsten **Zeitreihen** sind jene des Kantons Bern und des LWF Netzes, deren Anfänge in die späten 90er Jahre zurückreichen. Der weitere grössere Ausbau begann im Jahr 2004 und seither kommen stetig neue Stationen hinzu.

4.3 Resultate der Befragung der Messnetz-Betreiber

Die Antworten der Betreiber-Befragung sind in den folgenden Abschnitten thematisch zusammengefasst.

4.3.1 Zweck der Messungen und Nutzung der Messdaten

Wie die Übersicht gezeigt hat, sind die bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze sehr heterogen ausgestaltet. Einige Unterschiede lassen sich durch die verschiedenen Ziele der jeweiligen Bodenfeuchte-Messungen erklären. Vier **Ziele** werden von den Befragten besonders häufig genannt:

1. Zwölf Betreiber (vor allem Kantone) geben an, Bodenfeuchte zur **Beurteilung und Planung von Maschineneinsätzen** (Befahrbarkeit, Erdbewegungen) für Landwirtschaft und Baustellen zu messen. Dies dient dazu, langfristige Bodenverdichtung und andere Schäden zu verhindern.
2. Drei Betreiber (alle im Bereich Forschung tätig) geben an, Bodenfeuchte vor allem zum Bearbeiten von **Forschungsfragen** klimatologischer Art zu messen. Dabei geht es um Zusammenhänge und Prozesse in den Bereichen Trockenheit und Hitze, Bodenfeuchte und Bodentemperatur (im Bereich Permafrost) oder Ursache–Wirkungen (betreffend Trockenstress von Wald). In der Forschung werden die Bodenfeuchte-Messungen zudem bei der Validierung oder Kalibration von Modellen und Fernerkundungsdaten eingesetzt. Ausserdem geben auch fünf Betreibern von kantonalen Messnetzen an, langfristige Messreihen anzustreben, um beispielsweise das Spektrum in der Region aufzuzeigen und die Abhängigkeit der Bodenfeuchte von meteorologischen Parametern in den verschiedenen gemessenen Böden zu eruieren.
3. Immer wieder wird als Zweck der Messungen auch die **Sensibilisierung und Schulung** für Personen aus der Bau- und Landwirtschaft genannt (acht Betreiber). Damit soll längerfristig bodenschonendes Arbeiten gefördert werden.
4. Weiter werden als Zweck der Daten die Optimierung von **Bewässerung** (2) und die Verbesserung von **Hochwasserprognosen** (1) genannt.

Die **Nutzung der Messdaten** erfolgt in den meisten Fällen über Web-Portale, wo die Daten für Endanwender veröffentlicht werden. 15 Betreiber stellen ihre Messdaten im Internet frei zur Verfügung, ein weiteres Messnetz hat dies geplant. Im

Fall von Saugspannungs-Messungen handelt es sich dabei zumeist um gemittelte, aktuelle Daten (beispielsweise der Median aller Replikationen in einer Tiefe). Einzelne Betreiber bieten auch die Möglichkeit einer Archiv-Abfrage.

Dabei machen die Betreiber unterschiedliche Angaben zu den Datennutzern: Einige Kantone erkennen vor allem die Verwendung der Daten durch Landwirte und schätzen die Verwendung durch die Bauwirtschaft als gering ein. Teils werden die Messungen auch bei der Aus- und Weiterbildung von Landwirten eingesetzt. In anderen Kantonen ist die Nutzung der Bodenfeuchte-Messungen für Baustellen häufiger, auch bodenkundliche Baubegleiter verwenden sie offenbar vermehrt.

Die Forschungsmessnetze stellen ihre Daten teils öffentlich, meist auf Anfrage zur Verfügung. Für einen umfassenden Zugang ist hierbei oft die Zustimmung zu einer Datenvereinbarung notwendig. Möglich ist auch das Einspeisen der Daten in Forschungsdatenbanken. In erster Linie verwenden die Forschenden die Messdaten selber für Studien. Hierbei geht es darum, das Verständnis der Einflussprozesse von Bodenfeuchte grundlegend zu verbessern.

Auf die Frage **"Finden Sie Ihr Messnetz ausreichend** für den angegebenen Zweck?" antworteten die Hälfte der Messnetzbetreiber mit "ja", acht Personen mit "nein" und eine Person konnte diese Frage aufgrund von unzulänglicher Erfahrung noch nicht beantworten. Die Antworten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Erfüllung der Anforderungen der jeweiligen Messnetze.

Messnetz	Ausreichend	Begründung, Zusätzlich Benötigtes/Gewünschtes
Boden Uri	Ja	Evtl. zusätzl. Anlage im Urner Oberland; zurzeit ausreichend.
SwissSMEX	Ja	Interessant wären Messungen in Regionen, die zukünftig noch trockener werden.
OstBoden SG	Nein	Verhältnisse können lokal sehr unterschiedlich sein. Für verlässlichere Auskunft über Bodenfeuchte in 6–8 Bodentypen in mehreren Regionen mit unterschiedlichen Expositionen wären mehr Stationen notwendig.
LANAT BE	Nein	Kontinuierliche Messungen (d.h. Ersatz manuelle durch automatische Messung) wäre wünschenswert. Kanton Bern sieht im Moment keine Notwendigkeit für Messnetzausbau.
inNET	Nein	Nur Test/Pilotstationen
Bodenmessnetz BL	Ja	Ausbau aufgrund von Finanzierungsmöglichkeiten im Moment kein Thema.
OstBoden TG	Nein	Aufgrund der Heterogenität der Böden wäre grössere Anzahl an Stationen notwendig, jedoch zurzeit finanziell und organisatorisch nicht machbar.
OstBoden GL	Ja	Jahresvergleiche sind möglich, Daten können ausgewertet und Empfehlungen abgegeben werden. Evtl. wäre ein Vergleich mit weiteren Stationen im Kanton sinnvoll.

Messnetz	Ausreichend	Begründung, Zusätzlich Benötigtes/Gewünschtes
OstBoden SH	Nein	Zu wenige Standorte, um das breite Spektrum der Bodeneigenschaften abzudecken.
Bodenmessnetz ZG	?	Kann noch nicht beurteilt werden.
SOMOMOUNT	Ja	Das Projekt SOMOMOUNT ist noch am Laufen. Die bereits erhobenen Daten sind jedoch sehr zufriedenstellend und könnten die Kalibrierung von zwei verschiedenen Modellen erheblich verbessern. Wünschenswert wären noch zusätzliche Messungen der Textur und der Zusammensetzung des Bodens, sowie des Wasserwiderstands.
Bodenmessnetz SO	Ja	-
uwe LU	Nein	Zu wenig Messstandorte. Zudem wäre eine Aussage über die Variabilität sehr wünschenswert. Wahrscheinlich werden die Daten zurzeit überinterpretiert.
OstBoden GR	Nein	Zu wenig Messstandorte. Ein breiteres Spektrum an Bodeneigenschaften sollte abgedeckt werden.
Bodenmessnetz AG	Ja	Stationen im Wald und zusätzliche Stationen in der Landwirtschaftszone wären wünschenswert. Der Aufgaben- und Finanzplan (AFP) lässt dies im Moment nicht zu.
OASI TI	Ja	-
WSL (LFW)	Nein	Die Messungen des Bodenmatrixpotentials mit manuellen Tensiometern und der Bodenfeuchte mit Bodenwassergehaltssensoren liefern wichtige Informationen, welche die Validation der Bodenwasserhaushaltsmodellierung erlauben. Die Anzahl Replikationen (3) ist knapp genügend. Besser wären etwa 8 Replikationen. Verbessert werden könnten diese Informationen noch mit automatischen Bodenwasserpotentialmessung (MPS), einer besseren Abdeckung des Bodenprofils mit Sensoren in mehr als 3 Tiefen, bessere Messwerte zur hydraulischen Leitfähigkeit (Ksat) und eine bessere Erfassung des Niederschlag im Winter (Ott Pluvio2 Waagen anstelle der jetzigen Wippen).
FaBo ZH	Ja	Alle Klimaregionen des Kantons werden abgedeckt.

4.3.2 Auswahl der Sensoren und Standorte

Die Hälfte aller Messnetz-Betreiber hat vor dem Erstellen der Messstationen keine **Vergleichsmessung** von Methoden oder Sensoren durchgeführt. Kantone haben einige Vergleiche zwischen manuellen und automatischen Tensiometern gemacht oder zwischen unterschiedlichen Modellen desselben Sensortyps. Die Forschungsmessnetze haben hingegen verschiedene Methoden und auch Sensoren getestet.

Somit scheint den "Vorreitern" besonders im Fall von Saugspannungsmessungen eine wichtige Rolle zuzukommen:

- Die Messmethode mit manuellen Tensiometern wurde als erstes im Kanton Bern verbreitet eingesetzt. Weitere Kantone (ZH, TG, GL, GR) haben dieses System auf Grund der guten Erfahrungen und für eine einfache Vergleichbarkeit weitgehend übernommen.
- Ähnlich hat der Kanton Solothurn als erster Kanton konsequent automatische Tensiometer in einem Messnetz von 12 Stationen eingesetzt. Diese Messkonfiguration haben in der Folge weitere kantonale Betreiber (BL, AG, ZG, FR, GE) übernommen.

Bei den Forschungsmessungen hat das SwissSMEX vor dem Erstellen eines grossräumigen Netzes verschiedene Sensoren ausführlich evaluiert. Diese Vergleiche dienten als Grundlage für SOMOMOUNT. Dort wurden wiederum aus Gründen der Vergleichbarkeit mehrheitlich dieselben Instrumente gewählt. Die WSL hat selber diverse Sensoren verschiedener Messmethoden verglichen.

Gute Erfahrungen mit einer Messmethode und etablierte Sensorik wurden auch häufig als ausschlaggebende Faktoren für die Wahl der Messtechnik genannt.

Die Auswahl der Standorte hängt zum grössten Teil davon ab, welche Fragen mit den Bodenfeuchtemessungen beantwortet werden sollen.

4.3.3 Kosten des Betriebs

Die Betreiber machen sehr unterschiedliche und uneinheitliche Angaben zu den Kosten ihrer Messnetze. Der Betrag pro Messstation und Jahr reicht von ca. 1'600 CHF bis 12'000 CHF. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Stationen stark unterscheiden, sowohl was die einzelnen Sensoren betrifft (Kosten der Messgeräte per se, Datenübermittlung oder manuelles Ablesen) als auch deren Anzahl (Messtiefen, Mess-Replikationen pro Tiefe). Zudem haben einige Betreiber die Kosten für die Datenauswertung oder den Internetauftritt mit eingerechnet, während andere nur die reinen Wartungskosten angegeben haben.

Tendenziell sind Messstationen mit manuellen Tensiometern am günstigsten zu betreiben. Sie liefern allerdings auch nur alle paar Tage einen Messwert. Die kostenintensivste Variante ist eine kombinierte Messung von Wassergehalt und Saugspannung.

4.3.4 Beurteilung der eigenen Messdaten und zusätzliche Wünsche

Nach Einschätzung der meisten Betreiber ist die **Aussagekraft der Messungen lokal begrenzt**. Daher ist es wenig überraschend, dass der Wunsch nach einer **grösseren Anzahl von Messstandorten** bei vielen vorhanden ist.

Zwar hält die Hälfte (neun) der befragten Repräsentanten ihr Messnetz für den aktuellen Zweck für ausreichend. Vier von ihnen – zehn insgesamt – wünschen sich dennoch ausdrücklich Messungen an mehr Stationen. Mehrfach wird dies allerdings für finanziell nicht machbar gehalten.

Zwei Betreiber würden gerne die Messungen der Saugspannung automatisieren. Ausserdem halten zwei Repräsentanten die Aussage der Messungen über die Variabilität der Feuchte für ungenügend und möchten beispielsweise die Anzahl Replikationen der Messungen erhöhen oder in noch mehr Tiefen messen.

Nur zwei Messnetzbetreiber erklären sich mit ihrem bestehendes Messnetz zufrieden, ohne weitere Wünsche aufzuführen. SOMOMOUNT sei bisher sogar sehr zufriedenstellend.

