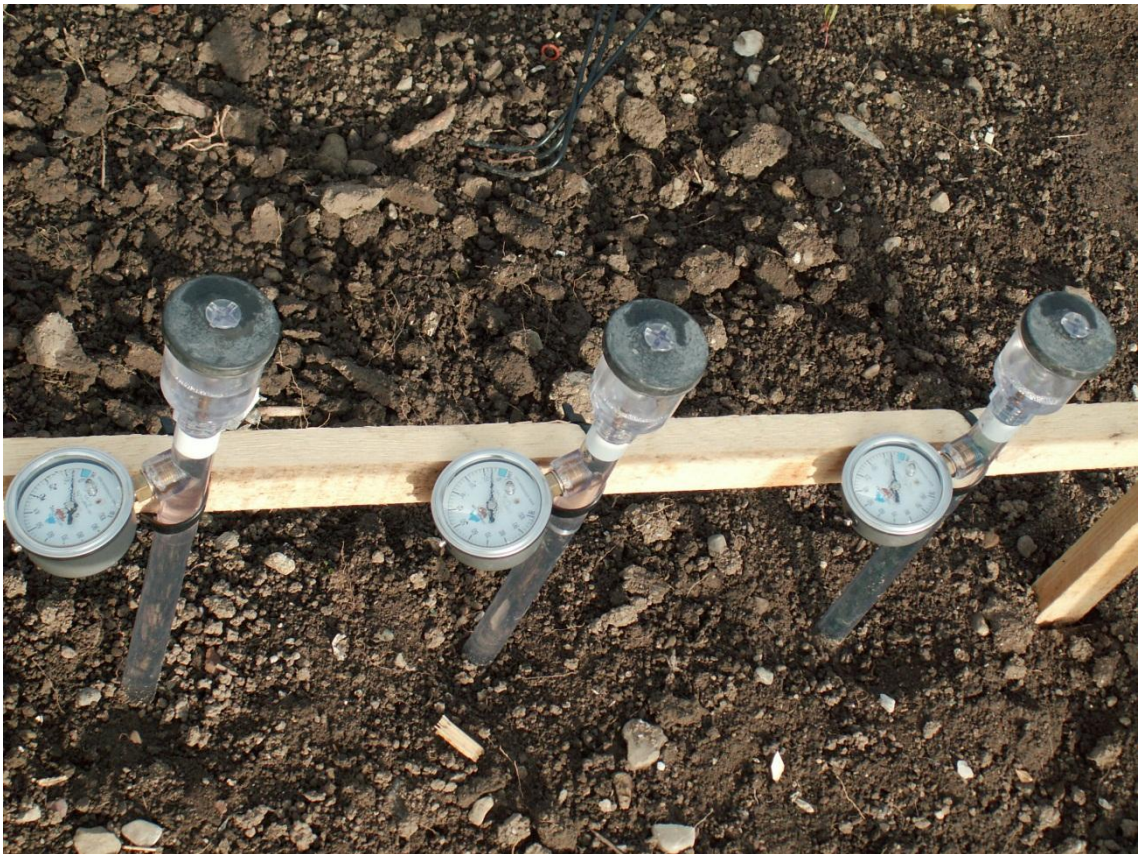


Forschungsprojekt Adaptive genetische Variation von Buche, Tanne und Fichte

Dokumentation der Feldinstallationen 2012: Bodenfeuchtesensoren und Meteostationen

Aline Frank, Gustav Schneiter, Peter Waldner, Lorenz Walthert, Caroline Heiri



Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee
und Landschaft WSL

Birmensdorf, März 2013

Autoren:

Aline Frank, Gustav Schneiter, Peter Waldner, Lorenz Walthert, Caroline Heiri

Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

Ein Bericht aus dem Projekt «Adaptive genetische Variation von Buche, Tanne und Fichte» (http://www.wsl.ch/forschung/forschungsprojekte/wsl_genetische_variation)

Zitierung:

Aline Frank, Gustav Schneiter, Peter Waldner, Lorenz Walthert, Caroline Heiri 2013. Forschungsprojekt Adaptive genetische Variation von Buche, Tanne und Fichte. Dokumentation der Feldinstallationen 2012: Bodenfeuchtesensoren und Meteostationen. Birmensdorf, Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landschaft, 24 S., unveröff.

Dank

Für die Beratung bei der Auswahl der Bodenfeuchtesensoren danken wir Elisabeth Graf Pannatier. Roger Köchli und Marco Walser danken wir herzlich für ihren Einsatz bei der Installation der Bodenfeuchtesensoren, Roger Köchli insbesondere auch für die Hilfe beim Kalibrieren der EC-5 Sensoren. Oliver Leisibach und Marc Adami waren beim Verkabeln der Sensoren massgeblich beteiligt, Peter Bleuler hat dafür Material zur Verfügung gestellt. Zum Datenmanagement hat Peter Jakob viel beigetragen. Auch ihnen allen gebührt ein grosses Dankeschön. Wir bedanken uns zudem bei Milo Jozic von AgroTerra GmbH für die unkomplizierte Unterstützung beim Einsatz der Tensiometer sowie Beat Büttler für die Hilfe beim Aufstellen der Meteostation in Matzendorf.

Umschlagbild: Jet Fill Tensiometer auf der Versuchsfläche in Birmensdorf für die manuelle Aufzeichnung der Saugspannung im Boden (Foto: Aline Frank).

Inhalt

Abkürzungen.....	4
1 EINLEITUNG.....	5
2 BODENFEUCHTESENSOREN.....	5
2.1 Sensortypen.....	5
2.1.1 EC-5.....	5
2.1.2 MPS-2.....	5
2.1.3 Tensiometer.....	6
2.2 Sensorflächen.....	7
2.3 Auswahl der Messtiefen.....	7
2.4 Verteilung der Bodenfeuchtesensoren.....	8
2.5 Installation im Feld.....	10
2.5.1 EC-5 und MPS-2 Sensoren.....	10
2.5.2 Tensiometer.....	10
2.6 Kalibration der EC-5 Sensoren.....	11
2.7 Wartung der Bodensensoren.....	12
3 METEOSTATIONEN.....	13
3.1 Aufbau der Meteostationen.....	13
3.2 Anschluss der Bodensensoren an die Meteostationen.....	15
4 DATENVERWALTUNG.....	16
5 DOKUMENTATION.....	16
6 LITERATUR.....	17
7 ANHANG.....	17

Abkürzungen

Ah	Oberbodenhorizont mit Humusanreicherung
CR1000	Spezifischer Dataloggertyp von Campbell Scientific (Logan UT, USA)
EC-5	Elektronischer Bodenwassergehaltssensor (Decagon Devices, Pullman WA, USA)
GHUMact	Resultierender Bodenwassergehalt der EC-5 Kalibrationsgleichung
GHUMcali	Kalibrationsfaktor; Steigung der EC-5 Kalibrationsgeraden
GHUMmeas	Gemessener Bodenwassergehalt, der in die EC-5 Kalibrationsgleichung einfließt
GHUMoffset	Achsenabschnitt der EC-5 Kalibrationsgeraden
G _{o/r}	Unterbodenhorizont im Grundwasserbereich mit redoximorphen Merkmalen
GPRS	General Packet Radio Service; paketerientierter Dienst zur Datenübertragung in GSM-Netzen
GSM	Global System for Mobile Communications; Standard für volldigitale Mobilfunknetze
LWF	Langfristige Waldökosystem-Forschung
MPS-2	Elektronischer Sensor zur Ermittlung der Bodensaugspannung und Bodentemperatur
pF	Dekadischer Logarithmus des Betrags der Saugspannung. Bezeichnet das Matrixpotential, d.h. die Energie, mit der das Bodenwasser entgegen der Schwerkraft in der Bodenmatrix gehalten wird.
SQL	Structured Query Language; Datenbanksprache
UV-B	Ultraviolettstrahlung
VWC	Volumetric Water Content; bezeichnet z.B. den volumetrischen Bodenwassergehalt

1 EINLEITUNG

Für die Charakterisierung des Bodenwasserhaushalts und der Witterung an den beiden Versuchsstandorten Birmensdorf und Matzendorf während der Feldexperimente des Projekts ADAPT sowie zur Überwachung späterer Trockenstressbehandlungen wurden zwischen März und September 2012 auf beiden Versuchsflächen Bodenfeuchte- und Meteosensoren installiert. Die Sensoren wurden an zwei fix installierten Meteostationen angeschlossen, von wo aus die gemessenen Daten an einen Server der WSL übermittelt und anschliessend in eine Oracle Datenbank eingelesen werden. Dieser Bericht fasst die einzelnen Schritte dieser technischen Installationen zusammen.

2 BODENFEUCHTESENSOREN

2.1 Sensortypen

Für die Erfassung der Bodenfeuchtigkeit auf den Versuchsflächen kommen sowohl elektronische Sensoren vom Typ EC-5 und MPS-2 (Decagon Devices 2010, 2011) wie auch manuelle Tensiometer (Soilmoisture Equipment 2011) zum Einsatz. Eine Zusammenstellung aller elektronischer Messungen ist im Verzeichnis der Dokumente, Kapitel 5, angegeben.

2.1.1 EC-5

Die EC-5 Sensoren (Abbildung 1, A; Decagon Devices, Pullman WA, USA) ermitteln den **volumetrischen Bodenwassergehalt (VWC)** in m^3/m^3 resp. % VWC via Messung der dielektrischen Konstanten des Bodens. Der Messbereich reicht von 0 bis 100 % VWC. Die Messgenauigkeit mit bodenspezifischer Kalibrierung beträgt laut Hersteller $\pm 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (± 2 % VWC).

2.1.2 MPS-2

Die MPS-2 Sensoren (Abbildung 1, B; Decagon Devices, Pullman WA, USA) bestimmen das Matrixpotential, d.h. die **Saugspannung** im Boden in kPa über eine kleine Keramikplatte mit bekanntem Porensystem. Gemessen wird der Wassergehalt in der Keramikplatte (wie bei EC-5 Sensoren), dann wird daraus via keramikspezifischer Desorptionskurve die Saugspannung berechnet. Der Messbereich deckt -5 (~ Feldkapazität) bis -500 kPa ab (entspricht pF 1.71 bis pF 3.71). Die Messunsicherheit beträgt im Bereich zwischen -5 und -100 kPa ± 25 % der gemessenen Saugspannung. Bei grösserer Trockenheit nimmt die Sensitivität des Sensors ab, was die Messunsicherheit erhöht (± 35 % der gemessenen Saugspannung bei -300 kPa und ± 50 % bei -500 kPa).

Zusätzlich zeichnen die MPS-2 Sensoren die **Bodentemperatur** im Bereich von -40 °C bis +50 °C auf. Die Messgenauigkeit liegt dabei bei ± 1 °C.

