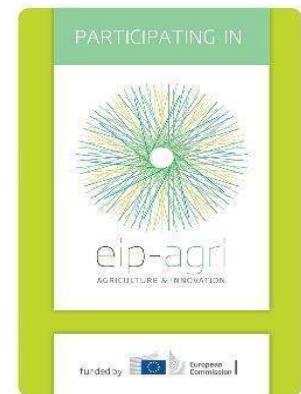


# Nutzerhandbuch

**für den Einsatz von Funk-Bodenfeuchte-Sensorik bei der  
Bewässerung von Baumschulkulturen und Stadtgrün aus den  
Erfahrungen des Projektes NuTree**



**EUROPÄISCHE UNION**  
Europäischer Landwirtschafts-  
fonds für die Entwicklung des  
ländlichen Raums



## **Herausgeber:**

### **Operationelle Gruppe NuTree**

- Bonk Pflanzen Handels GmbH, Bad Zwischenahn
- Landeshauptstadt Hannover, Bereich Umwelt- und Stadtgrün
- AGVOLUTION GmbH, Göttingen
- MM-IT4you – IT-Beratung, Bad Zwischenahn
- Seedhouse Accelerator GmbH, Osnabrück (Koordinator)

## 1. Einführung in die Thematik

Dies ist ein Nutzerhandbuch, welches für den Einsatz von Funk-Bodenfeuchte-Sensorik in Baumschulen und öffentlichen Grünanlagen konzipiert ist. Es wurde aus den Erfahrungen und Ergebnissen des NuTree-Projektes im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft (EIP-Agri) zusammengeschrieben und umfasst, neben einer thematischen Einführung, Empfehlungen und Hinweise für praktische Anwender.

### 1.1. Baumschulen und Bewässerung

Für Baumschulen ist die Notwendigkeit einer Bewässerung eigentlich nichts Neues: Egal, ob Pflanzen in Containern oder Gehölze im Freigelände bis zum Verkauf aufgezogen und gepflegt werden, Baumschulen bewässern bei Trockenheit seit vielen Jahrzehnten. Allerdings hat sich über die letzten Jahre gezeigt, dass die Trockenperioden länger werden, oft über Wochen kein Regen fällt und die Ressource Wasser knapper wird. Diesem gegenläufigen Trend kann nur mit einer effizienteren Methode der bedarfsgenauen Bewässerung begegnet werden, die sich nach dem Pflanzentyp, der Pflanzenhaltung (Container oder Freigelände) und der Beschaffenheit des Bodens richtet. Dazu leisten in den Boden eingelassene Sensorsysteme und IT – gestützte Informations- und Frühwarnsysteme einen wichtigen Beitrag: Der Baumschulist möchte zeitnah und zuverlässig über sein Mobiltelefon oder Tablet informiert werden, wo auf seinem Gelände Pflanzen bewässert werden müssen und wie groß die auszubringende Wassermenge ist.

Zusätzlich gibt es beim Transport der Bäume ebenso einen zunehmenden Bedarf der Überwachung der Gehölze im Laderaum des LKW: Transporte dauern oft mehrere Tage, es kommt oft zu Staus und Verzögerungen an Grenzen. Hier ist zum Schutz der Pflanzen eine mobile Version des Sensorbasierten Frühwarnsystems notwendig. Der Baumschulist soll informiert werden, wenn seine Ware Trockenstress erleidet, damit er über das Transportunternehmen für Abhilfe sorgen kann. Somit lassen sich juristische Streitigkeiten mit dem Empfänger und der Transportfirma vermeiden.

### 1.2. Bodenfeuchte

Um Bodenfeuchte-Sensorik erfolgreich einzusetzen ist es erforderlich, einige Grundlagen über das Thema Bodenfeuchte zu kennen.

Maßgebend für eine Bewässerungsentscheidung ist, wann der Boden oder das Substrat, welches die Pflanze durchwurzelt, nicht mehr genügend Wasser enthält, um den Bedarf der Pflanze zu decken. Ein Grundlegendes Maß hierfür ist der **volumetrische Wassergehalt** eines Bodens in Prozent, oder  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Ergänzend kann dies auch durch das Wasserhaltevermögen des Bodens angegeben werden. Wie viel Wasser ein Boden bereithalten kann, hängt im Wesentlichen von dessen Korngrößenverteilung ab: Also wie hoch die Anteile von Sand (relativ betrachtet große „Körner“), Schluff (mittel große „Körner“) und Ton (kleine „Körner“) sind.