Das regionale Signal der Bodenfeuchtedynamik wird auch mit einer eingeschränkten Anzahl Messstationen gut repräsentiert (Mittelbach und Seneviratne, HESS 2012). Wie alle Messnetzbetreiber feststellen, unterscheiden sich die absoluten Werte allerdings bereits auf sehr kleinem Raum deutlich und können daher nicht für grössere Gebiete generalisiert werden.

4.3.5 Bekanntheit anderer Messnetze

Alle Messnetz-Betreiber geben an, abgesehen von den eigenen noch weitere Bodenfeuchte-Messungen zu kennen. In der nachfolgenden Tabelle 3 ist dargestellt, wie oft die Messnetze in den Antworten explizit aufgeführt worden sind. Das eigene Netz (bzw. die eigene Gruppe) ist dabei nicht mitgezählt. Zu beachten ist, dass einige Befragte keine Messnetze aufgezählt haben, auch wenn sie angegeben haben, dass sie solche kennen.

Tabelle 3: Bekanntheit der Messnetze bei anderen Messnetz-Betreibern.

Messnetz	Nennungen als bekannt
SwissSMEX	2
WSL (LFW, Fireless)	1
SOMOMOUNT	1
Zentralschweiz (Luzern)	10
inNET BAFU Pilot	1
OstBoden	8
Kanton ZH	10
Bodenmessnetz NW-Schweiz	10
Kanton BE	11
Kanton UR	11
Kanton TI	7
andere (Ausland)	The international soil moisture network, Agrarwetter DWD

Die Kantone haben nach eigenen Angaben einen mindestens jährlich stattfindenden Austausch. Dies erklärt die hohe Anzahl der Nennungen der kantonalen Messnetze, da sie von den meisten anderen Kantonen aufgezählt werden. Die Forschungsinstitutionen haben ebenfalls mehrheitlich untereinander Kontakte.

4.3.6 Wunsch nach Zusammenarbeit

Praktisch alle Befragten stimmten der Frage nach einer Zusammenarbeit oder Vernetzung der verschiedenen Messnetze zu. Nur die Betreiber eines kantonalen Netzverbundes beantworteten die Frage mit nein, da sie die derzeitige Zusammenarbeit bereits für genügend erachten. Es wurde denn auch sieben Mal erwähnt, dass bereits eine (begrenzte) Zusammenarbeit bestehe. Dies gilt insbesondere für die Kantone.

Besonders häufig wird als Form der Vernetzung eine **zentrale Website oder Plattform** genannt, worauf alle Messwerte der Schweiz im Überblick eingesehen werden können. Zehn Betreiber haben dies ausdrücklich vorgeschlagen, drei weitere würden sich einer solchen Kollaboration anschliessen oder zusätzliche Messnetze in ihrer bestehenden Zusammenarbeit begrüssen.

Eine Betreiberin fordert explizit, dass das Messnetz vom Bund betrieben werden sollte. Eine andere äussert sich hingegen kritisch gegenüber einem Monopol, da die Betreuung durch lokale Auftragnehmer sinnvoll sei.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist die **Vereinheitlichung der Methodik und Verbesserung der Datenvergleichbarkeit**. Sieben Mal wurde eine Antwort in diesem Bereich gegeben: gemeinsame Quality Control, bessere Vergleiche, einheitliches Beurteilungsschema (Feuchtekategorien), Formalisierung und Angleichen der Standards.

5 Nutzergruppen und ihre Ansprüche

5.1 Nutzergruppen

Gemäss Pflichtenheft sollen die Anspruchsgruppen in Tabelle 4 verifiziert werden. Zu diesem Ziel wurde für jede Nutzergruppe eine Person aus der Experten-
gruppe des KOBI oder aus weiteren relevanten Gremien kontaktiert und um eine
Liste mit möglichen Nutzern gebeten. Diese insgesamt 102 Personen wurden
nachfolgend zur Teilnahme an der Nutzerumfrage eingeladen.

Tabelle 4: Erwartete Nutzergruppen und deren Anwendungsansprüche gemäss
Pflichtenheft.

Nutzergruppe	kurzfristig	mittel- bis langfristig
Landwirtschaft	Kurzfristige Trockenprognosen/Bewässerungsbedarf, Befahrbarkeit Boden	Trockenrisiko als Basis für Anpassungen Kulturen / Anbaustrategie
Waldwirtschaft	Trockenheit in Bezug auf Waldbrandgefahr (Wochen bis Monate), Befahrbarkeit Boden	Veränderungen, Entwicklungspotential von Waldstandorten
Hydrologie	Einzugsgebietszustand bzgl. Feuchtigkeit vor Hochwasserereignis, Parameter für (Kalibration und Verifizierung) hydrologischer Modelle	Abschätzungen Wasserspeichervermögen der Böden zur Gefahrenprävention und Informationen zur Grundwasserneubildung
Wasserwirtschaft	Bewässerungsbedarf (wegen Anspruch an Gewässer)	Folgen für Revitalisierung und Gefahrenprävention
Naturschutz	keine	Veränderung Potentiale für Feuchtgebiete und Trockenstandorte
Bauwirtschaft	Befahrbarkeit Boden	keine
Meteorologie	Niederschlagprognose in Abhängigkeit Wassergehalt Boden	Perspektiven Veränderungen Mikroklima
Forschung	Zugänglichkeit umfassende Daten	dito
Bodenschutz	Verdichtungs- und Trockenheitsempfindlichkeit von Böden.	Bessere Kenntnis über Verhalten von Böden bei Feuchte und Trockenheit im Hinblick auf Steuerung und Beratung in Bezug auf bodenschonende Nutzung

Knapp die Hälfte der Eingeladenen hat an der Nutzerumfrage teilgenommen. Annähernd jede Nutzergruppe wird von den teilgenommenen Personen repräsentiert. Die Teilnehmenden waren jedoch sehr unterschiedlich auf diese Fachgebiete verteilt. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Teilnehmenden nach den von ihnen angegebenen Fachgebieten. Der hellgrau dargestellte Anteil entspricht einem Teilnehmenden, der sich keinem vorgegebenen Fachgebiet zugeordnet

und stattdessen eine freie Angabe gemacht hat. Aus unserer Sicht kann diese Person auch dem Fachgebiet "Forschung" zugewiesen werden.

Die mit Abstand grössten Gruppen gehören zu den Fachgebieten Bodenschutz, Hydrologie und Landwirtschaft. Die weitere Analyse der Antworten zeigt, dass viele Personen auch mehreren Gruppen zugeteilt werden können. Personen, die sich dem Fachgebiet Bodenschutz zuordneten, haben häufig mit Bautätigkeiten zu tun. Der erwarteten Gruppe "Bauwirtschaft" hingegen hat sich niemand von den Befragten explizit zugeteilt. Von allen anderen erwarteten Gruppen hat mindestens eine Person an der Befragung teilgenommen.

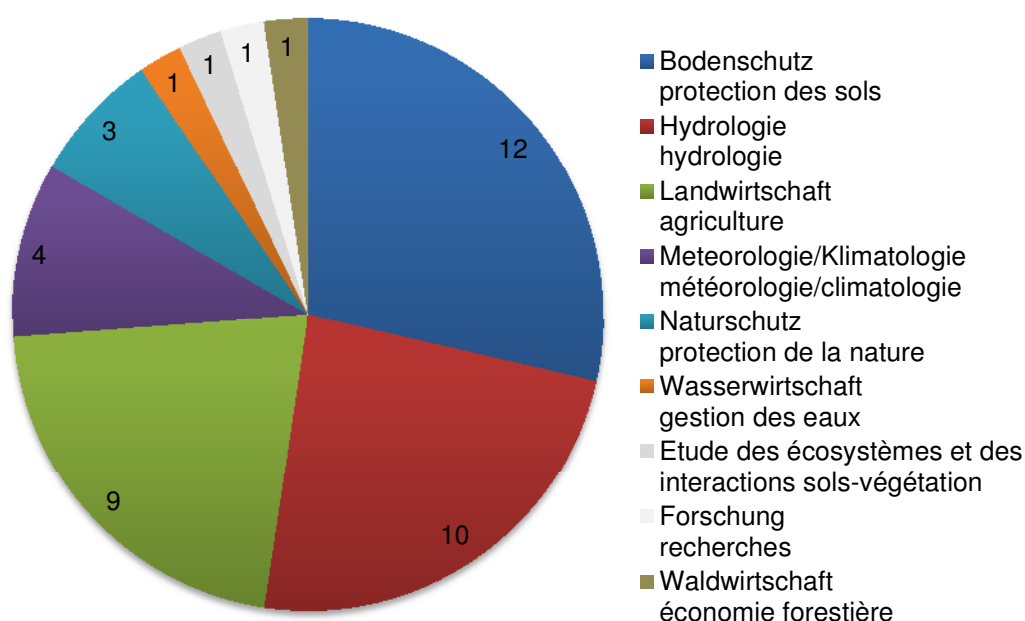


Abbildung 6: Anzahl der Umfrageteilnehmenden aufgeteilt nach Nutzergruppen (Fachgebieten).

Da sich die Auswahl der Angefragten auf den Empfehlungen der Experten gestützt hat (vgl. Abschnitt 5.1) ist die Anzahl der Teilnahmen nach Fachgebiet quantitativ nicht repräsentativ.

5.2 Resultate der Befragung von potentiellen Nutzern

5.2.1 Nutzung und Bedeutung von Bodenfeuchte-Daten

Trotz der zielgerichteten Auswahl gaben drei von 42 Antwortenden an, dass sie keine Bodenfeuchtedaten nutzen und dies auch nicht vorhaben.

Von den 39 Personen, die Bodenfeuchte-Daten nutzen oder nutzen möchten, sind diese Daten von 85% für die eigene Arbeit als wichtig eingestuft worden. Abbildung 7 zeigt die Verteilung der Angabe der **Wichtigkeit**, wie sie die Befragten auf einer Skala von 1 (unwichtig) bis 4 (unverzichtbar) angegeben haben. Niemand findet Bodenfeuchte-Daten unwichtig und nur gerade 15% halten sie für weniger wichtig für ihre Arbeit.

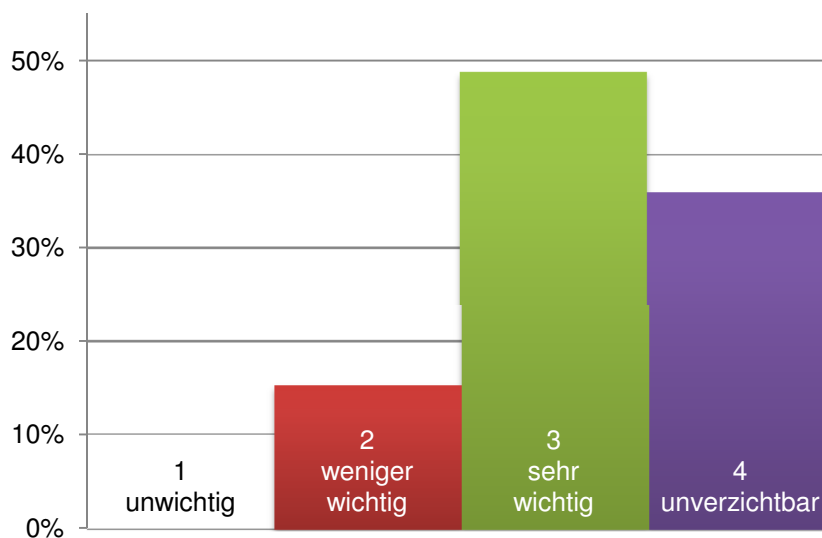


Abbildung 7: Einstufung der Wichtigkeit von Bodenfeuchte-Daten für die eigene Arbeit auf einer Skala von 1 bis 4.

5.2.2 Bekanntheit der bestehenden Messnetze

Da die Teilnehmenden der Nutzerumfrage mit überwiegender Mehrheit angeben, Bodenfeuchtedaten zu nutzen und diese auch wichtig finden, stellt sich nun die Frage, ob sie die bereits vorhandenen Messungen auch kennen und anwenden. Die Antwort auf diese Frage gibt ein gemischtes Bild ab. Abbildung 8 zeigt die Bekanntheit bestehender Bodenfeuchte-Messnetze unter allen Umfrage-Teilnehmenden.