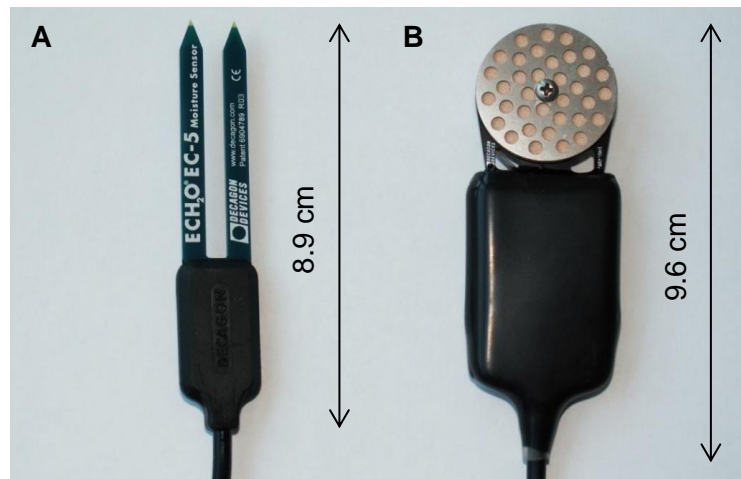


Abbildung 1: Elektronische Bodenfeuchtesensoren. **A)** EC-5 Sensor (Decagon Devices 2010) zur Messung des volumetrischen Wassergehalts. **B)** MPS-2 Sensor (Decagon Devices 2011) zur Ermittlung des Matrixpotentials (Saugspannung).

2.1.3 Tensiometer

Zusätzlich zu den EC-5 Sensoren wird mithilfe von Jet Fill Tensiometern (Abbildung 2; Soil Moisture Equipment, Santa Barbara CA, USA) die **Saugspannung** in cbar (\triangleq kPa) gemessen. Damit wird ein Bereich von 0 bis ca. -85 kPa abgedeckt. Die Tensiometer werden draussen im Feld manuell abgelesen, da sie nicht elektronisch konzipiert sind.

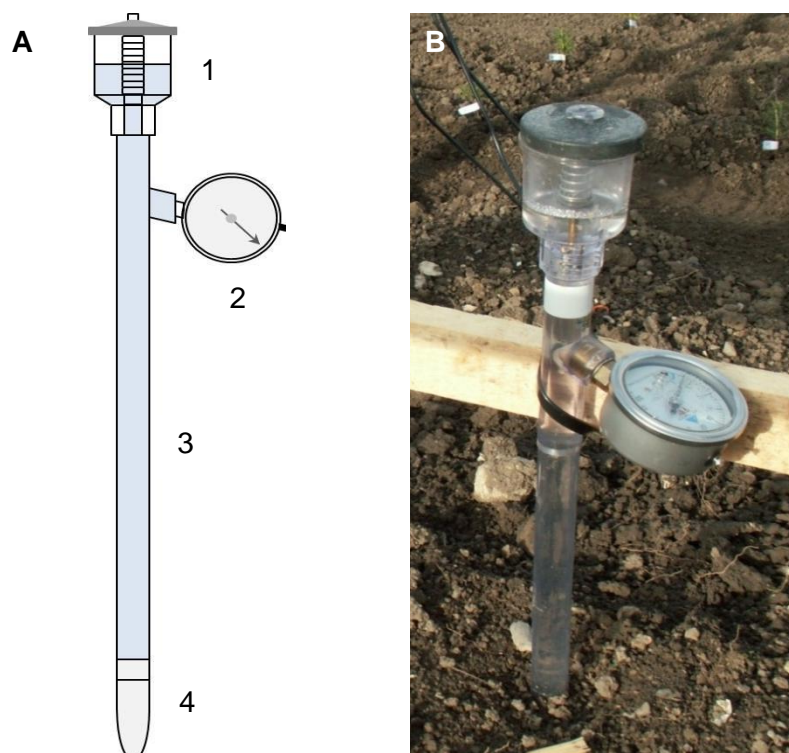


Abbildung 2: **A)** Das Jet Fill Tensiometer besteht aus einem Wasserreservoir (1), über das Wasser in das Rohr nachgespritzt werden kann, aus einem Manometer (2) zum Ablesen der Saugspannung, einem Plastikrohr (3), das den Tensiometerkörper bildet und einer Keramikkerze (4), über die der Wasseraustausch mit dem Boden stattfindet. **B)** Im Feld werden die Tensiometer mit Dachlatten stabilisiert.

2.2 Sensorflächen

Für die Installation der Bodenfeuchtesensoren wurden innerhalb der Versuchsflächen jeweils in den Zwischenräumen angrenzender Blöcke zwei Kleinflächen pro Baumart ausgewählt (Abbildung 3). Diese Sensorflächen wurden so gewählt, dass man in einer allfälligen Trockenstressbehandlung zu einem späteren Zeitpunkt eine Fläche pro Baumart bewässern und die andere austrocknen lassen kann (Versuchsdesign in Frank et al. 2012). Die Sensorflächen sind 2 m breit (entsprechend Blockbreite) und ca. 1.2 m lang. Eine Ausnahme bilden die Flächen B3 und B4: Damit darauf je 27 Bodensensoren Platz fanden, wurden sie auf 2 m x 2 m vergrößert.

Als Abschränkungen rund um die Sensorflächen wurden auf Kniehöhe Dachlatten angebracht. Als Eckpfosten dienten hölzerne Pfosten mit einem Durchmesser von 4 cm.

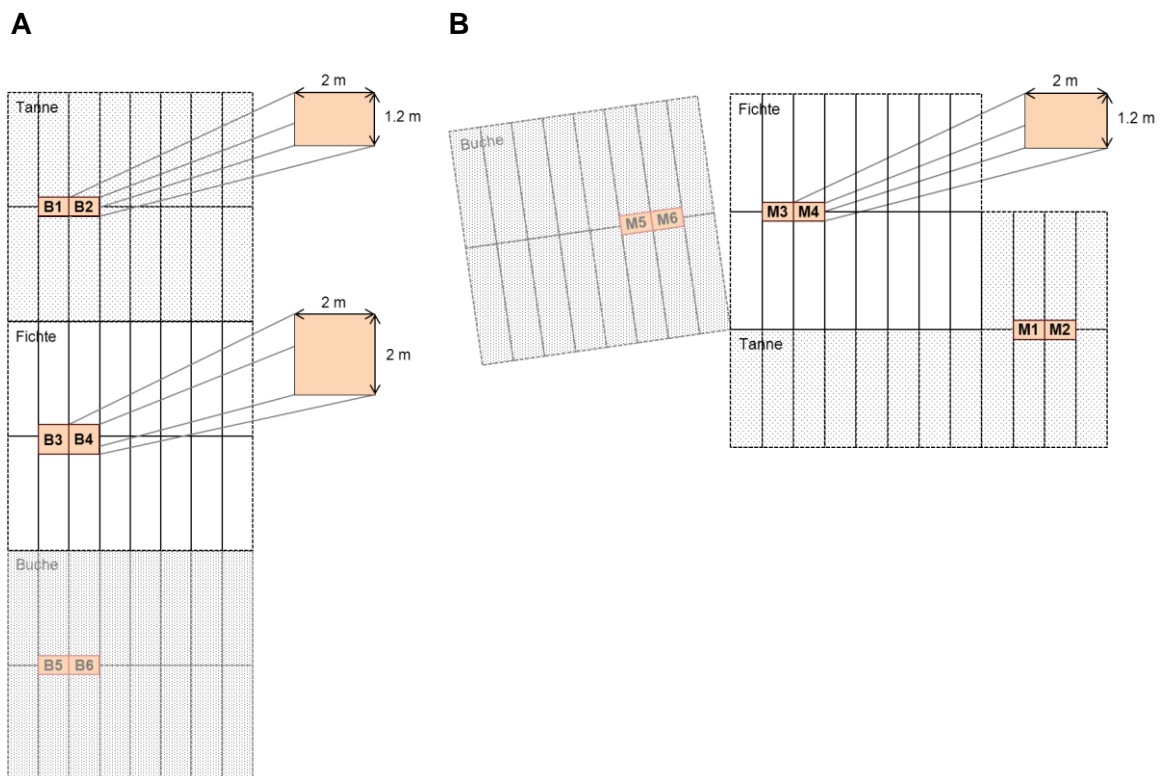


Abbildung 3: Die Versuchsflächen in Birmensdorf **(A)** und Matzendorf **(B)** unterteilt nach Baumart und mit eingezeichneten Sensorflächen B1 bis B6 resp. M1 bis M6. Die Buchenflächen (grau) werden erst im Frühjahr 2013 angelegt und mit Bodensensoren bestückt.

2.3 Auswahl der Messtiefen

Für die Bodenfeuchtemessungen auf der Versuchsfläche in Birmensdorf wurden aufgrund der Bodeneigenschaften eines lokalen Bodenprofils (Abbildung 4) drei Messtiefen gewählt, die drei Bodenschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften entsprechen: Die Messtiefe 15 cm liegt im Oberboden (Ah Horizont), die Messtiefe 35 cm an der Grenze vom nicht vernässten Ober- zum vernässten Unterboden und die Messtiefe 75 cm im vernässten Unterboden ($G_{o/r}$ Horizont). In Matzendorf ist der Boden aufgrund der Geologie (anstehendes Kalkgestein) sehr flachgründig, weshalb nur in 15 cm Tiefe Bodensensoren installiert wurden.

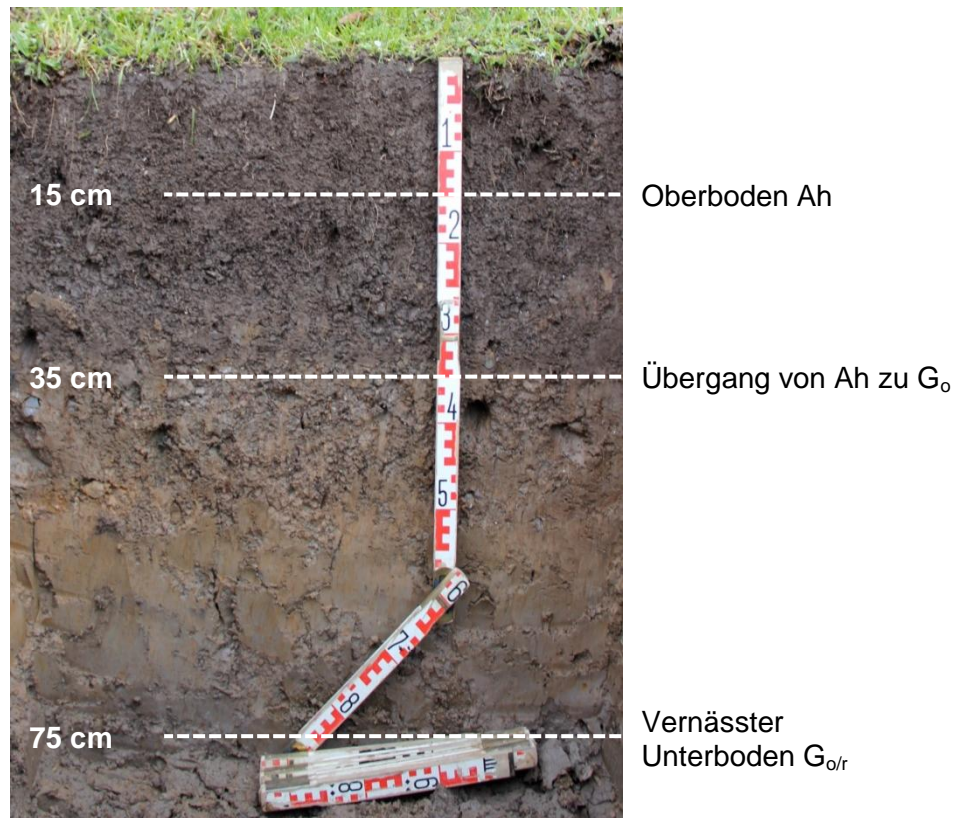


Abbildung 4: Bodenprofil auf der Versuchsfläche in Birmensdorf. Für die Installation der Bodensensoren wurden die Messtiefen 15 cm im Oberboden (nicht vernässt), 35 cm an der Grenze von Ober- zu Unterboden und 75 cm im Unterboden (vernässt) gewählt.