Das Wasser wird hauptsächlich von der sogenannten Kapillarkraft im Boden festgehalten, die verhindert, dass es tiefer in den Boden bzw. ins Grundwasser einsickert. Diese Kraft nimmt zu, je feiner die Poren, die Hohlräume zwischen den „Körnern“, sind. Je feiner die Korngröße ist, desto feiner sind auch die Poren zwischen diesen „Körnern“. Das bedeutet, dass ein Boden mehr Wasser speichern kann, je höher dessen Ton- bzw. Schluff-Anteil ist. Humus wirkt sich ebenfalls positiv auf das Wasserhaltevermögen aus.

Für die Bewässerung von Pflanzen ist ebenfalls entscheidend, wie hoch der Anteil des **pflanzenverfügbaren Wassers** in einem Boden ist. Die Kräfte, die das Wasser im Boden festhalten, lassen sich dadurch messen, wie viel Kraft aufgewendet werden muss, um dem Boden Wasser zu entziehen. Dies wird in einem Unterdruck (der **Saugspannung**) mit der Einheit „Pascal“ oder „Bar“ angegeben. Wenn ein wassergesättigter Boden entwässert wird, entweicht zunächst das Wasser, was sich in den großen Poren (Groporen) befindet, da dies nur schwach „festgehalten“ wird und setzt sich von grob nach fein fort. Je weniger Wasser ein Boden anteilig enthält, desto stärker wird das verbleibende gebunden. Auch Pflanzen saugen das Wasser aus dem Boden, die Kraft die sie dafür aufbringen können, ist allerdings begrenzt. Ab einer bestimmten und sehr feinen Porengröße (Ton) ist das Wasser stärker im Boden gebunden, als die Pflanzen daran saugen können. Dieses Wasser wird als Totwasser bezeichnet, da es nicht Pflanzenverfügbar ist. Weiterführend kann dieser Anteil nicht durch den volumetrischen Wassergehalt allein angegeben werden.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der volumetrische Wassergehalt im Gegensatz zur Saugspannung nicht als absoluter Wert allein für eine Bewässerungsentscheidung herangezogen werden kann. Stattdessen werden für eine Konversion zwischen der **Saugspannung** und der **Volumetrischen Bodenfeuchte** insbesondere die Bodenparameter benötigt. Im Folgenden wird erklärt, wie diese Kalibration erfolgt, oder wie die Messwerte der Saugspannung oder Volumetrischen Bodenfeuchte für sich relativ betrachtet werden können.

### 1.3. Funk-Bodenfeuchte-Sensorik

Ein (Funk-) Sensorsystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- 1: Sensoreinheit - ein Sensor, der die gewünschten Messdaten erfasst und in elektronischer Form ausgibt (Saugspannung oder Volumetrischer Wassergehalt).
- 2: Sendeeinheit/Funkeinheit - Ein Gerät in Form eines wasserdichten Behälters, welcher die Energieversorgung beinhaltet und die gemessenen Daten per Kabel empfängt und über Funk weiterversendet. Hierbei gibt es zwei dominierende Funkverfahren, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) und NB-IoT (Narrow Band Internet of Things). Ein LoRaWAN-Netzwerk erfordert das Aufstellen und Instandhalten von Gateways (3), während NB-IoT auf das bestehende Mobilfunknetz zugreift.
- 3: Gateway/Funkturm - Ein Gerät, welches sich in Sendereichweite befindet und die über Funk versendeten Daten empfängt. Das Gateway ist über einen Anschluss mit dem Internet verbunden und lädt die gemessenen Daten auf einen Server hoch.
- 4: Server - Ein Gerät, welches Teil eines Netzwerks ist und Ressourcen (z.B. Speicherplatz oder Daten) für andere Computer oder Programme zur Verfügung stellt.
- 5: Dashboard - Eine graphische Benutzeroberfläche, welche zur Darstellung der Daten dient. Das Dashboard greift auf den Server, auf welchem die Messdaten hochgeladen werden, zu und macht sie dem Benutzer, oft graphisch, zugänglich.