60% der Befragten geben also an, Messnetze zu kennen, 40% kennen keine. Wenn nur die Personen betrachtet werden, die angegeben haben, Bodenfeuchtedaten zu nutzen, ändert sich das Ergebnis kaum (62% zu 38%).

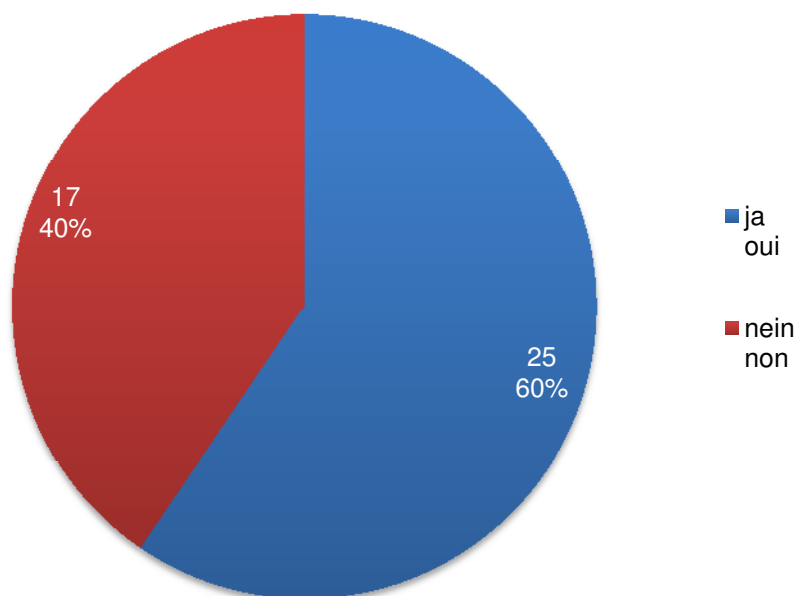


Abbildung 8: Bekanntheit der bestehenden Bodenfeuchte-Messnetze als Antwort auf die Frage, ob Messnetze für Bodenfeuchte bekannt sind.

Die Auswertung in Tabelle 5 zeigt, welche Messnetze bei den befragten Nutzern besonders bekannt sind. Am häufigsten aufgezählt wurden die kantonalen Messnetze (vor allem BE und Nordwestschweiz) sowie das SwissSMEX. Die kantonalen Netze wurden zusätzlich dreimal zusammenfassend genannt. Daher ist davon auszugehen, dass mehrere kantonale Messnetze noch weiter bekannt sind, als die gezählten expliziten Nennungen es darstellen.

Es zeigt sich somit, dass insbesondere die länger bestehenden Messungen (BE) und die grossräumigen Messnetze (NW-Schweiz, SwissSMEX) eine grosse Bekanntheit haben. Kleine (UR) und besonders neue Messungen sind bisher weitgehend unbekannt (Pilotprojekt in der Zentralschweiz).

Tabelle 5: Von den Nutzenden als bekannt aufgeführte Messnetze.

Messnetz	Nennungen als bekannt
SwissSMEX	8
WSL (LFW, Fireless)	2
SOMOMOUNT	2
Zentralschweiz (Luzern)	1
inNET BAFU Pilot	0
OstBoden	4 (Auch "Ostschweiz")
Kanton ZH	4
Bodenmessnetz NW-Schweiz	11 (Auch "Solothurn" und "Bodenmessnetz" auf Grund der Website)
Kanton BE	7
Kanton UR	2
Kanton TI	3
andere	"einige kantonale", "Meteoschweiz", "Nabo", "SMOS", "VD", "kantonale Messnetze", "ein- zelne Forschungsstandorte", "kantonale Messnetze", "Swiss FluxNet", "Tensiometer", "eigene experimentelle Sites", "US", "tereno"

5.2.3 Räumliches Interessensgebiet

Um zu klären, ob sich die Nutzer von Bodenfeuchte-Daten vor allem für Messungen in ihrem eigenen Boden interessieren, wurde die Frage nach dem Gebiet von Interesse gestellt. Abbildung 9 zeigt zunächst das jeweils grösste Gebiet, für welches sich die Befragten interessieren. Bei einer mehrfachen Antwort wie zum Beispiel "eigener Boden & gesamte Schweiz" wird die Antwort für diese Grafik als "Schweiz" gewertet. Somit zeigt sich, dass Messungen im ganzen Land für mehr als die Hälfte der Befragten interessant sind.

In Ergänzung dazu zeigt die Abbildung 10 das jeweils kleinste Gebiet, für welches sich die Befragten interessieren. Bei einer mehrfachen Antwort wie zum Beispiel "eigener Boden & gesamte Schweiz" wird die Antwort für diese zweite Grafik nun als "eigener Boden" gewertet. Während also durchaus grosses Interesse für Messwerte des eigenen Bodens bestehen, wird hier deutlich, dass für die Hälfte der Nutzer mindestens das Kantonsgebiet mit Messwerten abgedeckt sein soll; für mehr als ein Drittel soll es auch bereits die ganze Schweiz sein.

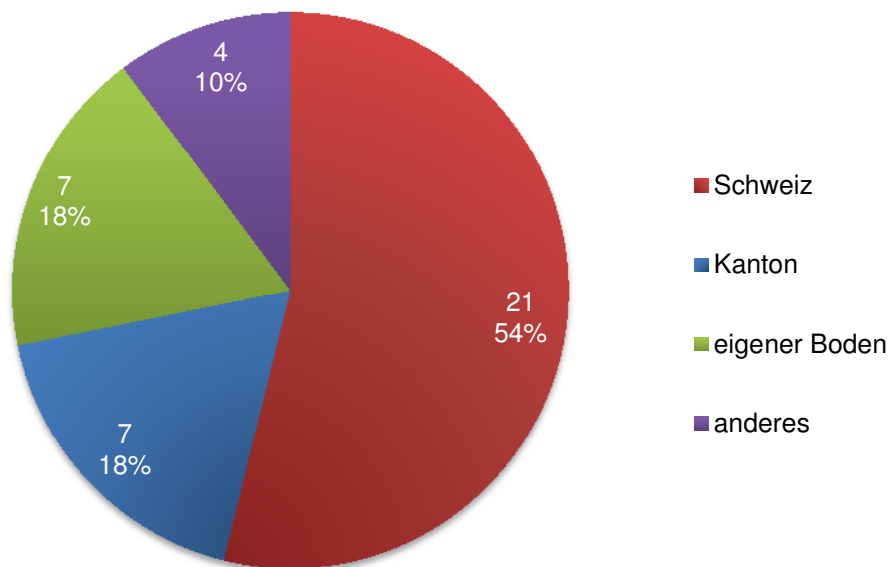


Abbildung 9: Das jeweils *grösste* Gebiet, wofür Interesse an Bodenfeuchte-Daten besteht.

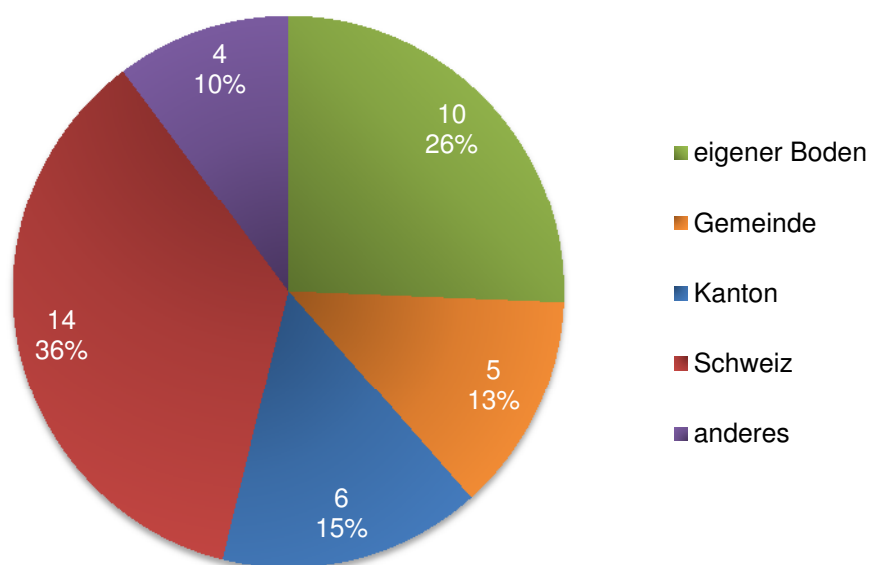


Abbildung 10: Das jeweils *kleinste* Gebiet, wofür Interesse an Bodenfeuchte-Daten besteht.

Auch wenn viele Personen vorrangig an Messungen in ihrem eigenen Boden interessiert sind, so zeigt die Umfrage, dass das Kantonsgebiet bzw. die gesamte Schweiz von grossem Interesse ist. Dies zeigt den Wunsch nach einem schweizweiten Messnetz.

5.2.4 Beurteilung der bestehenden Messungen und zusätzliche Anforderungen

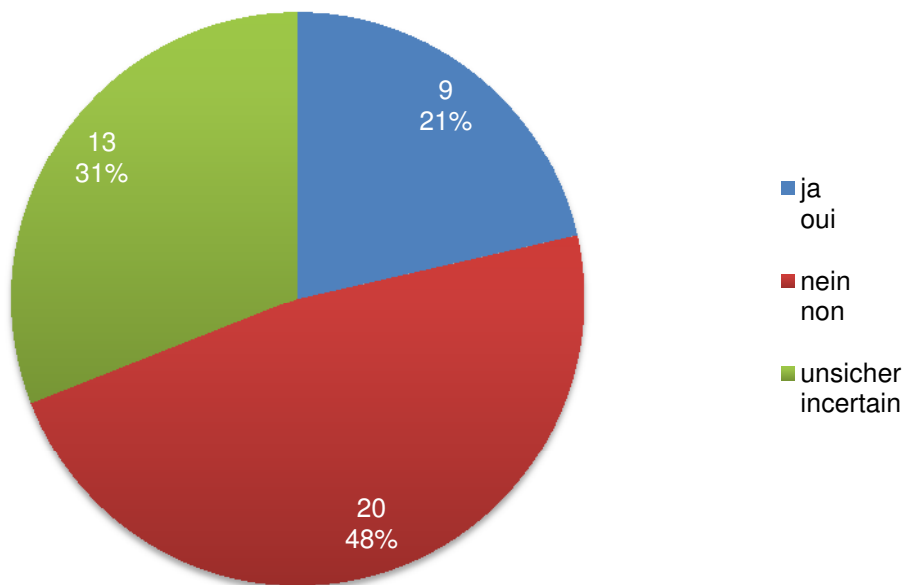


Abbildung 11: Einschätzung der vorhandenen Messdaten als genügend.

Die Einschätzung der Nutzenden zum **Ausreichen der vorhandenen Messdaten** ist in Abbildung 11 zusammengefasst. Sie zeigt die Antwort auf die Frage "Genügen die vorhandenen Messdaten Ihren Anforderungen?" (falls Messnetze als bekannt angegeben wurden) oder "Denken Sie, dass die vorhandenen Messdaten die Anforderungen Ihres Fachbereichs erfüllen?" (wenn Messnetze unbekannt waren und in der Folge einige Beispiele kurz gezeigt wurden).

Werden diese Einschätzungen nach Bekanntheit der bestehenden Messnetze separiert, wird die Antwort noch deutlicher: Von den Nutzenden, welche Messnetze kennen, schätzen 60% die Daten als ungenügend ein, 28% halten sie für ausreichend. Von den Personen, die keine Messnetze kennen, sind sich die meisten (59%) unsicher darüber, 29% finden die Messdaten ungenügend.

Aufgeteilt nach Nutzergruppen, zeigt sich, dass vor allem die Forschenden für ihre Anwendung mit den Daten ausreichend zufrieden sind. Personen aus der Gruppe des Bodenschutzes sind verschiedener Meinung, während die Befragten aus den anderen Fachgebieten die Daten mehrheitlich für ungenügend halten.