2.4 Verteilung der Bodenfeuchtesensoren

Die Versuchsflächen in Birmensdorf und Matzendorf werden bis ins Jahr 2013 mit insgesamt 60 Sensoren jedes Sensortyps (EC-5, MPS-2 und Jet Fill Tensiometer, Kapitel 2.1) bestückt (Abbildung 5, Tabelle 1). Im Frühling 2012 wurden die Tannen- und Fichtenflächen mit Bodenfeuchtesensoren ausgerüstet, was in einer Gesamtzahl von 42 Sensoren jedes Sensortyps resultierte. Die Installation der Bodenfeuchtesensoren auf den Buchenflächen erfolgt im Frühling 2013, bevor die Buchensämlinge ausgepflanzt werden.

Die Bodenfeuchtesensoren wurden innerhalb der Sensorflächen anhand eines Schemas (Abbildung 5) möglichst gleichmässig verteilt. Sensoren gleichen Typs und gleicher Messtiefe wurden in einer Linie nebeneinander platziert im Abstand von 25 bis 30 cm, um eine Interaktion zwischen Sensoren auszuschliessen. In jeder Messtiefe wurden jeweils drei Sensoren gesetzt, so dass auf jeder Sensorfläche drei Messwiederholungen in der jeweiligen Bodenschicht gemacht werden können.

Zur eindeutigen Beschriftung der elektronischen Sensoren wurde folgender Schlüssel verwendet:

Versuchsstandort
Sensorfläche
Messtiefe
Messwiederholung

B = Birmensdorf, M = Matzendorf
1 bis 6
a = 15 cm, b = 35 cm, c = 75 cm
1 bis 3

... ergibt z.B. **B1a1**

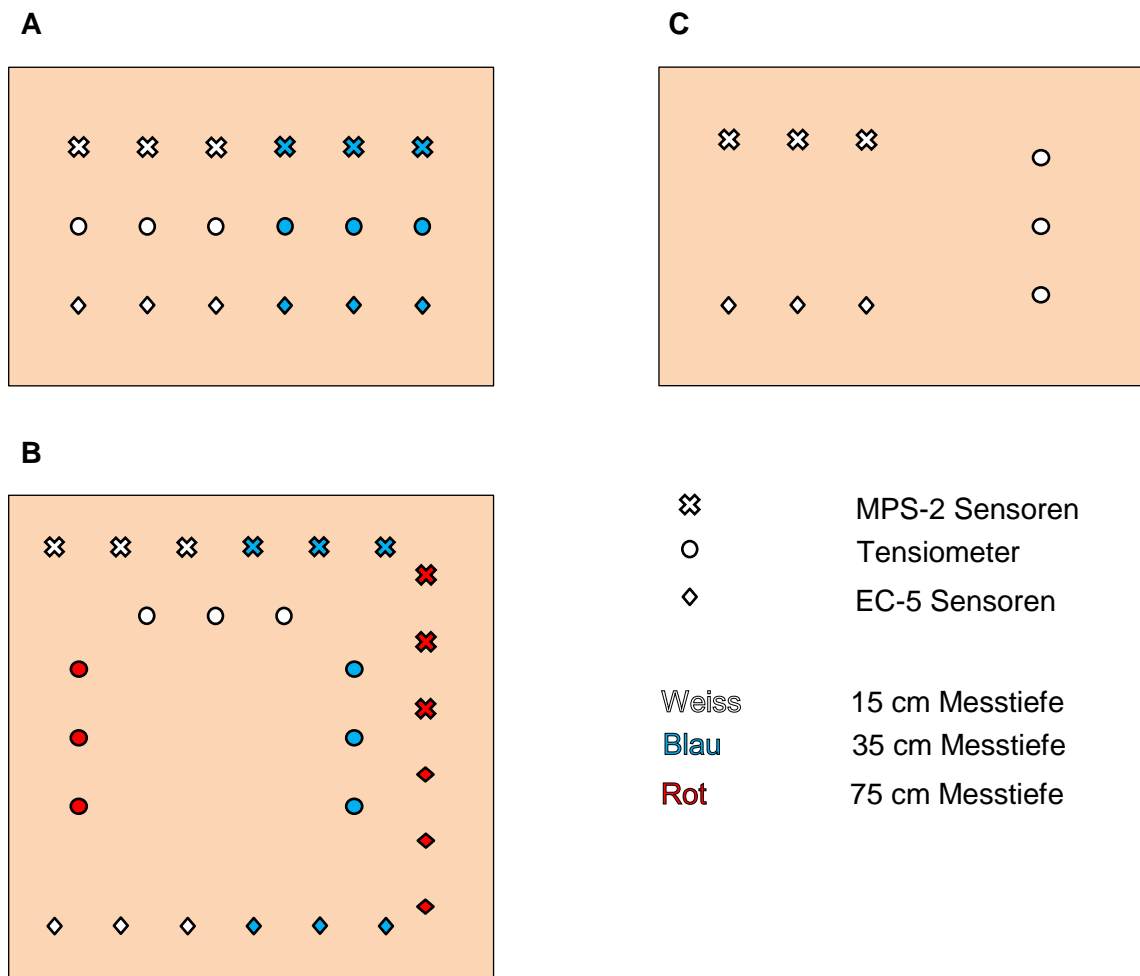


Abbildung 5: Anordnung der Bodenfeuchtesensoren auf den Sensorflächen aus der Vogelperspektive. In Birmensdorf sind die Sensorflächen B1, B2, B5 und B6 mit je 18 Sensoren in zwei Messtiefen bestückt **(A)**, die Sensorflächen B3 und B4 mit je 27 Sensoren in drei Messtiefen **(B)**. In Matzendorf **(C)** sind auf allen Sensorflächen je 9 Sensoren in einer einzigen Messtiefe installiert.

Tabelle 1: Verteilung der Bodenfeuchtesensoren auf den Versuchsflächen. Die im Frühjahr 2012 installierten Sensoren sind schwarz, die für 2013 geplanten Sensoren grau dargestellt.

Standort	Sensorfläche			Anzahl Sensoren pro Typ		
	Bezeichnung	Baumart	Grösse	Messtiefe 15 cm	Messtiefe 35 cm	Messtiefe 75 cm
Birmensdorf	B1	Tanne	1.2 m x 2 m	3	3	0
	B2	Tanne	1.2 m x 2 m	3	3	0
	B3	Fichte	2 m x 2 m	3	3	3
	B4	Fichte	2 m x 2 m	3	3	3
	B5	Buche	1.2 m x 2 m	3	3	0
	B6	Buche	1.2 m x 2 m	3	3	0
Matzendorf	M1	Fichte	1.2 m x 2 m	3	0	0
	M2	Fichte	1.2 m x 2 m	3	0	0
	M3	Tanne	1.2 m x 2 m	3	0	0
	M4	Tanne	1.2 m x 2 m	3	0	0
	M5	Buche	1.2 m x 2 m	3	0	0
	M6	Buche	1.2 m x 2 m	3	0	0
Anzahl Sensoren total pro Sensortyp realisiert 2012 (ohne Buche)					42	
Anzahl Sensoren total pro Sensortyp realisiert 2013 (mit Buche)					60	

2.5 Installation im Feld

2.5.1 EC-5 und MPS-2 Sensoren

Für die Platzierung der EC-5 und MPS-2 Sensoren wurde mit dem Spaten ein Bodenschlitz ausgehoben, so dass die Sensoren waagrecht in die Bodenwand gestossen werden konnten (Abbildung 6). Mit einem Messer wurde ein Spalt in den Boden gemacht, um das Einschieben des Sensors zu vereinfachen und um sicher zu stellen, dass die Sensoren nicht mit Steinen in Kontakt kamen (Risiko für Verfälschung der Messungen). Anschliessend wurde der Bodenschlitz aufgefüllt und die Kabel gebündelt zur Oberfläche geführt. Die Kabel wurden zusammengebunden und bis zur Verkabelung mit den Meteostationen (Kapitel 3.2) in Plastiksäcken an die Pfosten der Sensorflächenabschränkungen gehängt. Eine kleine Öffnung auf der Unterseite sorgte dafür, dass sich kein Kondenswasser ansammeln konnte.

Bei der Installation der elektronischen Bodenfeuchtesensoren wurden gleichzeitig in den verschiedenen Messtiefen volumetrische Bodenproben mit Burgerzylindern genommen und Kalibrationserde gesammelt für die spätere Laborkalibration der EC-5 Sensoren (Kapitel 2.6).



Abbildung 6: Platzierung eines MPS-2 Sensors in 15 cm Tiefe mithilfe eines stumpfen Messers.

2.5.2 Tensiometer

Vor der Installation der Jet Fill Tensiometer wurden die Instrumente mit Wasser gefüllt und mit einer Vakuumpumpe geprüft, ob sie dicht waren. Zur Verhinderung von Algenbildung wurden dem Füllwasser einige Tropfen Blaflüssigkeit (pflanzenverträgliches Algizid, AgroTerra GmbH, Root, Schweiz) zugegeben. Jedes geprüfte Tensiometer wurde mit einem Wasserreservoir (Kapitel 2.1.3) ausgestattet und kalibriert, d.h. der Nullpunkt des Manometers bei Umgebungsluftdruck eingestellt. Mit einem Bodenbohrer (AgroTerra GmbH, Root, Schweiz) wurde sorgfältig ein Loch mit der entsprechenden Messtiefe (von der Bodenoberfläche bis Mitte Saugkerze) ausgestochen. Mit beiden Händen wurde anschliessend das Tensiometer in den Boden gestossen, so dass die Kerze satt im Boden zu stehen kam. Rund um das Tensiometer herum wurde die Erde gut festgedrückt, um ein Abfließen von Regenwasser entlang des Tensiometerschafts zu verhindern. Zur Stabilisierung wurden die Tensiometer mit den geringen Messtiefen (15 cm und 35 cm) mit Kabelbindern an Dachlatten fixiert (Abbildung 2, B).

2.6 Kalibration der EC-5 Sensoren

Die Genauigkeit der EC-5 Bodenwassergehaltssensoren kann durch eine bodenspezifische Kalibration verbessert werden (Decagon Devices 2010).

Die Kalibration der EC-5 Sensoren erfolgte am 24. und 26. Juli 2012 entsprechend der LWF Anleitung für die Installation und Kalibration der Bodenwassergehaltssensoren ECHO EC-5 (Schlegel et al. 2009). Mit dem CR1000 Datenlogger (Campbell Scientific Inc., North Logan UT, USA) wurde allerdings für das Projekt ADAPT ein neuerer Loggertyp verwendet. Für jede Messtiefe wurde die Kalibration drei Mal wiederholt. Der Ablauf der Kalibration ist zusammengefasst in Abbildung 7.