### 1.3.1. Bodenfeuchte-Sensoren

Bodenfeuchte-Sensoren sind inzwischen in verschiedenen Konzipierungen gut auf dem Markt verfügbar, unterscheiden sich jedoch zusammengenommen in diversen Eigenschaften, welche nachfolgend verglichen werden. Dabei lassen sich alle Bodenfeuchte-Sensoren und deren Messprinzipien in zwei große, primäre Klassen einteilen:

**Tensiometrische Sensoren** (messen Saugspannung, siehe oben) und **Dielektrische Sensoren** (messen Volumetrische Bodenfeuchte, siehe oben). Hierbei basieren tensiometrische Sensoren auf der Platzierung eines porösen Körpers im Boden, welcher die kapillare Struktur der Wurzel nachahmt. Wird an einer Seite des porösen Körpers eine Wassersäule mit Drucksensor verbunden, kann so direkt der Unterdruck der Saugspannung gemessen werden. Der Vorteil der tensiometrischen Sensoren liegt vor allem in der Bereitstellung eines Messwertes, der das Prinzip einer Wurzel nachzuahmen versucht, und damit sensitiv auf das kapillare Saugvermögen des Bodens ist. Zugleich ergeben sich zwei primäre Nachteile von tensiometrischen Sensoren: Diese sind oftmals wartungsaufwändiger (Nachfüllen der Wassersäule) und nicht ganzjährig außen einsetzbar (nicht geschützt gegen Frost). Zudem sind tensiometrische Sensoren i.d.R. auf eine fachgerechte Installation (Einschlämmung) angewiesen, da bei schlechtem Bodenkontakt nicht ausreichend Kapillarwirkung des Bodens auf das Sensorelement übertragen wird.

Dielektrische Sensoren basieren auf der Detektion des Bodenwassers mittels Messung dessen Molekulpolarisation. Hierbei gibt es verschiedene Ausführungen in verschiedenen Geometrien, welche sich stets auf die Qualität der Messung auswirken. Zudem unterscheiden sich die Sensoren in den benutzten Messfrequenzen und Auswertemethoden, basieren jedoch auf demselben Prinzip. Dielektrische Sensoren lösen im Allgemeinen die zuletzt angesprochenen, potenziellen Probleme von Tensiometern: Sie sind wartungsfrei und ganzjährig außen einsetzbar (frostresistent). Gleichzeitig kommen Sie mit dem Nachteil, dass regulär eine Aussage über das pflanzenverfügbare Bodenwasser basierend auf der Volumetrischen Bodenfeuchte auf direktem Weg nur bei Kenntnis der Bodeneigenschaften (Permanenter Welkepunkt, Feldkapazität) getroffen werden kann.

Da diese Bodeneigenschaften nicht notwendigerweise für alle Standorte vorliegen, ist es wichtig, auch Methoden für Dielektrische Bodensensoren, die ohne Eingabe von Bodenparametern auskommen, bereitzustellen. Hierzu wurden im Rahmen des NuTree-Projekts zwei Ansätze evaluiert: Betrachtung des (normalisierten) relativen Verlaufs und eine Bereitstellung einer Histogramm-Ansicht zur Einstellung der Grenzen.

### 1.3.2. Dashboards

Dashboards bieten im Allgemeinen eine Übersicht und Visualisierung der Zeitreihen-Sensordaten, Sensor- und Baumstandorte, und oftmals auch Benachrichtigungs- und Verwaltungsmöglichkeiten. Hierzu zählen beispielsweise das Konfigurieren von Echtzeit-Alarmen, sobald ein Sensor Trockenheit misst. Oder die Dokumentation von Gießgängen nebst den Sensordaten. Zur Sensordaten-Auswertung in einem Dashboard zählen Funktionalitäten wie etwa der Vergleich mehrerer Sensoren in einem Diagramm, der Abgleich mit Niederschlags- und Bewässerungsdaten, oder das Einstellen von zeitlichen Aggregationen (Stundenwerte, Tageswerte, etc.). Oftmals werden Dashboards von Herstellern von Bodenfeuchte-Sensorik mit angeboten. Qualitative Komplettlösungen zeigen sich auch durch die Möglichkeit der Schaffung von Quer-Integrationen. Das heißt, die Messdaten können herstellerunabhängig zwischen verschiedener Hardware und Software transportiert werden. Solche Querintegrationen wurden auch im Projekt erfolgreich angewandt, und haben sich als nützlich erwiesen.