Nun stellt sich die Frage, was den Nutzern fehlt, da sie die vorhandenen Daten meist nicht ausreichend finden.

Zusammenfassend haben wir im Folgenden aufgelistet, was entsprechend der Umfrage noch **zusätzlich notwendig oder gewünscht** wäre:

- **Mehr Standorte**, höhere räumliche Auflösung, Messungen in weiteren Gebieten und anderen Bodentypen – 15 Nennungen
- **Zusätzliche oder genauere Messgrößen**: Mehr Wassergehaltsmessungen wurden 2-mal explizit gewünscht (auch volumetrisch, z.B. % der nutzbaren Feldkapazität), genauere Werte der Saugspannung wurden 3-mal vorgeschlagen (vor allem im trockenen Bereich)
- 5 Nennungen zu **kürzeren Messintervallen** oder rascher Verfügbarkeit der Daten: mindestens tägliche Werte, möglichst in Echtzeit
- **Gemeinsame schweizweite Plattform**, gemeinsamer Internetauftritt – 2 Antworten
- **Standardisierung** der Messungen, Beurteilungskriterien oder des Datenformats – 2 Nennungen
- Weitere Wünsche (je einmal): Messungen in anderen Tiefen, Zusätzliche räumliche Informationen zur Feldkapazität oder zum Welkepunkt, Assimilation von Fernerkundungsdaten, Messung auf eigenem Boden, langjährige Messreihen von guter Qualität, langfristig gesicherte Finanzierung der Messungen

Die Messnetze welche zu Forschungszwecken installiert werden, entsprechen einer konkreten Fragestellung und werden dementsprechend danach konzipiert. Aus der Umfrage geht hervor, dass die entsprechenden Forschungsfragestellungen (Zusammenhänge und grundlegende Funktionen) mit relativ wenigen Messstandorten beantwortet werden können.

Die Messnetze der Kantone werden entsprechend der Finanzierungsmöglichkeiten erstellt und erweitert. Die Fragestellungen der Nutzer sind häufig sehr lokal ausgerichtet. Im Allgemeinen ist es schwierig, diese Messungen zu generalisieren.

6 Ideales Bodenfeuchte-Messnetz

Wir skizzieren in den folgenden Abschnitten die gemäss den verschiedenen Nutzergruppen erwünschten Erweiterungen für ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz und geben dafür je eine grobe Kostenschätzung an.

Die folgenden Aspekte haben wir dabei für alle Nutzergruppen berücksichtigt:

- Wenn die Messungen der Bodenfeuchte über das ganze Jahr kontinuierlich verfügbar sein müssen und die Wasserknappheit auch hinsichtlich Trockenstress von Pflanzen beurteilt werden soll, ist es aus unserer Sicht notwendig, Messungen sowohl der Saugspannung als auch des Wassergehalts jeweils parallel durchzuführen (s. Kapitel 3.3). Dies bietet auch die Möglichkeit, die Wasserspannungskurve im realen Boden besser verstehen zu können.
- Zudem müssen an möglichst allen Messstandorten umfangreiche Informationen über die Bodencharakteristik gesammelt werden.
- Zusätzlich ist es von Vorteil, wenn in der näheren Umgebung bereits verschiedene Parameter der Atmosphäre (Lufttemperatur und -feuchte, etc.) gemessen werden. Andernfalls müssen diese Parameter an den Bodenfeuchte-Messstationen zusätzlich erfasst werden.

Für die Kostenschätzungen trafen wir die in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgelisteten Annahmen zu den Kosten der Sensoren und des Baus oder Umbaus der Stationen. Sie basieren auf Erfahrungswerten von Erstellern bisheriger Bodenfeuchte-Messnetze (insbesondere dem SwissSMEX und dem Bodenmessnetz der Nordwestschweizer Kantone).

Tabelle 6: Annahmen zu Kosten Sensoren.

Beschreibung	Kosten CHF/Einheit
Einzelne Sensoren	
Digitales Tensiometer	1'000
TDR-Sensor	1'000
Wassergehalts-Messgerät	200
Niederschlagsmessung (Pluviometer unbeheizt ² , Messung mit Waage ab CHF 5'000)	1'000
Lufttemperatur und -feuchte	1'000
Strahlungsmessung	1'000

² Niederschlag wird mit einem unbeheizten Sensor erst dann registriert, wenn das Wasser für den Boden auch verfügbar ist. Aus diesem Grund ist ein beheizter Niederschlagssensor für das Bodenfeuchtemessnetz nicht notwendig.

Tabelle 7: Annahmen zu Kosten Bau/Ergänzung von Stationen.

Beschreibung	Kosten CHF/Einheit
Bau/Ergänzung von Stationen (inkl. Hardware und Arbeit; ohne Kosten Sensoren)	
Bau einer neuen Station inkl. Stromversorgung und Datenlogger	15'000
Ergänzung einer bestehenden Bodenfeuchte-Messstation mit Sensoren für die Erfassung von atmosphärischen Parametern	5'000
Ergänzung einer automatischen Wassergehalts-Messstation mit Tensiometern	3'000
Ergänzung einer automatischen Tensiometer Messstation mit Wassergehalts-Messungen	3'000
Erhebung der Bodencharakteristik mit Bodenprofil, Bestimmungen des Welkepunkts und Sättigungswassergehalts	2'000

Zusätzlich wurden den Kostenschätzungen die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Der **Unterhalt** einer Messstation kostet jährlich CHF 4'000. Folgende Anforderungen werden erfüllt: Entsprechend der Herstellerempfehlung wird eine Station viermal jährlich besucht. Station läuft mehrere Jahre, Datenqualität bleibt erhalten, Daten werden kontrolliert, Ausfälle zeitnah erkannt und behoben. Kosten für den Ersatz beschädigter Geräte sind berücksichtigt.
- Der Aufbau des **Datenmanagements** mit Datenhaltung und Darstellung in einer entsprechenden Internet-Applikation beträgt für eine Nutzergruppe initial CHF 100'000 und im Betrieb CHF 20'000 jährlich. Diese Kosten erachten wir als realistisch für die Anbindung des Datenmanagements an eine bestehende Lösung oder für eine neu erstellte schlanke Lösung, für deren Aufbau und Betrieb eine externe Firma mandatiert wird. Sollte hingegen eine neue Lösung nach den IT-Prozessen des Bundes sowie auf Bundesinfrastruktur realisiert werden, müsste von beträchtlich höheren Kosten ausgegangen werden (schätzungsweise Faktor 5–10).
- Nach Angaben der Betreiber beträgt die **Fortführung der vorhandenen Messnetze** insgesamt jährlich CHF 250'000. Dieser Weiterbetrieb der bisherigen Stationen ist innerhalb den nachfolgenden Erweiterungs-Vorschlägen jeweils ebenfalls zu sichern, sofern die Stationen nicht durch modernere ersetzt werden. Es wird jeweils ein entsprechender Anteil dieser Kosten angenommen.

6.1 Ideales Messnetz für den Bereich Hydrologie und Naturgefahren

Die Hydrologinnen, Hydrologen und Naturgefahren-Fachpersonen nutzen Bodenfeuchtedaten zur hydrologischen Vorhersage und Modellierung. Trockenheit, das Einsetzen der Schneeschmelze sowie die Disposition für Hochwasser und Hangrutschungen werden mit Hilfe der Bodenfeuchte vorhergesagt. Die entsprechenden Modelle werden mit Messdaten der Bodenfeuchte angetrieben, kalibriert und überprüft. Ausserdem können nach einem allfälligen Ereignis Analysen durchgeführt werden.

Status Quo

Die bestehenden Messungen werden von den Fachpersonen als ungenügend beurteilt. Die Alpen und Voralpen sind für gravitative Naturgefahren besonders kritisch (betrifft insbesondere Höhenlagen zwischen 800 und 1'500 m. ü. M.). Mit den derzeit vorhandenen Messungen sind sie allerdings kaum abgedeckt. 90 der aktuellen Messstationen befinden sich unterhalb von 800 Metern, nur gerade 15 im gefragten Bereich. Auch Regionen mit potentieller Trockenheit (siehe Abbildung 12) wie Mittelbünden, Engadin oder Jura/Westschweiz sind aktuell nur spärlich durch Messungen abgedeckt.

Ausserdem ist es für die oben genannten hydrologischen Aufgaben ganz wichtig, dass sowohl Informationen bezüglich des volumetrischen Wassergehalts, als auch der Saugspannung vorliegen, was im Moment an den meisten Messorten nicht der Fall ist.

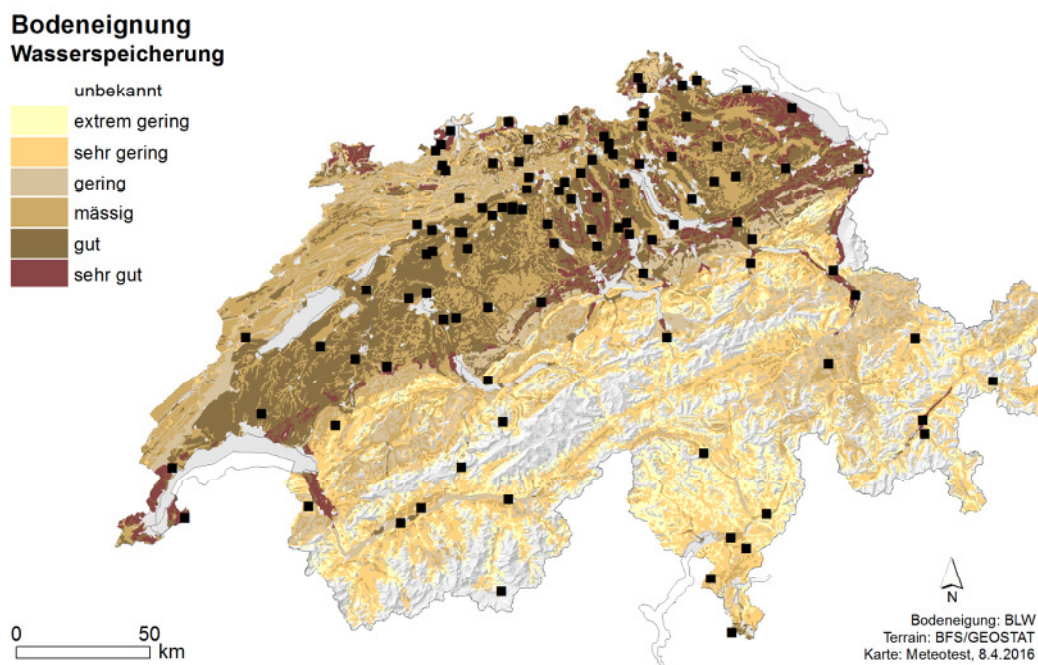


Abbildung 12: Bodeneignungskarte – Wasserspeicherung.

Ausbau zum idealen Messnetz

Der Schwerpunkt der Anforderungen liegt für den Bereich Hydrologie und Naturgefahren in der Verfügbarkeit von zusätzlichen Messdaten in kritischen Gebieten. Es sind dies Messungen in mittleren Lagen und im Gebirge sowie in trockenen Regionen. Die Bodenfeuchte muss sowohl als Wassergehalt als auch Saugspannung gemessen werden und möglichst mit weiteren Messgrössen koordiniert sein – insbesondere mit dem Niederschlag. Die Daten sollten mindestens in täglicher Auflösung erhoben werden, besser wäre eine stündliche bzw. 10-minütliche Auflösung.