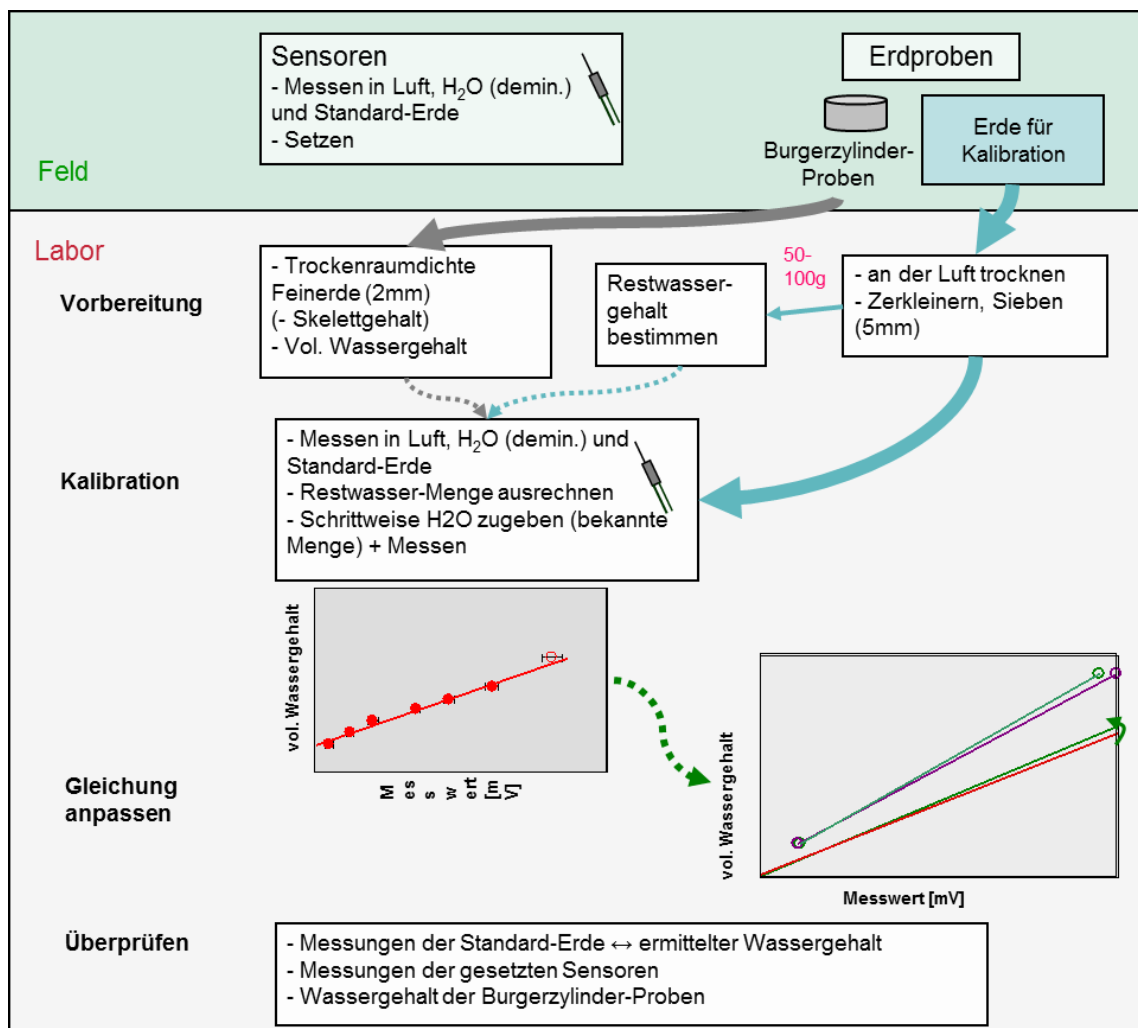


Abbildung 7: Ablauf der Kalibration für die EC-5 Sensoren (Schlegel et al. 2009).

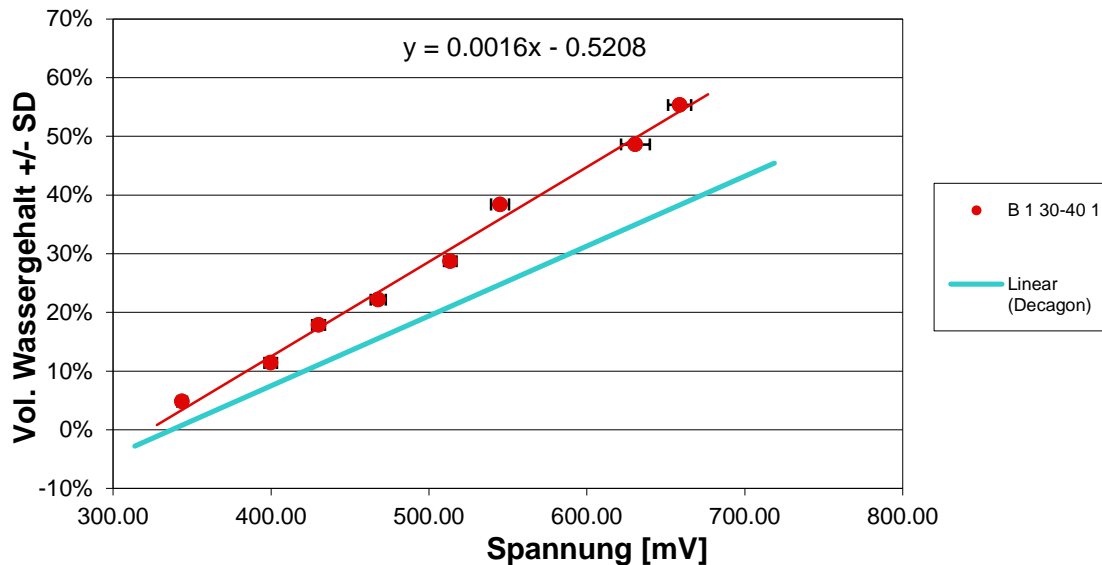


Abbildung 8: Beispiel einer Kalibrationsgleichung (rot, Standort Birmensdorf, 30-40 cm Tiefe) für eine Messreihe in einer Messtiefe. Als Vergleich dazu ist die vom Dataloggerhersteller angegebene Standardformel für Mineralböden eingetragen (blau; Decagon Devices 2010).

Die **Steigungen** und **Achsenabschnitte** der Regressionsgeraden der drei Kalibrationen pro Standort und Messtiefe (Beispiel in Abbildung 8) wurden gemittelt. Die daraus resultierenden Werte flossen direkt in die neuen Kalibrationsgleichungen ein (Gleichung 1). Diese neuen Kalibrationsgleichungen – jeweils eine Gleichung pro Versuchsstandort und Messtiefe (Anhang A) – wurden dann im Programm der Datalogger notiert.

$$GHUM_{act} = GHUM_{cali} * GHUM_{meas} + GHUM_{offset}$$

1

<i>GHUM_{act}</i>	<i>resultierender Bodenwassergehalt</i>
<i>GHUM_{cali}</i>	<i>Kalibrationsfaktor (Steigung der Regressionsgeraden)</i>
<i>GHUM_{meas}</i>	<i>gemessener Bodenwassergehalt</i>
<i>GHUM_{offset}</i>	<i>Achsenabschnitt der Regressionsgeraden</i>

2.7 Wartung der Bodensensoren

Bei den elektronischen Bodenfeuchtesensoren fallen keine Unterhaltsarbeiten an. Die Tensiometer hingegen müssen regelmässig gewartet werden: Die Jet Fill Reservoirs werden mit Wasser aufgefüllt. Dazu kann normales Leitungswasser verwendet werden mit einem Zusatz von Blaflüssigkeit gegen Algenbildung. Nach jedem Ablesen der Saugspannung wird frisches Wasser aus dem Reservoir eingespritzt, so dass das Tensiometer gleichzeitig entlüftet und aufgefüllt wird. Zudem wird das Manometer nach dem Ablesen über Druck auf das Ventil (Abbildung 2, A) entlüftet. Über den Winter werden die Tensiometer vorübergehend stillgelegt. Die Manometer und Reservoirs werden für diese Zeit entfernt, eine Mischung von 2/3 Wasser und 1/3 Ethanol zum Schutz vor Frost in die Tensiometer eingefüllt und diese mit Schraubdeckeln verschlossen.

3 METEOSTATIONEN

3.1 Aufbau der Meteostationen

Die beiden Stationen für die meteorologischen Messungen auf den ADAPT-Versuchsflächen wurden nach dem Vorbild der LWF-Meteostationen der WSL konzipiert, die den Vorgaben von MeteoSchweiz und der World Meteorological Organization angepasst sind (Schneiter et al. 2004). Im Vergleich zu den LWF-Stationen wurde allerdings die Anzahl meteorologischen Messgrößen reduziert (Tabelle 2), da ADAPT keine Daten zu Wind und UV-B sowie photosynthetisch aktiver Strahlung benötigt.

Die beiden Meteostationen für ADAPT wurden durch die Firma waljag GmbH (Malans, Schweiz) für die Installation vorbereitet. Die Stationen bestehen aus den Meteosensoren sowie strukturellen Komponenten (Abbildung 9 und Tabelle 2) und fassen zudem die einzelnen elektronischen Bodensensoren (Kapitel 2) zusammen.

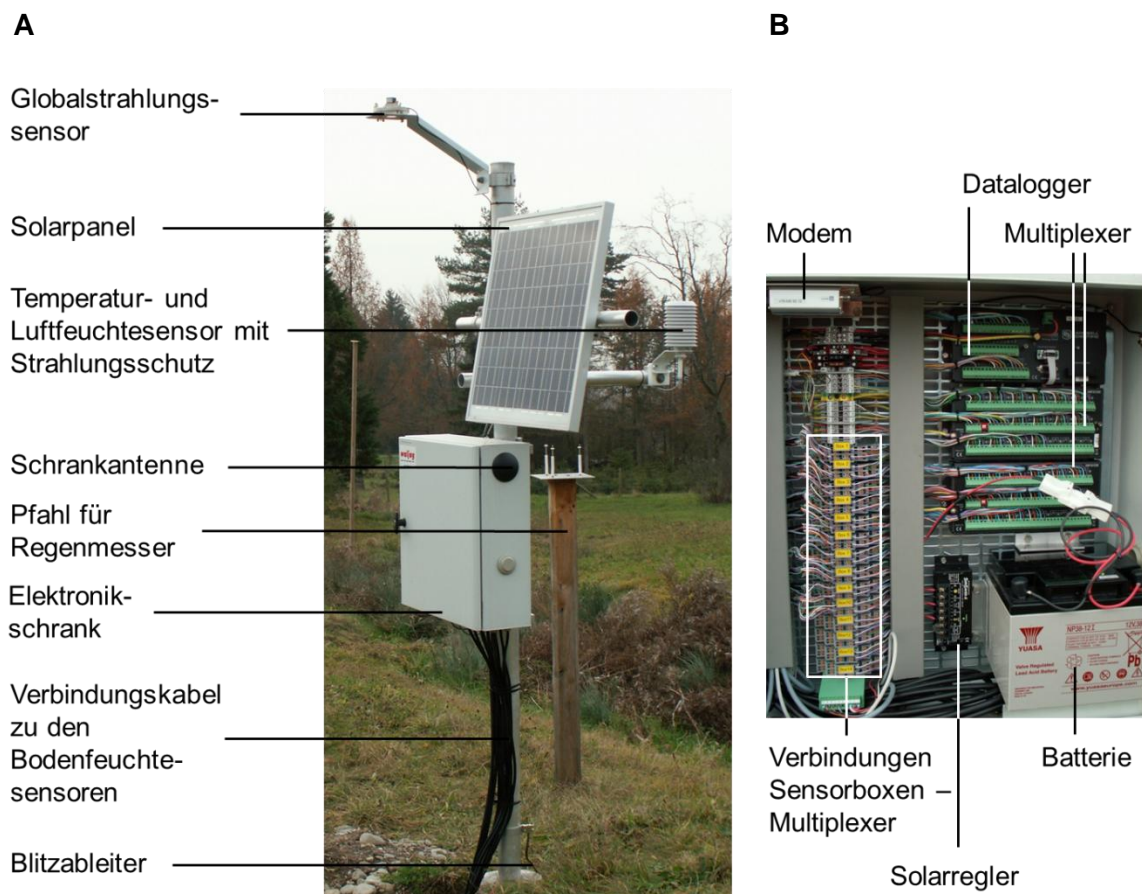


Abbildung 9: Meteostation am Versuchsstandort in Birmensdorf. **A)** Aussenansicht der Meteostation. Der Regenmesser wird erst im Frühling 2013 installiert. **B)** Innenansicht Elektronikschrank.