## 1.4. Das Projekt NuTree

Das NuTree Projekt lief von 2022 bis 2025 im Rahmen von EIP-Agri und die Projektgruppe besteht aus den folgenden Partnern:

- **Seedhouse Accelerator GmbH:** Das Seedhouse ist als Koordinator für alle Aufgaben des Projektmanagements zuständig und agiert als Ansprechpartner und Repräsentant in allen Projektbelangen.
- **Agvolution GmbH:** Agvolution bietet eine Prozessmanagement-Software auf Basis neuartiger IoT-Sensortechnologie und KI-basierter Entscheidungshilfen an und ist für die fortlaufende technische Begleitung des Projektes verantwortlich.
- **Bonk Pflanzen Handels GmbH:** Die Bonk Pflanzen Handels GmbH hat die Rolle des Anwenders der entwickelten Technologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette.
- **Freiberufler Dr. Michael Malms:** mm-it4you.de unterstützt als Dienstleister und Berater die Bonk Pflanzen Handels GmbH bei allen Aktivitäten innerhalb des Projekts.
- **Landeshauptstadt Hannover, Fachbereich Umwelt & Stadtgrün:** Der Fachbereich Umwelt und Stadtgrün übernimmt die Doppelrolle des Endnutzers und der Urproduktion mit dem Schwerpunkt der Einbindung und Umsetzbarkeit auf kommunaler Ebene.

Ziel des Projektes war, den Einsatz von Funk-Bodenfeuchte-Sensorik entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu erproben und weiterzuentwickeln. Dies beinhaltet das ressourcenschonende Kultivieren von Gehölzen in der Baumschule Bonk, die Überwachung des Gesundheitszustandes der Bäume auf dem Transportweg sowie das Etablieren der gepflanzten Bäume in der Landeshauptstadt Hannover.

Während dieses Projektes wurden Experimente durchgeführt und viele Erkenntnisse über den praktischen Einsatz von Funk-Bodenfeuchte-Sensorik gewonnen. Diese werden im Folgenden geschildert.

## 2. Erfahrungsberichte aus der Praxis

### 2.1. Baumschule Bonk

Aus Sicht des Endanwenders sollte das Projekt eine IT-Infrastruktur schaffen, die dem Baumschulisten jederzeit in Echtzeit einen Überblick über den aktuellen oder in Kürze zu erwartenden Trockenstress der Pflanzen auf seinen Freiflächen verschafft. Dazu sind u.a. Sensoren notwendig, die an kritischen Stellen auf dem Gelände eingesetzt werden und stellvertretend für eine größer Fläche die Feuchtigkeit messen. Im Einzelnen lassen sich folgende Anforderungen nennen:

- Messungen in mehreren Ebenen, ideal in -30, -60 und -90 cm Tiefe
- Stabile Übertragung der Messwerte in eine Cloud über Lora-WAN oder per Mobil-Funk
- Auswertung und Darstellung in Echtzeit über ein Dashboard
- Die Sensoren müssen in das Wurzelwerk auch größerer Gehölze (z.B. 16 m hoch) einbringbar sein – es handelt sich nicht um eine Container-Baumschule
- Eine KI gestützte Gießempfehlung gibt den Zeitpunkt und die Wassermenge für die notwendigen Bewässerungsfahrten priorisiert an
- Eine mobile Version der Sensor-Infrastruktur ermöglicht die Überwachung der Gehölze auch während des Transportes, so dass der Baumschulist eine lückenlose Kontrolle des Gesundheitszustandes der Pflanzen erhält.

- während des Transports, werden in regelmäßigen Intervallen (z.B. alle 10 min)
  - o die GPS-Position des Fahrzeuges,
  - o Transport auch grenzüberschreitend (Mobilfunk)
  - o der aktuelle Bewegungszustand (LKW steht oder fährt)
  - o die Lufttemperatur im Laderaum
  - o die Luftfeuchtigkeit im Laderaum
  - o die Bodenfeuchte im Wurzelballen
 gemessen und übertragen.
- Am endgültigen Anpflanzort soll auch die gleiche Sensor-Infrastruktur eingesetzt werden können. Alle Werte sollen genau dargestellt werden wie in der eigenen Baumschule.