Die entsprechende Erweiterung beinhaltet gemäss Anforderungen der Hydrologen nach unserer Interpretation folgende Punkte:

- Ersatz von manuellen Messungen durch automatische Sensoren, die Stundenwerte messen
- Ergänzung der bisherigen Stationen, die Wassergehalt messen, mit Tensiometern und umgekehrt
- Ergänzung der bisherigen Stationen mit Messungen für Niederschlag, Luftfeuchte, Temperatur, sofern noch nicht schon vorhanden
- Umgekehrt Ergänzung von Wetterstationen mit Bodenfeuchte-Messungen; Standorte von SwissMetNet bieten sich an
- Die Ergänzung beginnt prioritär bei Stationen oberhalb von 800 m. ü. M., sowie in bekannten Trockenregionen der Schweiz, wo noch keine Messungen vorliegen.
- Bodencharakteristik an allen Stationen erheben
- Gemeinsame Online-Plattform, die schweizweit alle Messwerte darstellt
- Sicherstellung des Weiterbetriebs der bisherigen Messstationen

Kostenschätzung

Unsere Kostenschätzung ist in Tabelle 8 aufgeführt. Die gesamten Kosten eines **Messnetz-Ausbaus** zum idealen Messnetz für die Nutzergruppe Hydrologie/ Naturgefahren belaufen sich auf rund **3.7 Mio CHF**. Der **jährliche Betrieb** kostet gegen **700'000 CHF**.

Annahmen, Zusatzinformationen:

- Für neue Wassergehaltsmessungen wird pro Station 1 TDR-Sensor verwendet (zur Kalibrierung) sowie je 5 kapazitive Sensoren in 3 Tiefen.
- Tensiometer werden ebenfalls je 5 Stück in 3 Tiefen eingesetzt.

- Es gibt 137 SwissMetNet-Stationen, wo noch keine Bodenfeuchte-Messung in der Nähe gemacht wird. 34 davon befinden sich zwischen 800 und 1'500 m Höhe.
- Standorte, wo bereits automatisch Saugspannung und Wassergehalt gemessen wird, werden zunächst nicht mit zusätzlichen Messtiefen und Sensoren erweitert.
- Es wurden keine Kosten für Projektierung, Pacht und Abschreibung/Erneuerung von Stationen berücksichtigt.

Tabelle 8: Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für hydrologische Zwecke.

Kostenpunkt	Anzahl	Stückpreis	Kosten
Ersatz der rein manuellen Stationen (23)			
je 1 TDR-Sensor	23	1'000	23'000
je 15 Tensiometer	345	1'000	345'000
je 15 Wassergehalts-Sensoren	345	200	69'000
atmosphärische Messgeräte	23	5'000	115'000
Kosten Bau	23	15'000	345'000
Erheben der Bodencharakteristik	23	2'000	46'000
Ergänzung Stationen nur Wassergehalt (26) oder mit manuellen Tensiom. (12)			
je 15 Tensiometer	570	1'000	570'000
Kosten Bau	38	3'000	114'000
(Bodencharakteristik bekannt)	-	2'000	0
Ergänzung Stationen nur (automatische) Saugspannung (40)			
je 1 TDR-Sensor	40	1'000	40'000
je 15 Wassergehalts-Sensoren	600	200	120'000
Kosten Umbau	40	8'000	320'000
(Bodencharakteristik bekannt)	-	2'000	0
Ergänzung der Stationen mit atmosphärischen Messungen (2)			
alle Messinstrumente	2	5'000	10'000
Kosten Umbau	2	6'000	12'000
Ergänzung der SwissMetNet-Stationen ohne nahe Bodenfeuchte-Messung (44)			
800 bis 1500 m: je 1+15+15 Sensoren	34	16'000	544'000
800 bis 1500 m: Kosten Bau	34	15'000	510'000
Erheben der Bodencharakteristik	34	2'000	68'000
ca. 10 Trocken-Standorte: je 1+15+15 Sensoren	10	16'000	160'000
ca. 10 Trocken-Standorte: Kosten Bau	10	15'000	150'000
Erheben der Bodencharakteristik	10	2'000	20'000
Datenmanagement			
Aufbau des Systems	1	100'000	100'000
Total Ausbaukosten			3'681'000
Betriebskosten bestehender Stationen (19)	19	4'000	76'000
Betriebskosten neuer/ergänzter Stationen (145)	145	4'000	580'000
Betrieb Datenmanagement	1	20'000	20'000
Total Betriebskosten pro Jahr			676'000

6.2 Ideales Messnetz für den Bereich Bodenschutz

Die Fachpersonen im Bereich Bodenschutz nutzen Bodenfeuchtedaten, um den Bodenschutz im Vollzug sicherzustellen. Hierbei geht es um den physikalischen Bodenschutz bei Bautätigkeiten sowie Land- und Forstwirtschaft. Auf Grund von Bodenfeuchtedaten – meist Saugspannungswerten – wird bestimmt, welche Erdbewegungen und welches Befahren des Bodens bei den aktuellen Verhältnissen zulässig sind. Die Messungen sind für die meisten Fachleute nach eigenen Angaben sehr wichtig oder unverzichtbar.

Status Quo

Da die Variabilität der Böden und der Vegetation sehr gross ist, wird es mit einem punktuellen Messnetz nicht möglich sein, genaue Angaben über sämtliche Böden in einem grossen Gebiet zu machen. Es ist daher wichtig, die Eigenschaften der Böden und der Vegetation zu kennen, um Informationen von vorhandenen Messungen zumindest ansatzweise auf den eigenen Standort übertragen zu können. Die Bodenscharakteristik ist an vielen bisherigen Messorten bekannt. Die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen (gerade im Frühling) sind hingegen nur wenig bekannt. Die Messungen von inNET finden bei verschiedenen Kulturen statt, einige WSL-Stationen messen im Wald und einige manuelle Tensiometer im Kanton Bern messen im Ackerland. Ansonsten werden fast alle Bodenfeuchte-Messungen auf Dauerwiese durchgeführt.

Gerade in den Übergangsjahreszeiten bieten Saugspannungs-Werte teilweise ungenügende Informationen. Tensiometer zeigen zum Beispiel im Frühling durchgehend nasse oder sehr feuchte Bedingungen. Im Feld wird dies aber nicht immer so wahrgenommen. Kombinationsmessungen mit Informationen über den Wassergehalt könnten hierbei Abhilfe schaffen.

Die Kommunikation mit Anwendern kann erschwert sein, wenn keine klaren und einheitlichen Beurteilungskriterien vorhanden sind.

Ausbau zum idealen Messnetz

Die Zusatzanforderungen für den Nutzerbereich Bodenschutz gehen in verschiedene Richtungen. Einerseits geht es um eine Vereinheitlichung der Beurteilungskriterien (welche Messwerte lassen welche Bearbeitung zu) und auch einer gemeinsamen Plattform, auf der alle Messwerte der Schweiz dargestellt werden können. Teils sind genauere Messwerte (im feuchten Bereich) sowie Messungen in besserer räumlicher oder zeitlicher Auflösung bzw. in verschiedenen Bodentypen und Kulturen gefordert. Generell ist das Erheben der Bodencharakteristik zur Interpretation der Messungen sehr wichtig.

Die entsprechende Erweiterung beinhaltet nach Wünschen der Bodenschutz-Fachpersonen folgende Punkte:

- Alle Messstationen sind mit automatischen Tensiometern ausgerüstet, um stündliche oder 15-minütige Messwerte zu gewährleisten (Ersatz der manuellen Messungen).
- Zusätzliche Stationen an ausgewählten Standorten in Gebieten hoher Bautätigkeit (Schätzung: 20 Standorte)
- Zusätzliche Stationen an ausgewählten Standorten mit verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen z.B. nahe einer bestehenden Station in einer anderen Kultur (Schätzung: 30 neue Standorte)
- Dabei Informationen zu Sand-/Tongehalt, Bodenentwicklung etc. zumindest an den neuen Stationen immer erheben (wurde bei den bestehenden meist gemacht)
- Gemeinsame Online-Plattform, die schweizweit alle Messwerte darstellt (vergleichbare Werte z.B. Saugspannung in der gleichen Tiefe)
- Dabei gibt es einheitliche Beurteilungskriterien anhand der Werte, die für die Landwirtschaft bzw. Bautätigkeit verständlich erklärt sind

Kostenschätzung

Unsere Kostenschätzung ist in Tabelle 9 aufgeführt. Die gesamten Kosten eines Messnetz-Ausbaus zum idealen Messnetz für die Nutzergruppe Hydrologie/Naturgefahren belaufen sich auf rund **2.9 Mio CHF**. Der **jährliche Betrieb** kostet rund **550'000 CHF**.

Annahmen, Zusatzinformationen:

- Bei neuen Stationen werden je 5 Tensiometer in 3 Tiefen eingesetzt.
- Bestehende Stationen werden zunächst nicht mit weiteren Tiefen oder zusätzlichen Replikationen ergänzt.
- Wassergehaltssensoren: pragmatisch nur bei neuen Stationen einsetzen
Für besseres Verständnis der Infiltrationsprozesse je 3 pro Tiefe plus 1 TDR zur Kalibrierung
- Die Standorte zusätzlicher Stationen werden von den Kantonen bestimmt
- geschätzt 20 davon sollten in unmittelbarer Nähe einer meteorologischen Station erstellt werden können (spart meteorologische Messungen)
- Es wurden keine Kosten für Projektierung, Pacht und Abschreibung/Erneuerung von Stationen berücksichtigt.

Tabelle 9: Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für Zwecke des Bodenschutzes.

Kostenpunkt	Anzahl	Stückpreis	Kosten
Ersatz der rein manuellen Stationen (23)			
je 1 TDR-Sensor	23	1'000	23'000
je 15 Tensiometer	345	1'000	345'000
je 9 Wassergehalts-Sensoren	207	200	41'400
atmosphärische Messungen	23	5'000	115'000
Erheben der Bodencharakteristik	23	2'000	46'000
Kosten Bau	23	15'000	345'000
Zusätzliche Stationen an ausgewählten Standorten (50)			
je 1 TDR-Sensor	50	1'000	50'000
je 15 Tensiometer	750	1'000	750'000
je 9 Wassergehalts-Sensoren	450	200	90'000
Erheben der Bodencharakteristik	50	2'000	100'000
atmosphärische Messungen (bei 30)	30	5'000	150'000
Kosten Bau	50	14'000	700'000
Datenmanagement			
Aufbau des Systems	1	100'000	100'000
Erarbeiten einheitliches Beurteilungsschema	1	5'000	5'000
Total Ausbaurkosten			2'860'400
Betriebskosten bestehender Stationen	59	4'000	236'000
Betriebskosten ersetzter/zusätzlicher Stationen	73	4'000	292'000
Betriebskosten Datenmanagement	1	20'000	20'000
Total Betriebskosten pro Jahr			548'000

6.3 Ideales Messnetz für den Bereich Landwirtschaft

In der Landwirtschaft werden Informationen über die Bodenfeuchte ebenfalls für den Bodenschutz eingesetzt. Auf Grund der Messungen wird einerseits bestimmt, welche Erdbewegungen und inwiefern das Befahren des Bodens bei den aktuellen Verhältnissen zulässig ist. Andererseits nutzen Landwirte die Bodenfeuchte auch zur Optimierung ihrer Bewässerung oder zur Bestimmung eines günstigen Saat-Zeitpunktes.

Status Quo

Sofern Messungen aus der Region von sehr ähnlichen Böden vorhanden sind, werden diese verwendet. Zusätzlich kommen die Messungen der Kantone (Fachstellen Bodenschutz), welche online vorhanden sind, zur Anwendung.

Sind Bodentemperatur-Messungen vorhanden, können von Landwirten auch Frostschutzmassnahmen pünktlich vorgenommen werden. Für weitere Funktionen fehlen zusätzliche Messwerte wie die Blattfeuchte.

Wie in Kapitel 5 beschrieben, sind auch zu wenige Kenntnisse vorhanden über den Einfluss der Vegetation auf die Bodenfeuchte, weil die meisten Messungen in Dauergrünland gemacht werden. Die Art der Bewirtschaftung wird sogar einzig bei der Station in Zollikofen BE verglichen (Pflug bzw. Direktsaat).

Aus Sicht der Nutzergruppe Landwirtschaft sind die aktuellen Messnetze für die Fragestellung der "Befahrbarkeit" und nicht für weitere Fragestellungen der Landwirtschaft ausgelegt. Zum Beispiel können die bestehenden Systeme für Fragen zur Bewässerung nicht genutzt werden. Dafür müssten die Messungen auf den spezifischen Parzellen erfolgen, denn die Bewässerung hängt direkt mit den Eigenschaften des Kulturbestandes zusammen. Aus unserer Sicht ist wären entsprechende Messungen aber Aufgabe der Landwirtschaftsunternehmen und nicht des Staates.