Tabelle 2: Meteo- und Bodenfeuchtesensoren sowie strukturelle Komponenten der Meteostationen an den ADAPT-Versuchsstandorten. Die Bodenfeuchtesensoren sind detailliert beschrieben in Kapitel 2.1.

Einzelteile	Typ / Material / Masse	Messung / Zweck	Sensor- höhe über Boden [cm]	Einheit	Mess- intervall [s]
Meteosensoren					
Temperatursensor	T/rH HC2-S3 Hygroclip	Lufttemperatur	200	°C	60
Luftfeuchtesensor	T/rH HC2-S3 Hygroclip	Relative Luftfeuchtigkeit	200	%	60
Niederschlags- messer (Wippe)	ARG100	Niederschlag	150	mm	5
Globalstrahlungs- sensor	SKS1110/S (SKYE)	Globalstrahlung	300	W/m ²	60
Bodenfeuchtesensoren					
Bodenwasser- gehaltssensoren	EC-5	Volumetrischer Bodenwassergehalt	-15, -35, -75	m ³ /m ³ (= % VWC)	600
Saugspannungs- sensoren	MPS-2	Matrixpotential	-15, -35, -75	kPa	600
Temperatursensor	MPS-2	Bodentemperatur	15, -35, -75	°C	600
Strukturelle Komponenten					
Mast	Aluminium, 3 m	Grundgerüst			
Blitzantenne		Blitzschutz Matzendorf			
Blitzableiter	2 x 5 m Kupferkabel	Ableitung von Blitzschlag			
Schrank	Stahlblech 600 x 600 x 200 mm ³	Zusammenfassung und Schutz elektronischer Komponenten			
Schloss	KABA5000 T-Griff	Verschluss Schrank			
Schrankhalterung	30-80 mm	Fixierung Schrank			
Multiplexer	Campbell AM16/32, 2 Stück	Zusammenfassen der Daten			
Datalogger	Campbell CR1000 Std24	Aufzeichnung der Daten			
Modem	GSM fastcom	Datenübertragung			
Schrankantenne		Datenübertragung			
Solarregler	SunSaver SS6	Regulierung Solarpanel			
Solarpanel	50W	Stromversorgung			
Batterie	NP38 12 V	Stromversorgung			

Vorgängig zum Aufbau der Meteostationen wurden die Masten mit einem Zementsockel im Boden verankert. Dazu wurde ein Betonrohr (Durchmesser 50 cm, Länge 60 cm) in den Boden eingelassen, der Mast darin einzementiert und mit Dachlatten stabilisiert. Nachdem das Fundament komplett ausgehärtet war, wurden der Elektronikschrank, das Solarpanel und mit Ausnahme des Regenmessers (Montage im Frühling 2013) alle Meteosensoren montiert sowie die Bodensensoren angeschlossen (Kapitel 3.2). Für den Blitzableiter aus Kupferdraht wurde links und rechts der Station ein 20-30 cm tiefer und je ca. 5 m langer Graben ausgehoben. Die beiden Kupferdrahtstücke wurden dann oberhalb des Sockels mit dem Mast der Meteostation verbunden, in die Gräben verlegt und wieder mit Erde bedeckt. Die Station in Matzendorf wurde zusätzlich mit einer Blitzschutzantenne ausgerüstet. Die Montage der Meteostationen erfolgte in Birmensdorf am 26. Juni 2013, in Matzendorf am 25. September 2012.

3.2 Anschluss der Bodensensoren an die Meteostationen

Für den Anschluss der elektronischen Bodenfeuchtesensoren an die Datalogger der Meteostationen wurden auf jeder Sensorfläche die drei MPS-2 und drei EC-5 Sensoren gleicher Messtiefe in Verteilerboxen (waljag GmbH, Malans, Schweiz) gebündelt und in einem Messkabel (Polyethylenkabel PE-ALT 3x4x0.6sz, Heiniger Kabel AG, Köniz) zusammengefasst. Dabei wurden die Kabel der Bodensensoren den Sensorflächenabschränkungen entlang geführt und mit Kabelbinder befestigt. Eine schematische Darstellung der Zusammenfassung der einzelnen Sensoren in Verteilerboxen findet sich in Abbildung 10, eine Detailansicht in Abbildung 11. Die ausgehenden Messkabel der einzelnen Verteilerboxen wurden dann in 30 cm tiefen Gräben zu den Meteostationen hingeführt (Anhang B) und mit den Multiplexer verkabelt. Um alle Kabel vor mechanischer Beschädigung zu schützen, wurden die Abschnitte zwischen Boden und Sensorflächenabschränkung resp. Verteilerbox in Schutzrohre (Metallschlauch Ferroplast, Otto Fischer, Zürich, Schweiz) gelegt.

Die Verkabelung in den Verteilerboxen wie auch im Schrank der Meteostationen erfolgten exakt nach den von waljag GmbH vorgegebenen Schemata (Anhang C).

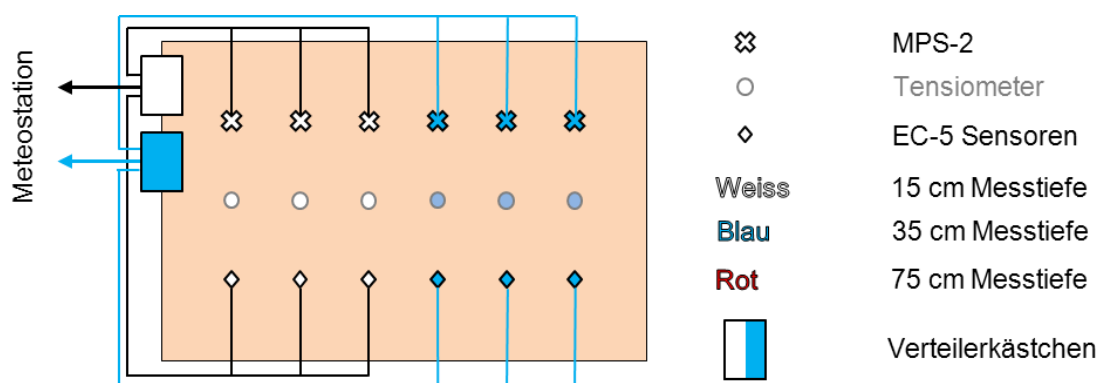


Abbildung 10: Beispiel für die Zusammenfassung der elektronischen Bodensensoren einer Sensorfläche in Verteilerboxen (Ansicht von oben). An jeder Box sind insgesamt 6 Sensoren derselben Messtiefe, d.h. 3 MPS-2 und 3 EC-5 Sensoren, angeschlossen. Ausgehend von jeder Box stellt jeweils ein Messkabel die Verbindung mit der Meteostation her.

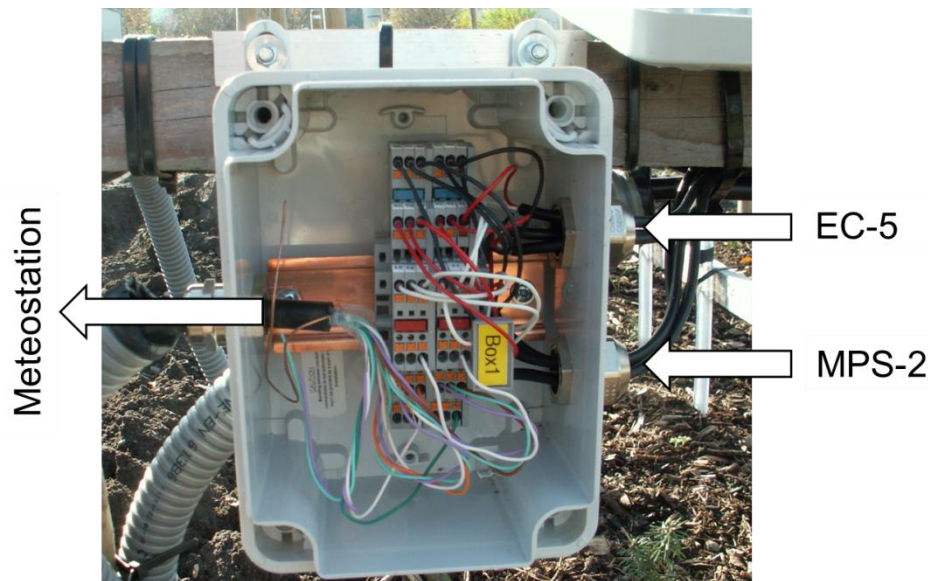


Abbildung 11: Detailansicht einer Verteilerbox. Jeweils drei MPS-2 und EC-5 Sensoren (rechts) wurden über beschriftete Anschlussklemmen mit dem Messkabel (links) verbunden.

4 DATENVERWALTUNG

Die Daten der Meteo- und Bodenfeuchtesensoren werden auf den beiden CR1000 Datalogger im Intervall von 10 Minuten gespeichert und täglich über das Modem mittels GPRS-Technologie auf einen Server der WSL übertragen. Die Daten werden anschliessend einmal pro Tag automatisch in eine Oracle Datenbank eingelesen und dabei einer Plausibilitätsprüfung unterzogen (Schneider et al. 2004). Die komplette Auflistung aller Messungen ist zu finden in der Tabelle „ADAPT-Sensoren“ (Kapitel 5). Eine Abfrage der Daten in Oracle erfolgt mit SQL über die Software PLSQL Developer (Allround Automations, Enschede, Holland) oder kann direkt in der Statistiksoftware R (R Foundation for Statistical Computing, Wien, Österreich) getätigt werden. Eine visuelle Überprüfung der Daten wird mit der neuen Internetanwendung „LWF adataLog“ von Emanuel Stöckli (2012/2013) erreicht.

5 DOKUMENTATION

Tabelle 3: Verzeichnis der Dokumente.