Die hier genannten Anforderungen können erfüllt werden durch den Einsatz von:

- digitalen Funktensiometern in verschiedenen Längen bis zu 90 cm Tiefe, die über Mobilfunk stabil übertragen und die Saugspannungen messen, so wie die überall seit Jahren eingesetzten analogen Tensiometer. Die Sensoren sind leicht in das Wurzelwerk einzubringen durch das Bohren entsprechender kleiner Erdlöcher.
- einem Dashboard, so wie von dem Startup THORKAS entwickelt, das in Echtzeit den Verlauf der übertragenen Messwerte graphisch darstellt, das Erreichen von einstellbaren Schwellwerten per push-Nachricht oder E-Mail meldet und die Menge des ausgebrachten Wassers dokumentiert. Niederschläge werden ebenfalls berücksichtigt. Es fehlt bisher noch die Möglichkeit, eine verlässliche Gießempfehlung darzustellen. Dies wäre ein weiterer implementierbarer Schritt. Dazu bedarf es einer ausgedehnten KI-Trainingsphase, die aus Zeitgründen nicht mehr berücksichtigt werden konnte. Da der Baumschulist aber aus Erfahrung die auszubringenden Wassermengen kennt, im Dashboard festhält und den Effekt der Bewässerung unverzüglich im Dashboard sieht, gibt es immer eine für die Praxis ausreichende Rückkopplung (eine Karenzzeit von ca. 4 h sollte berücksichtigt werden bis zur Einstellung des neuen stabilen Feuchtwertes).
- Für die Transport-Überwachung ist die von Agvolution entwickelte, auf der Climavi-Elektronik und Software basierenden „Transport-Box“ eine gute Grundlage für ein effektives Monitoring. Zwei Sensoren werden angeschlossen: ein kombinierter Luftfeuchte- und Lufttemperatur-Sensor und der Climavi-Sensorfuß zur Messung der relativen Veränderung der Feuchte im Wurzelballen. Der GPS – Sender ist in der Transportbox verbaut. Die gesendeten Messwerte werden in demselben Dashboard dargestellt, das auch für die Baumschule verwendet wird. Somit sind alle Informationen für die lokalen als auch die mobilen Bewässerungsvorgänge an einer zentralen Stelle vorhanden.

## 2.2. Landeshauptstadt Hannover

Für die Landeshauptstadt Hannover stellte die Thematik der Funk-Bodenfeuchte-Sensorik mit dem Beginn des Projektes einen gänzlich neuen Themenbereich dar. Dieser konnte durch das Projekt erschlossen werden und wurde in das Bewässerungsmanagement der Stadt eingewoben.

**Praxisetablierung von Sensortechnik:** Ein wichtiger Erfahrungswert aus dem Projekt ist, dass dies einen nicht zu vernachlässigenden **Personalbedarf** mit sich bringt. Das kommunale Bewässerungsmanagement ist vielerorts ein auf Erfahrungen basierendes und seit Jahrzehnten eingespieltes Handwerk der Kraftfahrer\*Innen und Verwaltungskräfte. Das erfolgreiche Einspeisen neuer Technik in so ein System erfordert Zeitaufwand und Fingerspitzengefühl bzw. Personalaufwand. Auf Basis der Erfahrungen aus dem Projekt ist dafür über eine Zeitspanne von mehreren Jahren mindestens **eine halbe Stelle** erforderlich. Nach der Etablierung sinkt der Arbeitsaufwand auf ein noch nicht bekanntes aber deutlich geringeres „Erhaltungs-Maß“.

**Eignung von Sensortechnik im kommunalen Kontext:** Im NuTree-Projekt hat sich herausgestellt, dass Funk-Bodenfeuchte-Sensorik auch in der Stadt **ein effektives Werkzeug** darstellt um den Bewässerungsbedarf zu bestimmen. Hierfür hat sich in Hannover die „Standort-Methode“ als praxistauglich erwiesen. Dabei wird ein Standort mit mehreren vergleichbaren Baumstandorten ausgewählt, z.B. nach der Sanierung einer Straße mit 20 Neupflanzungen (gleiche Baumart, gleiches Standjahr). An diesem Standort werden 5 Bäume zufällig und gut verteilt ausgewählt, welche mit Bodenfeuchte-Sensoren ausgestattet werden. Abschließend wird ein Mittelwert aus den 5 Bäumen gebildet, um Ausfälle, Störungen oder andere Abweichungen erkennen zu können. Dieser Standort kann nun in einem gewissen Umkreis als Referenzstandort für Bäume in diesem Alter herangezogen werden. In Hannover läuft die Baumbewässerung immer in einem zwei- oder einwöchentlichen Rhythmus ab. Durch eine stadtweite Überwachung der Bäume nach diesem System kann nun auf zwei Weisen in das die Baumbewässerung eingegriffen werden. Zunächst können so faktenbasiert Beginn und Ende der jährlichen Bewässerungssaison bestimmt werden. Weiterführend kann steuernd in den Bewässerungsrhythmus eingegriffen werden, in dem ein Wässerungsgang ausgesetzt oder ein zusätzlicher angefordert wird.