Ausbau zum idealen Messnetz

Für die Landwirtschaft werden vor allem in-situ Messungen benötigt. Von Interesse sind vorrangig Bodenfeuchte-Werte in Bezug auf die Vegetation. Aus diesem Grund ist die Messung der Saugspannung für die Landwirtschaft wichtig. Für die Befahrbarkeit können Messungen wiederum auch ausserhalb des Feldes positioniert werden.

Um Aussagen einer Messung auf andere Böden übertragen zu können, ist es besonders wichtig, dass genaue Informationen über den Boden, die Vegetation und den Niederschlag bei den Messstationen vorhanden sind.

- Ersatz von manuellen Messungen durch automatische Tensiometer, die stündliche Daten erfassen
- Es werden immer auch die Bodentemperatur und die atmosphärischen Parameter gemessen. Die Bodentemperatur wird dafür benötigt, Messungen zu korrigieren und die Keimzeit zu bestimmen. Lufttemperatur und Niederschlagsmessungen werden für die Wasserbilanz und Evapotranspiration benötigt.
- Ergänzung der bisherigen Stationen mit Messungen für Niederschlag, Luftfeuchte, Temperatur, sofern noch nicht vorhanden
- Zusätzliche Stationen an ausgewählten Standorten (in Landwirtschafts-Gebieten) mit unterschiedlichen Bodentypen und Kulturen z.B. nahe einer bestehenden Station in einer anderen Kultur (Schätzung: rund 2–3 Standorte pro Kanton)
- Parallele Messungen von volumetrischem Bodenwassergehalt und kapazitivem Widerstand, um beide Systeme vergleichen zu können. Messung in 4 Tiefen. Kalibration.

- Die Ergänzung beginnt dabei prioritär in der Nähe von meteorologischen Messstationen (SwissMetNet, evtl. Partnernetze)
- Zusatzinformationen zu Sand-/Tongehalt, Bodenentwicklung, etc. zumindest an den neuen Stationen immer erheben
- Sicherstellung der Tensiometer-Messungen auch bei Trockenperioden (dies bedingt eine häufige Wartung).
- Zudem verbesserte Bodenkarten, die z.B. Feldkapazität der Böden zeigen (nicht Teil eines Bodenfeuchte-Messnetzes)
- Die Messungen müssen online verfügbar sein.

Kostenschätzung

Unsere Kostenschätzung ist in Tabelle 10 aufgeführt. Die gesamten Kosten eines **Messnetz-Ausbaus** zum idealen Messnetz für die Nutzergruppe Hydrologie/Naturgefahren belaufen sich auf rund **3.3 Mio CHF**. Der **jährliche Betrieb** kostet rund **600'000 CHF**.

Annahmen, Zusatzinformationen:

- Bei neuen Stationen werden je 5 Tensiometer in 4 Tiefen eingesetzt
- Wassergehaltssensoren: pragmatisch nur bei neuen Stationen einsetzen
Für besseres Verständnis der Infiltrationsprozesse je 3 pro Tiefe und 1 TDR zur Kalibrierung
- Die Standorte zusätzlicher Stationen werden von den Kantonen gemäss Zonenplanung bestimmt
- Davon sollten etwa die Hälfte in unmittelbarer Nähe einer meteorologischen Station erstellt werden können.
- Nicht eingeschlossen: Versuchsfelder mit Messungen bei verschiedenen Kulturen.
- Es wurden keine Kosten für Projektierung, Pacht und Abschreibung/Erneuerung von Stationen berücksichtigt.

Tabelle 10: Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für landwirtschaftliche Zwecke.

Kostenpunkt	Anzahl	Stückpreis	Kosten
Ersatz der rein manuellen Stationen (23)			
je 1 TDR-Sensor	23	1'000	23'000
je 20 Tensiometer	460	1'000	460'000
je 12 Wassergehalts-Sensoren	276	200	55'200
atmosphärische Messungen	23	5'000	115'000
Erheben der Bodencharakteristik	23	2'000	46'000
Kosten Bau	23	15'000	345'000
Ergänzung bestehender Stationen mit atmosphärischen Messungen (2)			
alle Messinstrumente	2	5'000	10'000
Kosten Umbau	2	6'000	12'000
Zusätzliche Stationen an ausgewählten Standorten (60)			
je 1 TDR-Sensor	60	1'000	60'000
je 20 Tensiometer	720	1'000	720'000
je 12 Wassergehalts-Sensoren	720	200	144'000
Erheben der Bodencharakteristik	60	2'000	120'000
atmosphärische Messungen (an 30 Orten)	30	5'000	150'000
Kosten Bau	60	15'000	900'000
Datenmanagement			
Aufbau des Systems	1	100'000	100'000
Total Ausbaurkosten			3'260'200
Betriebskosten bestehender/erweiterter Stationen	59	4'000	236'000
Betriebskosten ersetzter/zusätzlicher Stationen	83	4'000	332'000
Betriebskosten Datenmanagement	1	20'000	20'000
Total Betriebskosten pro Jahr			588'000

6.4 Ideales Messnetz für den Bereich Meteorologie/Klimatologie

Forschende der Klimatologie untersuchen grundlegende Zusammenhänge zwischen Bodenwassergehalt, Lufttemperatur, Niederschlag, Bodentemperatur etc. Für sie ist es besonders wichtig, dass Messungen über lange Jahre mit hoher Qualität weitergeführt werden.

In der operationellen Meteorologie sind Bodenfeuchtedaten wichtige Eingangsgrößen für numerische Wettermodelle. Damit wird die Berechnung des gesamten Wasserkreislaufs verbessert. Verdunstung und Wolkenbildung, latenter Wärmetransport oder Tageshöchsttemperatur sind abhängig von der Bodenfeuchte. Das Wissen über Wasser im Boden ermöglicht es Meteorologen auch, allfällige Wetter-Warnungen gezielter vorzunehmen. Kenntnis über die örtliche Verteilung der Bodenfeuchte hilft ihnen zum Beispiel bei der Einschätzung von Gewitterrisiken oder der Gefahr von Starkniederschlägen.

Diese Daten sind auch sehr wichtig für die Evaluation von Modellen, welche benutzt werden, um Klimaszenarien für die Schweiz zu berechnen. Änderungen der Bodenfeuchte in Klimaprojektionen sind verantwortlich für einen grossen Teil der prognostizierten Erhöhung von Temperaturextremen in Zentraleuropa und auch in der Schweiz. Ausserdem sind die Mechanismen, die zu Bodenaustrocknung führen, auch für die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft, und die Umwelterhaltung sehr wichtig. Nur mit guten Bodenfeuchtedaten können diese Prozesse besser modelliert werden und damit eine geeignete Anpassung an den Klimawandel ermöglichen.

Status Quo

Das Messnetz SwissSMEX wurde explizit für klimatologische Fragestellungen ausgelegt und entspricht demzufolge deren Anforderungen. Die langfristige Finanzierung der Messungen ist allerdings bisher nicht gesichert. Diese ist für Klimastudien notwendig, um langjährige Messreihen zu erhalten. Solche hochwertigen Messreihen braucht es, um zur bisherigen Klimaänderung, deren Ursachen und den zukünftigen Szenarien fundierte Aussagen machen zu können (Seiz und Foppa 2007). Ausserdem wäre es empfehlenswert, dass das Messnetz umfangreicher wird (höhere Dichte von Stationen, mehr Vegetationstypen) und auch in weiteren Gebieten ausgebaut wird, insbesondere im Wallis und Tessin, sowie auch in höheren Lagen. Zudem sollte eine Erweiterung der Messnetze in Gebieten mit zunehmender Trockenheit geplant werden. Gebiete mit ausgeprägter Topografie sind zurzeit nur unzufriedenstellend abgedeckt (mit SwissSMEX wird im Moment nur das Mittelland und das Tessin ausreichend abgedeckt).

Im Global Climate Observing System (GCOS) sind auch Wassernutzung, Abfluss, Grundwasser, Permafrost und Waldbrände als essentielle Klimavariablen festgelegt, die langfristig überwacht werden sollen.

In der operationellen Meteorologie wird die Bodenfeuchte zwar derzeit durchaus in den Modellen berechnet (in mehr oder weniger stark vereinfachten Bodenmodulen). In den meisten Wettermodellen wird die modellierte Bodenfeuchte jedoch nicht mit Beobachtungen verglichen (und verbessert). Es besteht die Möglichkeit, die Bodenfeuchte indirekt aus den Niederschlagsdaten abzuschätzen, indem ein Land- oder hydrologisches Modell mit dem gemessenen Niederschlag angetrieben wird. Jedoch erlaubt dies keine genaue Abschätzung des Beitrags der Verdunstung an der Wasserbilanz, welcher jedoch bei Trockenheitsereignissen besonders wichtig ist. Satellitenmessungen der Bodenfeuchte sind nur für die oberste Bodenschicht verfügbar (obersten 2–3 cm), jedoch relativ ungenau in Gebieten mit dichter Vegetation oder stark variierender Topografie (und aus diesem Grund in der Schweiz nur bedingt einsetzbar). Ausserdem ist die Bodenfeuchte vor allem in der Wurzelzone (im Bereich 30–100 cm) für die Vegetation am Wichtigsten. Für tiefere Schichten müssten die Satellitendaten in die Tiefe extrapoliert werden (statistisch oder mit einem Bodenmodell. Satellitendaten müssen ebenfalls mit Bodendaten als "ground truth" verifiziert werden. Gerade auch für diese Validierung von Fernerkundungsdaten empfehlen For-

schende, dichtere in-situ-Netzwerke zu erstellen (Report of the ESA/EUMETSAT/WMO/GEWEX/CEOS/GCOS Workshop 1-3 July 2013). Diese sollen zudem Informationen zur räumlichen Heterogenität liefern.

Ausbau zum idealen Messnetz

Für die Klimatologie liegt der Fokus klar auf der langfristigen Finanzierung der bestehenden Messungen und der Qualitätssicherung.

Für meteorologische Anwendungen gilt es, möglichst viele klimatologisch unterschiedliche Regionen abzudecken (und in diesen eine repräsentative Anzahl von Stationen zu haben) insbesondere auch Regionen, die in Zukunft potentiell trockener werden. Die Daten sollten in hoher zeitlichen Auflösung (stündlich) und standardisiert in guter Qualität erhoben werden. Solche Messungen müssten als Einflussgrösse in globale oder regionale Wettermodelle allerdings weltweit gemacht werden. Beschränkt sich das Bodenfeuchte-Messnetz auf die Schweiz, dient es vor allem zur Validierung der Satellitendaten und allenfalls für die Verbesserung lokaler numerischer Modelle.

Somit sollte ein Ausbau für klimatologische und meteorologische Zwecke folgende Punkte umsetzen:

- Sicherstellung des Weiterbetriebs der bisherigen Messstationen über viele Jahre
- Ersatz von manuellen Messungen durch automatische Sensoren, die mindestens stündlich Daten liefern
- Ergänzung der bisherigen Stationen mit Messungen für Niederschlag, Luftfeuchte, Temperatur, Wind, sofern noch nicht schon vorhanden. Diese Sensoren müssen meteorologischen Standards entsprechen.
- Weitere neue Stationen in unmittelbarer Nähe meteorologischer Messungen (SwissMetNet-Standorte oder auch Partnernetze)
- Prioritär werden die 29 Klimastationen des SwissMetNet (bei 4 davon gibt es bereits Bodenfeuchte-Messungen) sowie weiteren 45 SwissMetNet-Standorte mit Bodenfeuchtemessungen ergänzt; insgesamt wären somit an ca. der Hälfte der SwissMetNet-Standorte (d.h. ca. 70) Bodenfeuchtemessungen anzustreben, wobei die Auswahl entsprechend der Repräsentativität getroffen wird.
- Bodenfeuchte vorwiegend als Wassergehalt messen
- Dazu genaue Sensoren verwenden. Empfehlung: pro Tiefe zur Kalibrierung auch je eine TDR-Messung; Erfahrungen haben gezeigt, dass TDR Messungen genauer sind und ausserdem weniger Ausfälle zeigen.