Beschreibung	Pfad und Dateiname
Anleitung zur Kalibration der EC-5 Sensoren	N:\prj\Adapt\Instrumentierung\EC-5\Anleitung_Echo_20091125.doc
Tabelle aller Meteo- und Bodenfeuchte-sensoren	N:\prj\Adapt\Instrumentierung\Meteostationen\ADAPT_Sensoren.xls
Tagebuch ADAPT	N:\prj\Adapt\Tagebuch Adapt.xls

6 LITERATUR

Decagon Devices. 2010. EC-20, EC-10, EC-5 Soil Moisture Sensors User's Manual, Version 10. Decagon Devices, Pullman WA, USA, 25 S.

Decagon Devices. 2011. MPS-2 Dielectric Water Potential Sensor Operator's Manual, Version 1. Decagon Devices, Pullman WA, USA, 27 S.

Frank, A., C. Heiri, und A. Burkart 2012. Forschungsprojekt Adaptive genetische Variation von Buche, Tanne und Fichte. Dokumentation der Tannen- und Fichtenpflanzung im Frühling 2012. Birmensdorf, Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch., 26 S., unveröff.

Schlegel, M., P. Waldner, E. Pannatier, und O. Schramm. 2009. LWF Anleitung für die Installation und Kalibration der Bodenwassergehaltssensoren ECHO EC-5. LWF Langfristige Waldökosystem-Forschung. Birmensdorf, Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch., 18 S., unveröff.

Schneiter, G., P. Jakob, und M. Rebetez. 2004. Sieben Jahre meteorologische Datenerfassung im Schweizer Wald. Inf.bl. Forsch.bereich Wald 17:4-6.

Soilmoisture Equipment. 2011. 2710ARL Tensiometer and 2725ARL Jet Fill Tensiometer Operating Instructions. Zugriff am 18. Juni 2012. http://www.soilmoisture.com/PDF/0898-2710_2725.pdf.

Stöckli, E. 2012/2013. LWF adataLog. Langfristige Waldökosystem-Forschung LWF an der WSL. Zugriff am 28. Januar 2013. <http://adatalog.lwf.ch>.

7 ANHANG

A) Kalibrationsgleichungen	S. 18
B) Verlauf der Kabel auf den Versuchsflächen	S. 19
C) Schemata für die Verkabelung der Sensoren	S. 21

A) Kalibrationsgleichungen

GHUMact [m3m-3] = LOG_Koeffizient * GHUMmeas [mV] + LOG_Offset

'--- siehe O:\LWF\Projekte\Adapt\Installation\ADAPT_Sensoren.xls

Station Birmensdorf

Je nach Bodentiefe unterscheiden sich die Kalibrationsgleichungen in Steigung und Achsenabschnitt.

GHUMact(1) = 0.0016810 * GHUMact(1) - 0.5397974
 GHUMact(2) = 0.0016810 * GHUMact(2) - 0.5397974
 GHUMact(3) = 0.0016810 * GHUMact(3) - 0.5397974
 GHUMact(4) = 0.0016626 * GHUMact(4) - 0.5410546
 GHUMact(5) = 0.0016626 * GHUMact(5) - 0.5410546
 GHUMact(6) = 0.0016626 * GHUMact(6) - 0.5410546
 GHUMact(7) = 0.0016810 * GHUMact(7) - 0.5397974
 GHUMact(8) = 0.0016810 * GHUMact(8) - 0.5397974
 GHUMact(9) = 0.0016810 * GHUMact(9) - 0.5397974
 GHUMact(10) = 0.0016626 * GHUMact(10) - 0.5410546
 GHUMact(11) = 0.0016626 * GHUMact(11) - 0.5410546
 GHUMact(12) = 0.0016626 * GHUMact(12) - 0.5410546
 GHUMact(13) = 0.0016810 * GHUMact(13) - 0.5397974
 GHUMact(14) = 0.0016810 * GHUMact(14) - 0.5397974
 GHUMact(15) = 0.0016810 * GHUMact(15) - 0.5397974
 GHUMact(16) = 0.0016626 * GHUMact(16) - 0.5410546
 GHUMact(17) = 0.0016626 * GHUMact(17) - 0.5410546
 GHUMact(18) = 0.0016626 * GHUMact(18) - 0.5410546
 GHUMact(19) = 0.0016535 * GHUMact(19) - 0.5557036
 GHUMact(20) = 0.0016535 * GHUMact(20) - 0.5557036
 GHUMact(21) = 0.0016535 * GHUMact(21) - 0.5557036
 GHUMact(22) = 0.0016810 * GHUMact(22) - 0.5397974
 GHUMact(23) = 0.0016810 * GHUMact(23) - 0.5397974
 GHUMact(24) = 0.0016810 * GHUMact(24) - 0.5397974
 GHUMact(25) = 0.0016626 * GHUMact(25) - 0.5410546
 GHUMact(26) = 0.0016626 * GHUMact(26) - 0.5410546
 GHUMact(27) = 0.0016626 * GHUMact(27) - 0.5410546
 GHUMact(28) = 0.0016535 * GHUMact(28) - 0.5557036
 GHUMact(29) = 0.0016535 * GHUMact(29) - 0.5557036
 GHUMact(30) = 0.0016535 * GHUMact(30) - 0.5557036
 GHUMact(31) = 0.0016810 * GHUMact(31) - 0.5397974
 GHUMact(32) = 0.0016810 * GHUMact(32) - 0.5397974
 GHUMact(33) = 0.0016810 * GHUMact(33) - 0.5397974
 GHUMact(34) = 0.0016626 * GHUMact(34) - 0.5410546
 GHUMact(35) = 0.0016626 * GHUMact(35) - 0.5410546
 GHUMact(36) = 0.0016626 * GHUMact(36) - 0.5410546
 GHUMact(37) = 0.0016810 * GHUMact(37) - 0.5397974
 GHUMact(38) = 0.0016810 * GHUMact(38) - 0.5397974
 GHUMact(39) = 0.0016810 * GHUMact(39) - 0.5397974
 GHUMact(40) = 0.0016626 * GHUMact(40) - 0.5410546
 GHUMact(41) = 0.0016626 * GHUMact(41) - 0.5410546
 GHUMact(42) = 0.0016626 * GHUMact(42) - 0.5410546

Station Matzendorf

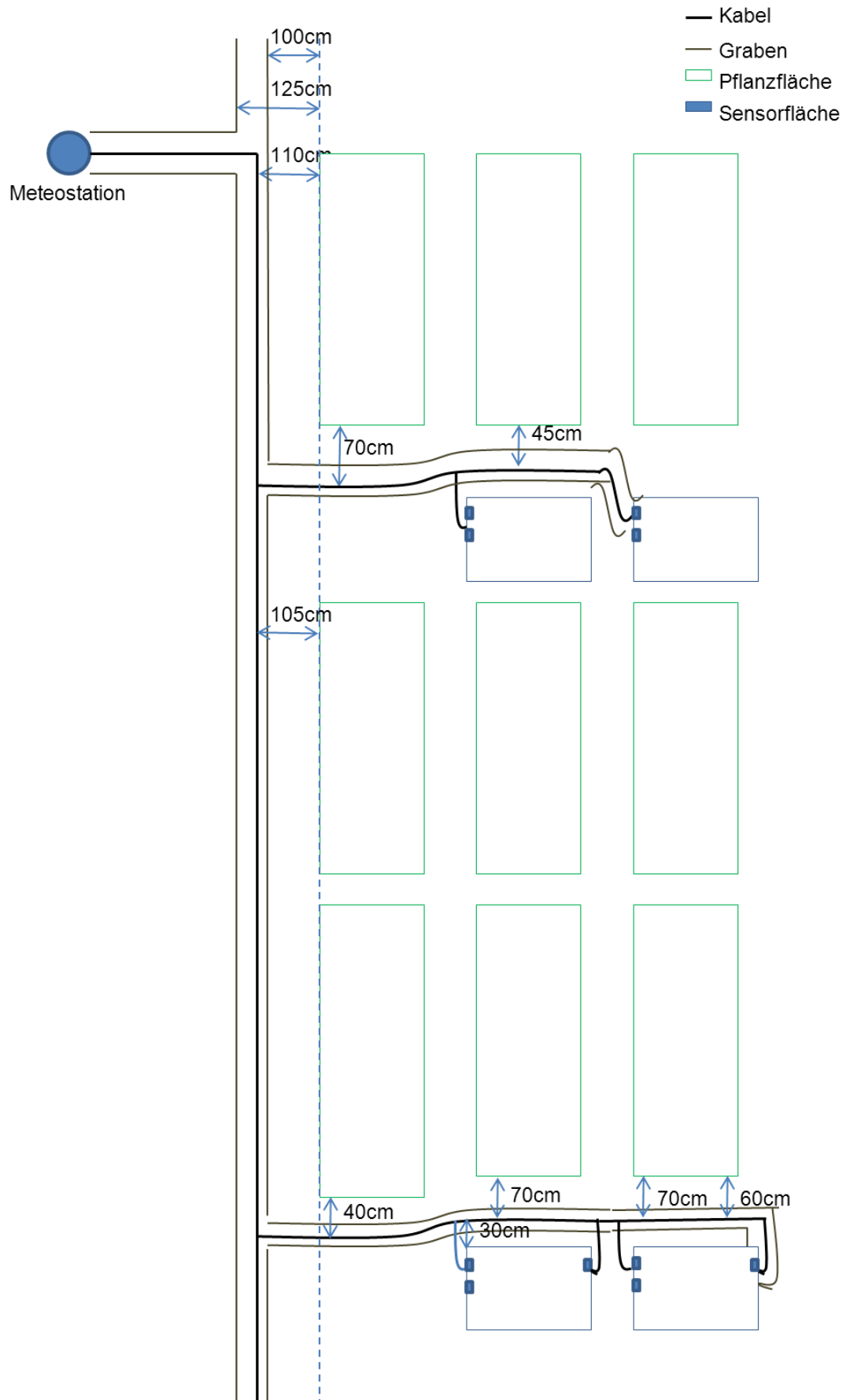
Für alle Sensoren gilt dieselbe Kalibrationsgleichung, da alle in derselben Tiefe gesetzt wurden.