Die Praxisetablierung der Sensortechnik bringt noch einen weiteren entscheidenden Vorteil mit sich, da die Bewässerungsentscheidungen so faktenbasiert und auch von Personen getroffen werden können, die noch keine Jahrelange Erfahrung in der Bewässerung von Stadtbäumen haben (z.B. durch die neue Leitung eines Werkhofes).

**Sensoren in Kombination mit Bewässerungsvergabe:** In Kommunen wird in der Regel zumindest ein Teil der zu erledigenden Arbeit (z.B. Baumbewässerung) an Firmen vergeben und nicht in Eigenleistung abgearbeitet. Hier entsteht oft ein Problem in der Leistungsabnahme, da ein Wasser-Gang einer Firma oft schon nach wenigen Tagen nicht mehr erkennbar ist. Außerdem ist praktisch nicht möglich die Leistung in Echtzeit zu dokumentieren. Mit der Funk-Sensortechnik können Wassergaben erkannt und auch **aus der Ferne effektiv abgenommen** werden.

**Sensorauswahl & Sensorvergleich:** Im und neben dem NuTree-Projekt sind von der Landeshauptstadt Hannover zusätzlich zum Climavi-Sensor von Agvolution auch einige weitere Modelle getestet worden. In diesem Versuch sind 3 vergleichbare Jungbaumstandorte (alle in einer Straße) auf jeweils 3 Messtiefen mit Bodenfeuchte-Sensoren ausgestattet worden. Dieser Standort ist im Laufe des Jahres oft bewässert worden und hat viele Daten aus dem städtischen Umfeld geliefert. Es kamen sowohl tensiometrische als auch volumetrische Sensoren zum Einsatz. Um die Daten beider Sensortypen miteinander

vergleichen zu können, wurden in der Auswertung die relativen Wertänderungen bei einer Wassergabe verglichen. Also die Intensität des Messwertausschlages, wenn der Sensor gewässert wird. Dabei hat sich herausgestellt, dass jeder Sensortyp innerhalb seiner Mess-Reichweite (Minimal- bis Maximalwert) vergleichbare Ausschläge ausgibt. Es liegen gewisse Schwankungen vor, aber grundsätzlich lässt sich festhalten, dass **alle getesteten und auswertbaren Sensoren in der Praxis funktioniert** haben und sich für eine Bewässerungssteuerung eignen würden.

Abseits von der Art des Sensors ist hervorzuheben, dass **die Installation zwingend fachgerecht erfolgen** muss. Ein Sensor kann nur so gute Daten liefern, wie er auch verbaut worden ist. Hierfür können Firmen beauftragt, oder das eigene Personal fortgebildet werden.

**Anforderungen an das Dashboard:** Da eine Kommune in der Gesamtheit ihrer Tätigkeitsbereiche auch eine Vielzahl von Sensoren einsetzt und noch einsetzen wird ist es naheliegend im Sinne der „Smart City“ ein städtisches Dashboard einzurichten, auf welchem die Sensoren ausgewertet werden können. Dies war für die Landeshauptstadt Hannover nicht Teil des NuTree-Projektes wird aber abseits davon angestrebt. Für das Dashboard entscheidend ist, dass die Daten übersichtlich sowohl in Tabellen-Form als auch in einer Grafik (zeitlicher Verlauf) dargestellt werden können. Für die hier angestrebte Art der Sensorverwendung sollten die Daten mehrerer Sensoren miteinander verrechnet werden können (Mittelwert). Weiterführend ist es entscheidend, wie die Daten angezeigt werden. Bei einer volumetrischen Bodenfeuchte-Messung sollten die Werte niemals absolut betrachtet werden, da die Schwankungen der individuellen Sensoren zu groß sind. Stattdessen sollten sie normiert aufgetragen werden. Alternativ können die Interpretationsbereiche der absoluten Werte verschoben werden. Dies kann jedoch für den ungeübten Nutzer schnell verwirrend werden.