- Messung der Bodenfeuchte in mindestens 4 Tiefen (5, 10, 20 und 50 cm). Dies ist eine Mindestanforderung, um die Bodenfeuchte in der Wurzelzone korrekt abschätzen zu können. Idealerweise sollte noch eine Messung in 80 cm oder 1 m gemacht werden, jedoch ist hier die Installation sehr schwierig.
- Kontinuierliche Überwachung und regelmässige Wartung der Stationen

Kostenschätzung

Unsere Kostenschätzung ist in Tabelle 11 aufgeführt. Die gesamten Kosten eines **Messnetz-Ausbaus** zum idealen Messnetz für die Nutzergruppe Hydrologie/Naturgefahren belaufen sich auf rund **3.3 Mio CHF**. Der **jährliche Betrieb** kostet rund **700'000 CHF**.

Annahmen, Zusatzinformationen:

- Bei neuen Stationen werden je 2 kapazitive Sensoren und je 1 TDR-Sensor in 4 Tiefen eingesetzt (5, 10, 20, 50 cm)
- Tensiometer: pragmatisch nur bei neuen Stationen einsetzen, 5 pro Tiefe
- Auch die Bodencharakteristik wird praktischerweise nur bei neuen und ersetzten Bodenfeuchte-Messstationen erhoben
- Neue Bodenfeuchte-Messungen werden prioritär bei den 29 Klimastationen des SwissMetNet gemacht:
des weiteren werden 45 SwissMetNet-Standorte mit Bodenfeuchtemessungen ergänzt; insgesamt wären somit an ca. der Hälfte der SwissMetNet-Standorte (d.h. ca. 70) Bodenfeuchtemessungen anzustreben, wobei die Auswahl entsprechend der Repräsentativität getroffen wird.
- Atmosphärische Messgeräte einer Bodenstation nach WMO-Standard kosten CHF 15'000.
- Die aufwändigere Wartung und Überwachung wird in diesem Fall mit jährlich 6'000 statt 4'000 Fr. pro Station veranschlagt.
- Es wurden keine Kosten für Projektierung, Pacht und Abschreibung/Erneuerung von Stationen berücksichtigt.

Tabelle 11: Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für Meteorologie/Klimatologie.

Kostenpunkt	Anzahl	Stückpreis	Kosten
Ersatz der rein manuellen Stationen (23)			
je 5 TDR-Sensoren	115	1'000	115'000
je 8 Wassergehalts-Sensoren	184	200	36'800
je 16 Tensiometer	368	1'000	368'000
atmosphärische Messgeräte	23	15'000	345'000
Erheben der Bodencharakteristik	137	2'000	274'000
Kosten Bau	23	14'000	322'000
Ergänzung der Stationen mit atmosphärischen Messungen (2)			
alle Messinstrumente	2	15'000	30'000
Kosten Umbau	2	6'000	12'000
Ergänzung der SwissMetNet Stationen (45)			
je 4 TDR-Sensoren	225	1'000	225'000
je 8 Wassergehalts-Sensoren	360	200	72'000
je 16 Tensiometer	720	1'000	720'000
Kosten Bau	45	14'000	630'000
Erheben der Bodencharakteristik	45	2'000	90'000
Datenmanagement			
Aufbau System	1	100'000	100'000
Total Ausbaurkosten			3'339'800
Betriebskosten bestehender/erweiterter Stationen	45	6'000	270'000
Betriebskosten ersetzter/zusätzlicher Stationen	68	6'000	408'000
Betriebskosten Datenmanagement	1	20'000	20'000
Total Betriebskosten pro Jahr			698'000

6.5 Ideales Messnetz für den Bereich Naturschutz

Der Ausbau sollte entsprechend der Einteilung schützenswerter Gebiete von nationaler Bedeutung priorisiert werden. Zu diesem Bereich konnten wir im Rahmen des aktuellen Projekts keine konkreten Anforderungen zusammentragen. Möglicherweise haben Personen dieser Nutzergruppe sich auch einer anderen Nutzergruppe zugehörig gefühlt. Aus diesem Grund gehen wir davon aus, dass die notwendigen Erweiterungen für den Bereich Naturschutz durch die Anforderungen anderer Nutzergruppen abgedeckt sind.

6.6 Ideales Messnetz für den Bereich Forstwirtschaft

Die notwendigen Erweiterungen für den Bereich Forstwirtschaft werden durch die Anforderungen der Hydrologie und Meteorologie/Klimatologie abgedeckt.

6.7 Ideales nutzergruppenübergreifendes Messnetz

Für den Aufbau eines nutzergruppenübergreifenden Messnetzes müssten die bestehenden Messnetze kombiniert und gezielt ergänzt werden. In der Planungsphase müssten dazu die Anforderungen der verschiedenen Nutzergruppen priorisiert werden, was ausserhalb des Aufgabenbereichs der vorliegenden Arbeit lag. Deshalb skizzieren wir in diesem Kapitel eine nur sehr grobe Schätzung von Umfang und Kosten eines nutzergruppenübergreifenden Messnetzes.

Werden die in den Kapiteln 6.1 bis 6.4 skizzierten idealen Messnetze kombiniert, kommen Synergien zustande, zum Beispiel:

- Viele der Stationen dienen mehreren Bereichen. Grob geschätzt umfasst das ideale Messnetz **100 bestehende und 200 neue Stationen**.
- Das Datenmanagement kann gemeinsam aufgebaut und betrieben werden.

Tabelle 12 enthält die **sehr grobe Kostenschätzung** des idealen nutzergruppenübergreifenden Messnetzes. Es resultieren für den **Ausbau** Kosten von rund **10 Mio. CHF** und für den **jährlichen Betrieb** Kosten von gegen **2 Mio CHF**.

Wie bereits zu Beginn von Kapitel 6 beschrieben, erachten wir die in Tabelle 12 geschätzten Kosten für Aufbau und Betrieb des Datenmanagements als realistisch für die Anbindung an eine bestehende Lösung oder für eine neu erstellte schlanke Lösung, für deren Aufbau und Betrieb eine externe Firma mandatiert wird. Sollte hingegen eine neue Lösung nach den IT-Prozessen des Bundes sowie auf Bundesinfrastruktur realisiert werden, müsste von beträchtlich höheren Kosten ausgegangen werden (schätzungsweise Faktor 5–10).

Tabelle 12: Grobe Schätzung der Ausbau- und Betriebskosten für ein ideales nutzergruppenübergreifendes Messnetz.

Kostenpunkt	Anzahl	Stückpreis	Kosten
Ausbau zum idealen Messnetz			
Ersatz bestehender / Bau neuer / Ausbau SMN-Stationen	200	40'000	8'000'000
Ergänzung bestehender Stationen	2	20'000	40'000
Aufbau Datenmanagement			200'000
Projektierungskosten (20%)			1'648'000
Total Ausbaukosten			9'888'000
Betriebskosten bestehender/erweiterter Stationen	100	4'000	400'000
Betriebskosten ersetzter/zusätzlicher Stationen	200	4'000	800'000
Betriebskosten Datenmanagement	1	40'000	40'000
Erneuerung der Messsensorik (ca. 10% Stationskosten)	300	1'000	300'000
Pacht, Instandhaltung Grundstück u.ä.	300	1'000	300'000
Total Betriebskosten pro Jahr			1'840'000

7 Diskussion und Schlussfolgerungen

7.1 Messmethoden der Bodenfeuchte

Der Vergleich der Messmethoden lässt sich aus unserer Sicht wie folgt zusammenfassen:

- Die **mehrheitlich verwendete Messmethoden** sind Tensiometer (Saugspannung) und TDR-Sensoren oder kapazitive dielektrische Sensoren (Wassergehalt). Es sind sehr viele andere Methoden verfügbar. Die beiden oben erwähnten Methoden sind jedoch sehr gut erprobt und die Betreiber der Messungen sind mehrheitlich zufrieden damit (bei den kostengünstigeren kapazitiven Sensoren ist dies jedoch vom Modell abhängig).
- Der **Vorteil der Wassergehalts-Messungen** liegt darin, dass die Bodenwassergehaltsmessungen ohne Unterbruch verfügbar sind (auch bei andauernder Trockenheit) und ausserdem eine meist hohe Genauigkeit aufweisen. Der Nachteil besteht darin, dass die Messungen unter feuchten Bedingungen teils ungenau sind und der absolute Wassergehalt wenig über die Auswirkungen der Bodenfeuchte auf Vegetation aussagt.
- Der **Vorteil von Saugspannungs-Messungen** liegt darin, dass eine direkte Aussage über den Trockenstress der Vegetation (ohne die Bodencharakteristik genau zu kennen) möglich ist, insbesondere im empfindlichen Bereich (z.B. Welkepunkt der Pflanzen). Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass bei lang anhaltender Trockenheit oder Frost Messungen fehlen können und die Messungen weniger genau sind als z.B. mit dem TDR.

Zentrale Schlussfolgerung zu den Messmethoden ist aus unserer Sicht, dass für genaue, kontinuierliche Messungen mit aussagekräftigen Daten über Trockenheit **Kombinationsmessungen** der beiden genannten Methoden (Tensiometer und TDR-Sensoren oder kapazitive dielektrische Sensoren) sehr empfehlenswert, wenn nicht unabdingbar sind. Dies hilft auch, das Verhältnis Saugspannung–Wassergehalt Bodencharakteristik besser zu verstehen.

7.2 Bestehende Messnetze

Heute bestehen in der Schweiz verschiedene, sehr heterogene Bodenfeuchte-Messnetze. Messmethoden, Sensoren, Standorte, Messtiefen und Replikationen unterscheiden sich sehr stark.

Zwei verschiedene Herangehensweisen können unterschieden werden: einerseits Bodenfeuchtemessungen, welche das Thema "Bodenschutz" als Ausgangslage haben und somit aus einem gesetzlichen Auftrag resultieren und andererseits Bodenfeuchtemessungen, welche aus dem Bereich Klimatologie/Meteorologie kommen und somit zur (Grundlagen-)Forschung zählen.

Praktisch alle Betreiber wünschen eine vermehrte Zusammenarbeit oder Vernetzung der verschiedenen Messnetze. Besonders häufig wird als Form der Vernetzung eine **zentrale Plattform** genannt, worauf alle Messwerte der Schweiz im Überblick eingesehen werden können. Ein zweiter wichtiger Punkt ist die **Standardisierung** im Sinne einer Vereinheitlichung der Methodik und Verbesserung der Datenvergleichbarkeit.

7.3 Nutzergruppen und ihre Ansprüche

Zusammenfassend kann für alle Nutzergruppen gesagt werden, dass die Wichtigkeit der Bodenfeuchtemessung für alle Nutzergruppen von zunehmender Bedeutung ist und **mehr Daten gewünscht** werden, welche einheitlich und online zugänglich sind.

Die Bedürfnisse der einzelnen Nutzergruppen sind jedoch sehr unterschiedlich. Deshalb wurde im Verlauf der Arbeiten entschieden, die Anforderungen, Spezifikationen und Kosten eines idealen Messnetzes pro Nutzergruppe bzw. Bereich zu betrachten.