GHUMact(X) = 0.0018044 * GHUMact(X) - 0.582563921350565

B) Verlauf der Kabel auf den Versuchsflächen

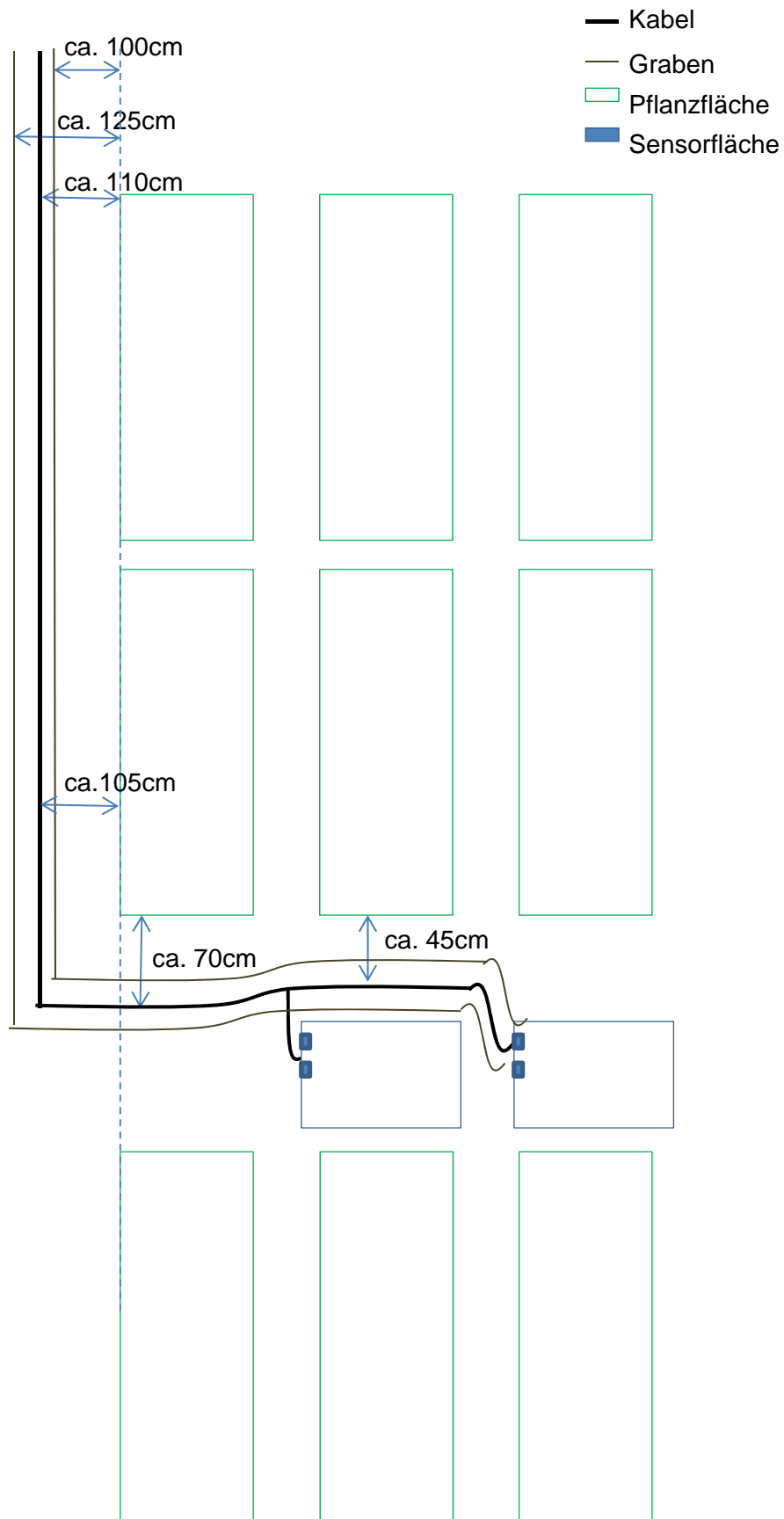
Birmensdorf

(Schema: Marc Adami)



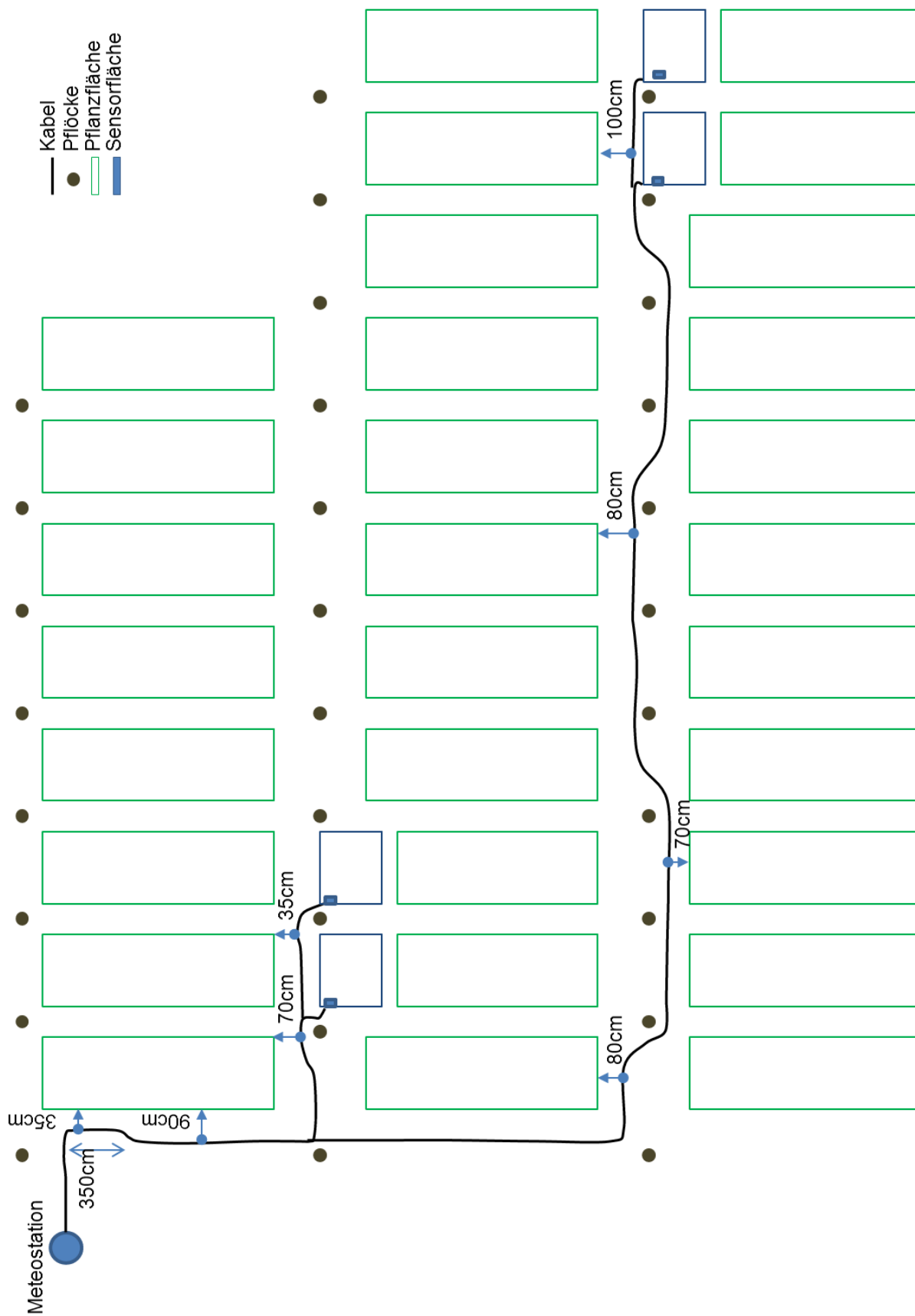
Bodensensoren für Buchenfläche Birmensdorf

installiert im Frühling 2013 analog Sensorflächen Tanne und Fichte
(vgl. Abbildung 3, A).



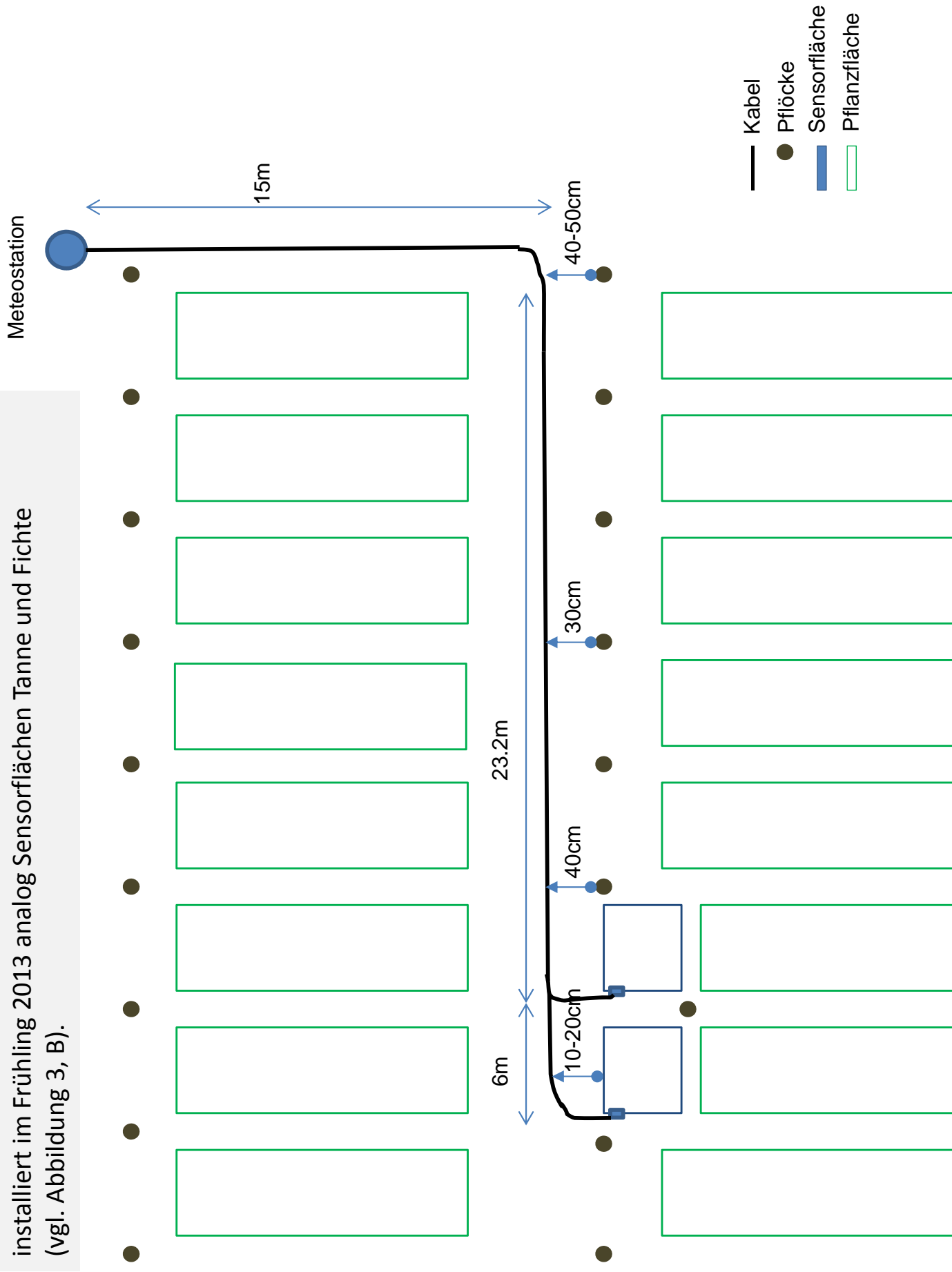
Matzendorf

(Schema: Marc Adami)