Abschließend ist es hilfreich optische Schwellwerte für die Bewässerung anzeigen lassen zu können sowie Bewässerungsereignisse zu verzeichnen. Auch das Einspielen und Anzeigen von Niederschlagsdaten unterstützt die Auswertung der Bodenfeuchtedaten sehr.

### 2.3. Agvolution

Das NuTree-Projekt bot aus technischer Sicht ein großartiges Umfeld für eine praxisnahe Produktentwicklung und Testung. Nachfolgend sollen einige Kernpunkte vorgestellt werden, die aus praktisch-technischer Sicht relevant sind:

**Mobile Überwachung von Pflanzen- und Baumtransporten:** Im Rahmen des Projekts wurde ein neues Hardware- und Software-Produkt zur gleichzeitigen, exakten räumlichen und zeitlichen Erfassung von Vitalparametern (Bodenfeuchte, Bodentemperatur, Luftfeuchte, Lufttemperatur – auch weitere Messgrößen wie Saftfluss möglich, etc.) entwickelt, und erfolgreich eingesetzt. Hierbei erfolgte eine Optimierung hinsichtlich globaler Daten-Konnektivität, Akku-Laufzeit und Aufzeichnungsintervallen. Diese „Transport-Box“ bot den Baumschulisten spannende Echtzeit-Einblicke während der Transporte, und eine Möglichkeit, die Verantwortung während des Gefahrenübergangs zu kontrollieren.

**Vandalismus-geschützte Bodenfeuchte-Sensorik im öffentlichen Bereich:** Insbesondere in stark frequentierten Bereichen in Innenstädten benötigen dort platzierte Sensoren für Bodenfeuchte vor Vandalismus geschützte, unauffällige Gehäuse. Hierbei war es im Rahmen des Projekts möglich, ein neues Gehäuse-Konzept, welches auch Lichteinfall der Sonne auf eine integrierte Solarzelle ermöglicht, erfolgreich zu testen. Auch bei Verschattung durch umliegende Vegetation ist die Akku-Laufzeit auf über ein Jahr Autarkie ohne Sonnenlicht ausgelegt.



**Datenübertragung:** Ursprünglicher Einsatz privater IoT-Netze (hier: LoRaWAN) im Baumschul-Betrieb erwies sich aufgrund des Aufwands für Gateway-Einrichtung und -Betrieb als wenig praktikabel. Hier bieten Mobilfunk-basierte Sensoren eine einfache Plug and Play-Lösung. Anders ist dies etwa in Städten mit bereits verfügbaren, privaten IoT-Netzen. Dort können gleichermaßen Sensoren mit LoRaWAN oder mioty einfach integriert werden und zeigen Vorteile im Energieverbrauch.

**Bodenfeuchte-Sensorik:** Grundsätzlich zeigen die Sensor-Vergleichsversuche aus dem NuTree-Projekt zunächst einmal untereinander sehr gute Korrelationen in den relativen, zeitlichen Verläufen innerhalb des Messprinzips (dielektrisch oder tensiometrisch), und dies je nach Bodenart auch über das Messprinzip hinaus. Es wurde demonstriert, dass insbesondere eine gute Vergleichbarkeit bei Betrachtung der relativen Änderungen in den zeitlichen Verläufen der Bodenfeuchte aufgezeigt werden kann. Dies ist ein sehr wichtiges Ergebnis für die Praxis, da mit diesem Verfahren die Notwendigkeit für eine bodenartabhängige Kalibration entfällt. Somit liegt der Fokus bei dielektrischen Sensoren nicht mehr auf einer exakten Kalibration der Volumetrischen Bodenfeuchte, sondern stattdessen auf umgebenden Kriterien wie:

- **Wie gestaltet sich die Handhabung des Bodenfeuchtesensors? Wie aufwändig ist die Installation? Können Fehler bei der Installation gemacht werden?**
- **Bildet der Sensor eine oder mehrere Messpunkte in einem Gerät ab?**
- **Sind die Sensoren ganzjährig außen einsetzbar? Können die Sensoren auf mehrere Jahre im Boden verbleiben? Können die Sensoren später entnommen und umgesetzt werden?**
- **Welches Erdvolumen wird bei der Messung abgedeckt?**
- **Ist die Messung der Bodenfeuchte empfindlich für Querstörungen (bspw. abhängig von der Temperatur)?**