7.4 Ideales Bodenfeuchte-Messnetz

Aus unserer Sicht könnte den oben genannten Wünschen am besten entsprochen werden, wenn die heutigen **Messnetze weitergeführt** würden und durch einen gezielten Ausbau **standardisiert** und qualitativ **verbessert** werden. Die entsprechenden Anforderungen unterscheiden sich pro Bereich:

- **Hydrologie und Naturgefahren:** Die bestehenden Messungen sind ungenügend. Alpen und Voralpen sind für gravitative Naturgefahren besonders kritisch. Dies betrifft insbesondere Höhenlagen zwischen 800 und 1500 m. ü. M. Nur gerade 15 Messstationen sind heute im gefragten Bereich. Regionen mit potentieller Trockenheit sind aktuell nur spärlich abgedeckt.
- **Bodenschutz:** Die Variabilität der Böden und Vegetation ist sehr gross. Deshalb ist es mit einem punktuellen Messnetz nicht möglich, genaue Angaben über sämtliche Böden in einem grossen Gebiet zu machen. Neben einer genügenden Anzahl Stationen in repräsentativen Bodentypen ist es wesentlich, dass die Eigenschaften der Böden und der Vegetation bekannt sind, um Messungen auf andere Standorte übertragen zu können. Kombinationsmessungen sind notwendig, um kritische Situation (z.B. komplett durchnässter Boden) besser erfassen zu können.
- **Landwirtschaft:** Aktuelle Messnetze sind für die Fragestellung der "Befahrbarkeit" und nicht für die Landwirtschaft ausgelegt. Es ist für die Landwirtschaft zurzeit nicht möglich, bestehende Systeme im Rahmen der Bewässerung zu nutzen. Mit genauen Informationen über Boden, Vegetation und Niederschlag bei den Messstationen ist eine Interpretation und Nutzung für die Landwirtschaft besser möglich.

- **Meteorologie und Klimatologie:** Die langfristige Finanzierung und Qualitätssicherung des bestehenden Messnetzes (SwissSMEX) ist essentiell, aber nicht gesichert. Eine bessere Abdeckung von Regionen, welche in Zukunft potentiell trockener werden und von Gebieten, welche ausgeprägte Topografien aufweisen ist wichtig. Zudem sollten mehr Vegetationstypen abgedeckt werden.

Die Priorisierung, Koordination sowie der Auftrag zur Umsetzung des Ausbaus sind politischer Natur und könnten aus unserer Sicht eine Aufgabe des nationalen Kompetenzzentrums Boden sein.

Sobald eine Priorisierung und Konkretisierung vorgenommen worden ist, kann das entsprechende Messnetz und deren Ausstattung detaillierter spezifiziert und budgetiert werden als es in der vorliegenden Evaluation möglich war.

8 Literaturverzeichnis

- Bundesgesetz über den Umweltschutz.* (1. April 2015).
- ESA. „Report of the ESA/EUMETSAT/WMO/GEWEX/CEOS/GCOS Workshop.“ *Satellite Soil Moisture Validation and Application Workshop.* Frascati, Italy, 1-3 July 2013.
- Gisi, Ulrich, Rudolf Schenker, Rainer Schulin, Franz X. Stadelmann, und Hans Sticher. *Bodenökologie.* Georg Thieme Verlag Stuttgart; New York, 1997.
- Haslinger, Klaus, Wolfgang Schöner, und Ivonne Anders. „Future drought probabilities in the Greater Alpine Region based on COSMO-CLM experiments – spatial patterns and driving forces.“ *Meteorologische Zeitschrift*, November 2014.
- Jaeger, E. B., und S. I. Seneviratne. „Impact of soil moisture–atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model.“ *Climate Dynamics*, May 2011: 1919-1939.
- Kanoun, Olfa, Andrey Tetyuev, und Hans-Rolf Tränkler. „Bodenfeuchtemessung mittels Impedanzspektroskopie.“ *Technisches Messen*, September 2004: 475-485.
- Lekshmi S.U., Sussha, Devendra N. Singh, und Maryam Shojaei Baghini. „A critical review of soil moisture measurement.“ *Measurement*, August 2014: 92-105.
- Lorenz, Ruth, Eric B. Jaeger, und Sonia I. Seneviratne. „Persistence of heat wovens and its link to soil moisture memory.“ *Geophysical Research Letters*, 6. May 2010: L09703.
- Mittelbach, Heidi, Interview geführt von Eva Stehrenberger. *Gespräch über Messmethoden und SwissSMEX* ETH Zürich, (26. Oktober 2015).
- Mittelbach, Heidi. „Soil Moisture in Switzerland: Analyses from the Swiss Soil Moisture Experiment.“ Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Zürich, 2011.
- Mittelbach, Heidi, und Sonia I. Seneviratne. „A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: temporal dynamics versus time-invariant contributions.“ *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012: 2169-2179.
- Mittelbach, Heidi, und Sonia I. Seneviratne. „Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz) - Zusatzkapitel Bodenfeuchte.“ Publikation von MeteoSchweiz und ProClim, Swiss GCOS Office, 2015, 2.
- Scheffer/Schachtschabel, Hrsg. *Lehrbuch der Bodenkunde.* 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
- Seiz, Gabriela, und Nando Foppa. „Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz).“ Publikation von MeteoSchweiz und ProClim, Swiss GCOS Office, 2007, 92.

- UVEK. „Umgang mit lokaler Wasserknappheit. Bericht des Bundesrates zum Postulat "Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen".“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2012.
- Walter, Hansjörg. „Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen.“ *Postulat 10.3533*. Bern: Nationalrat, 2010.
- World Meteorological Organization. „Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2008 edition, updated in 2010.“ Geneva, 2012, Chapter 11.
- Zreda, M., et al. „COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System.“ *Hydrology and Earth System Sciences*, November 2012: 4079-4099.

9 Anhang

9.1 Verschiedene Messmethoden

Die Zusammenstellung in Tabelle 13 basiert auf Informationen mehrerer Quellen (Lekshmi S.U., Singh und Shojaei Baghini 2014, Kanoun, Tetyuev und Tränkler 2004, Mittelbach, Gespräch über Messmethoden und SwissSMEX 2015, Zreda, et al. 2012).

Tabelle 13: Übersicht über die Messmethoden der Bodenfeuchte.

Messmethode	Messgrösse	Prinzip Funktionsweise	Erwähnte Vorteile (+) und Nachteile (-)
Gravimetrie (Wäge-Methode)	Gewichts-Wassergehalt	Differenz des Bodengewichts zwischen feuchtem und trockenem Zustand	+ sehr genau + günstig - nur für Labor - destruktiv - zeitintensiv - nicht kontinuierlich
Zeitbereichs-Reflektometrie (Time Domain Reflectometry, TDR)	volumetrischer Wassergehalt	Dielektrizitätskonstante der Probe hat empirische Relation zum vol. Wassergehalt Misst Laufzeit elektromagnetischer Pulse im Boden	+ genau + schnell - Kalibrierung nötig - Einfluss von Salzgehalt - teuer
Frequenzbereichs-Reflektometrie (FDR)	volumetrischer Wassergehalt	Dielektrizitätskonstante der Probe hat empirische Relation zum vol. Wassergehalt FDR: Misst bei verschiedenen Frequenzen	+ genau - häufige Kalibrierung nötig - Einfluss von Salzgehalt
kapazitive Messung	volumetrischer Wassergehalt	Dielektrizitätskonstante der Probe hat empirische Relation zum vol. Wassergehalt Kapazitive M.: Misst Ladezeit eines Kondensators, der die Probe als Dielektrikum nutzt	+ günstig - Einfluss von Salzgehalt - ungenau bei hoher Feuchte - Ortspezifische Kalibrierung nötig
elektrische Leitfähigkeit/Widerstand	Matrixpotential	Leitfähigkeit eines porösen Blocks im Boden ist abhängig von der Feuchte (Gips, Keramik, Nylon, Glasfaser)	+ günstig - eher ungenau - individuelle Kalibrierung nötig (diese ist aber schnell) - starke Hysterese - Gipsblock nicht für Langzeitmessung (löst sich teils auf)
thermische Leitfähigkeit 1 Wärmeleitung von Block	Matrixpotential	poröser Keramikblock im Boden gibt Wärme ab, deren Ableitung durch den Boden wird gemessen	+ günstig - Kalibrierung nötig

Messmethode	Messgrösse	Prinzip Funktionsweise	Erwähnte Vorteile (+) und Nachteile (-)
thermische Leitfähigkeit 2 Wärme flux-Sensor	volumetrischer Wassergehalt	Sonde mit einem Heizstab und einem Temperatursensor misst Temperaturanstieg nach einem Wärmepuls in kurzer Distanz Dies steht im Bezug zur volumetrischen Wärmekapazität (und daher Feuchtegehalt der Probe)	- Bodendichte muss bekannt sein - nur für quellfestes Material
Tensiometrie	Matrixpotential	Trocknender Boden übt eine Saugspannung auf eine poröse, wassergefüllte Keramikkerze aus, worin der entstehende Unterdruck gemessen wird	+ keine Kalibrierung nötig + direkte Messung des Matrixpotentials - Unterhalt aufwändig (nachfüllen) - nicht für dauerhaft trockene oder sehr lufthaltige Böden - beschränktes Messintervall - Kalibrierung nötig (gemäss Publikation, gemäss Praxis nicht)
magnetisches Verfahren	volumetrischer Wassergehalt	Kernmagnetische Resonanz der Wasserstoffatome	- nur für Labor - destruktiv - teuer
Mikrowellen-Messung	volumetrischer Wassergehalt	Verstimmung eines Mikrowellensensors abhängig von der Feuchte	+ sehr genau - Kalibrierung nötig - teuer
Mikrowellen-Satelliten-Messung	volumetrischer Wassergehalt	Rückstreuung als Funktion der dielektrischen Eigenschaft des Bodens (abh. vom Wassergehalt); 0.5 – 2 cm Eindringtiefe	+ flächige Abdeckung + nicht invasiv - ungenau - nur oberste cm - keine Messung bei Vegetation, Schnee, etc. - teuer
Radiometrie 1 Neutronen-Streuung	volumetrischer Wassergehalt	Wechselwirkung des feuchten Materials mit radioaktiver Strahlung schnelle Neutronen werden durch Wasserstoffkerne im Boden gebremst	+ genau + Profilmessung möglich + schnell - Messung erst ab 30 cm - strikte Auflagen, Sicherheitsrisiken - schlechte Akzeptanz - teuer
Radiometrie 2 Gammastrahlen-	volumetrischer Wassergehalt	Streuung und Absorption von Gammastrahlung ab-	+ hohe Auflösung - nur bis 25 mm Tiefe

Messmethode	Messgrösse	Prinzip Funktionsweise	Erwähnte Vorteile (+) und Nachteile (-)
Dämpfung		hängig von der Dichte (und daher Feuchte) des Materials	- strikte Auflagen, Gefahr - schlechte Akzeptanz - teuer
Equitensiometrie	Matrixpotential	„Messung des volumetrischen Wassergehalts Gleichgewichtskörper mit bekannter pF-Kurve und Umrechnung auf Saugspannung“	- intensive Kalibrierung nötig - Hysterese - wenig Erfahrung in der Praxis - teuer
Impedanz-Spektroskopie	Wassergehalt	Dielektrizitätskonstante der Probe hat empirische Relation zum vol. Wassergehalt Bestimmung des Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante und physikalisch/mathematische Signalverarbeitung; Entwicklung sehr teuer, nachher günstig	+ unabhängig von Bodenart + genau - viele Untersuchungen nötig zur Entwicklung der Signalbearbeitung - kaum Erfahrung im Feld
MEMS (Micro Electro Mechanical System)	k.A.	Nanotechnologie	- keine Praxiserfahrung
optische Verfahren (Glasfaser oder nIR-Licht, auch polarisiert)	k.A.	Eigenschaften des einfallenden und reflektierten Lichts ändern sich, beim durchlaufen der Bodenprobe	- keine Praxiserfahrung
Ground Penetrating Radar (GPR)	k.A.	Radar	- grosses Anwenderwissen nötig - ungenau bei salzigem Boden
Cosmic Ray Neutronen-Dämpfung	Wassergehalt	Bestimmung der Neutronen-Dämpfung der kosmischen Strahlung durch den Boden, was vom Wassergehalt abhängt. Misst flächige Mittel (über einige Dutzend Quadratmeter), wobei das Messgerät auf dem Boden steht und nicht eingegraben wird.	(Neuentwicklung, Tests in USA)
Piezometer	Druck	Messung des Druckpotenzials.	

- 9.2 Fragebogen Messnetz-Betreiber**
- 9.3 Fragebogen Nutzer**
- 9.4 Antworten Befragung Betreiber ("Liste_Messstationen.xlsx" als Beilage, Antworten der Umfrage auf Anfrage)**
- 9.5 Antworten Befragung Nutzer (auf Anfrage)**