Bodensensoren für Buchenfläche Matzendorf

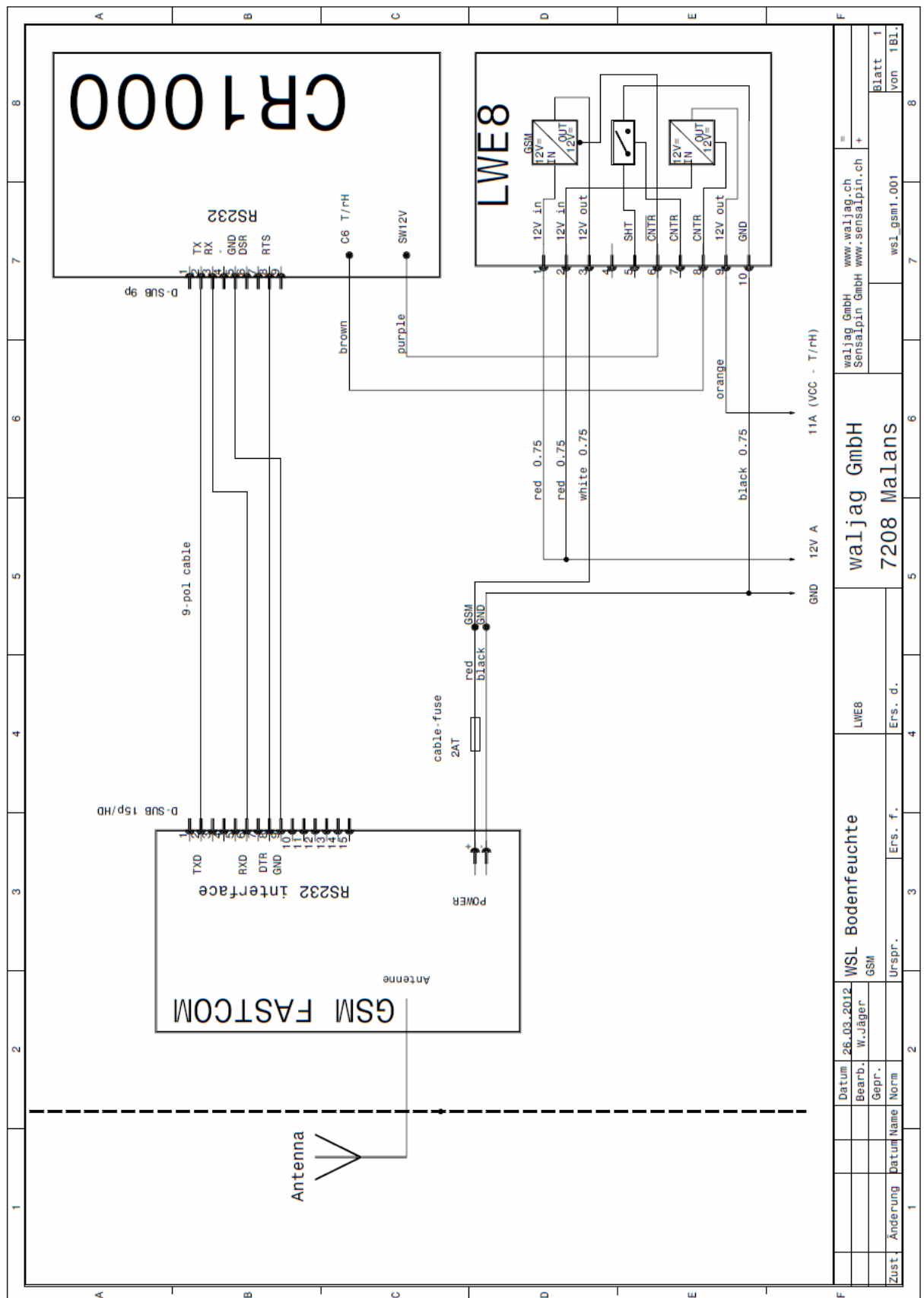
installiert im Frühling 2013 analog Sensorflächen Tanne und Fichte
(vgl. Abbildung 3, B).



C) Schemata für die Verkabelung der Sensoren

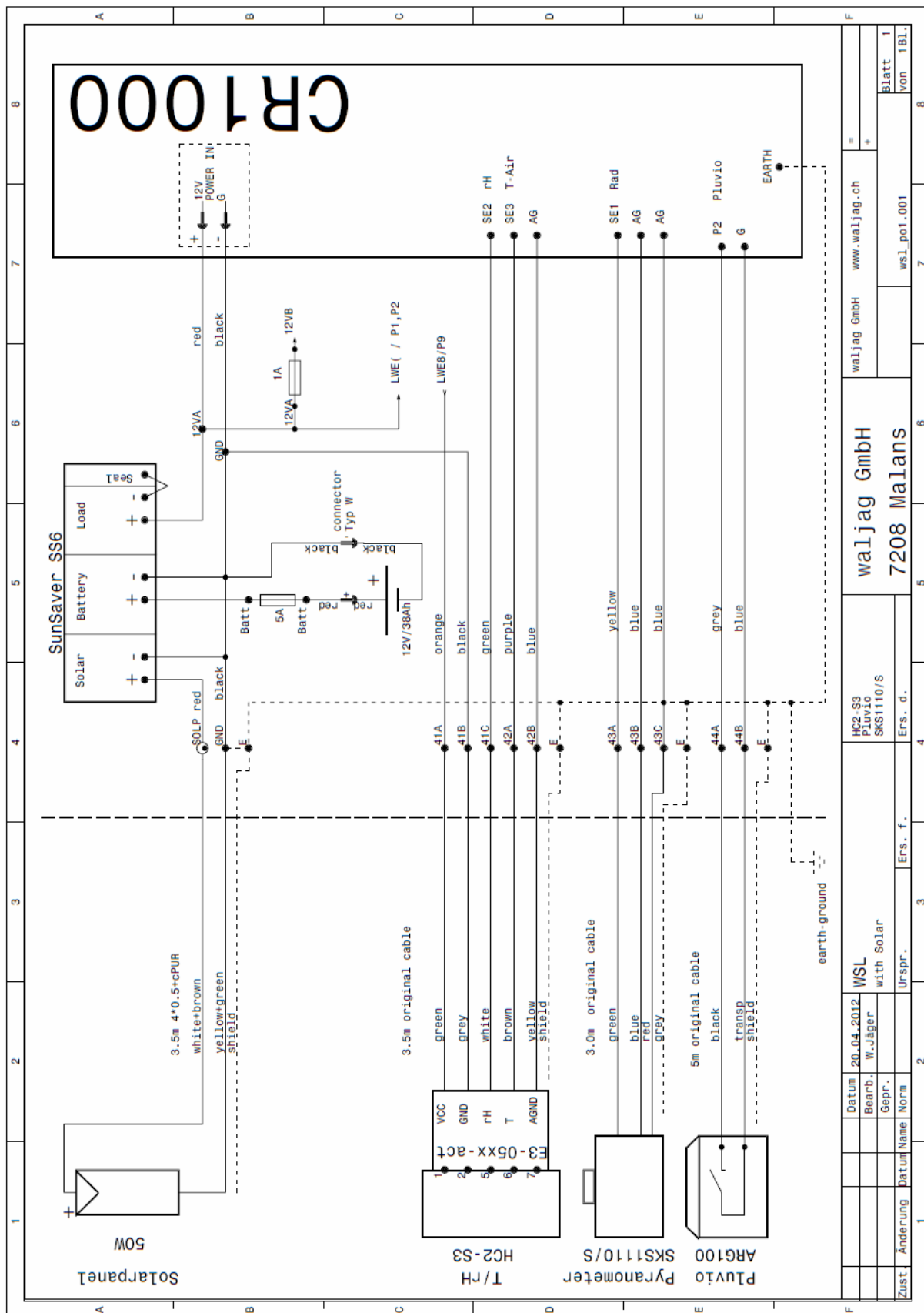
Modem

(Schema: waljag GmbH)



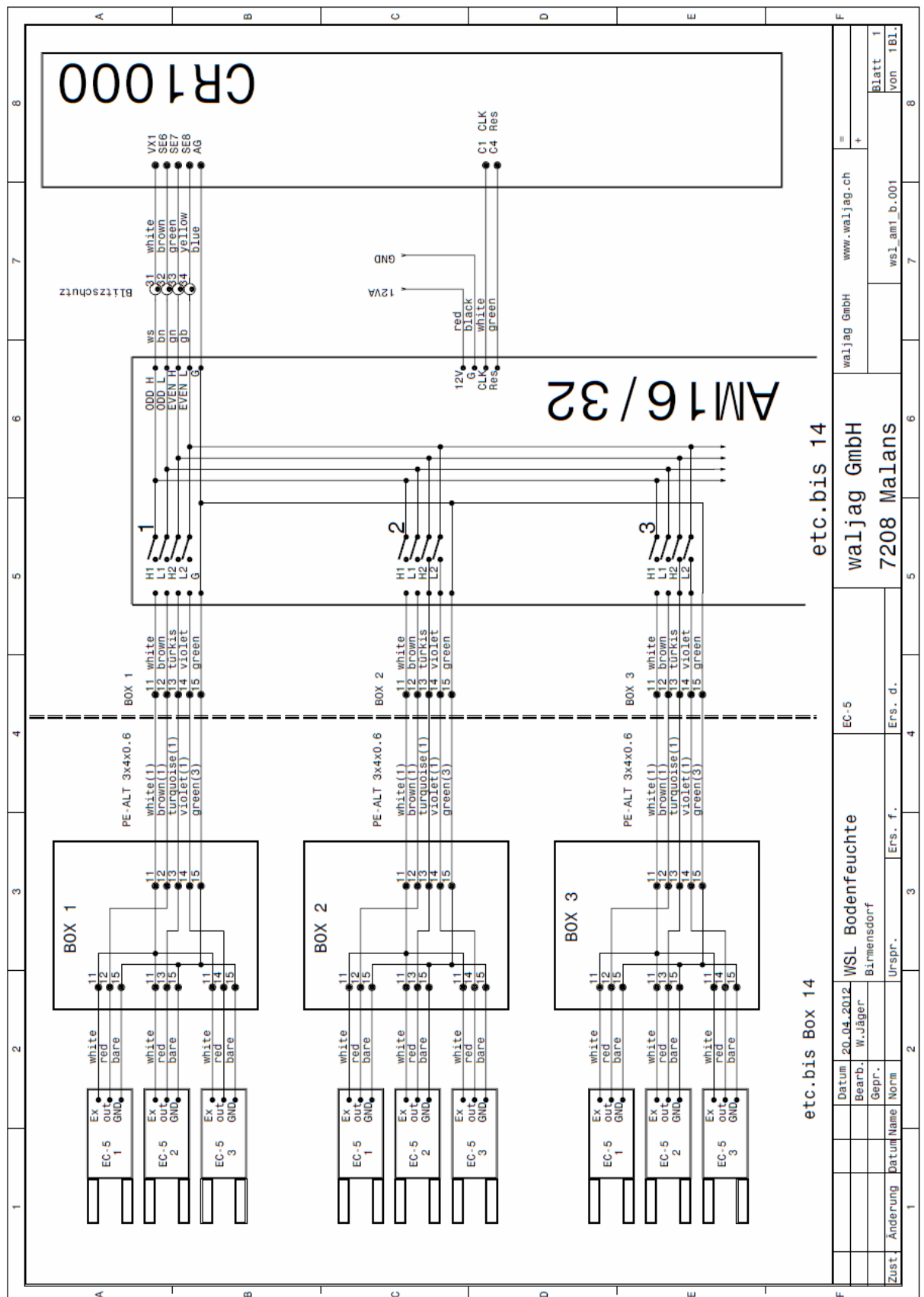
Meteosensoren

(Schema: waljag GmbH)



EC-5 Sensoren

(Schema: waljag GmbH)



MPS-2 Sensoren

(Schema: waljag GmbH)