Der im Rahmen des NuTree-Projekts (weiter-)entwickelte und erprobte Bodenfeuchtesensor („climavi Soil“) bietet durch die Anordnung zweier gegenüberliegender Elektroniken ein vergrößertes und homogenes Messvolumen, und dadurch einige Vorteile im Vergleich zu bis dahin existierende Sensoren auf dem Markt. Der Sensor wurde praxisoptimiert, verbindet mehrere Mess-Horizonte in einem Gerät, welche modular verkürzt- und verlängert werden können, und ist ganzjährig auch in rauen Umgebungen außen einsetzbar. Beim Design wurde auch Wert auf die Möglichkeit der späteren Entnahme und Wiederverwendung etwa an einem anderen Gehölz gelegt. Querstörempfindlichkeiten gegenüber Temperatur wurden ebenfalls in Prüfkammern vermessen und eliminiert.

**Dashboards:** Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Datenplattformen und Dashboards getestet (Climavi-App, projektspezifisches Dashboard und Thorkas-Dashboard). Hierbei bieten alle drei Systeme Möglichkeiten zur Anzeige der Standorte und Zeitreihendaten, verschiedene zeitliche Auflösungen (Aggregationen), Abgleich mit Niederschlagsdaten der lokalen Wetterstation oder Wetter-API und Dokumentation der Gießmengen und Prognosen für Bodenfeuchte. Auch können in allen Systemen Alarmer für SMS, E-Mail, Telefon, etc. konfiguriert werden. In diesem Zug konnten auch Erfahrungen zur horizontalen Datenintegration per HTTP REST API oder Webhook gesammelt werden, welche sich ohne größere Aufwände als gut umsetzbar erwiesen. Die Schwerpunkte der Dashboards waren hierbei verschieden gesetzt: Das projektspezifische Dashboard bot gute Möglichkeiten für kontinuierliche Sensordaten-Vergleiche. Die Climavi-App stellt vor allem ein Ampelsystem für die einfache Handhabung heraus. Das Thorkas-Dashboard bot insbesondere eine gute Visualisierung während der mobilen Transportüberwachung.

### **3. Fazit**

#### **3.1. Handlungsempfehlungen aus Sicht von Baumschule Bonk**

Für die Baumschule sind direkt verwertbare Ergebnisse entstanden: Die Funk-Tensiometer sind mit dem THORKAS Dashboard im täglichen Einsatz. Dabei hat sich neben der Standardanwendung noch eine „dynamische“ Anwendungsweise ergeben, indem ein Teil der Tensiometer an ständig wechselnden Einsatzorten genutzt werden: Entweder in gerade frisch umgeschulten Baumbeständen, um das Anwachsen in den ersten Wochen zu überwachen und/oder in den Wurzelballen von bereits ausgegrabenen Bäumen, die vor dem Abtransport noch einige Wochen auf dem Gelände stehen müssen. D.h. die Funk-Tensiometer werden kurzerhand „umgezogen“. Dies bedeutet nur wenige Handgriffe und ist schnell erledigt. Auf dem Dashboard wird der neue Standort eingetragen und die Messungen gehen direkt weiter.

Ebenso wichtig ist die Transportüberwachung. Dazu steht eine Transport-„Auswertebox“ zur Verfügung, an die die Sensoren (Luftfeuchte, Temperatur im Laderaum und Bodenfeuchte im Wurzelballen) angeschlossen sind. Diese Elektronikbox ist am Stamm angebunden und sendet aus dem fahrenden LKW im 10-30min Takt die Messwerte in die Cloud zur Darstellung auf dem Dashboard aus.

Selbst die Fernüberwachung beim Endkunden ist bereits bei einem großen privaten Vorhaben aktiv: Dort ist dieselbe Sensor-Anordnung wie in der Baumschule im Einsatz. Der lokale Gärtner hat nach einer Einweisung auch einen Zugang zu dem web-basierten THORKAS Dashboard erhalten. Lieferant (Baumschule) und lokaler Gärtner bei Endkunden stehen in Kontakt und sehen dieselben Graphiken auf dem Dashboard. Das erleichtert die Kommunikation enorm, da Fehlinterpretationen vermieden werden.

#### **3.2. Handlungsempfehlungen aus Sicht von der Landeshauptstadt Hannover**

Aus der Perspektive der Landeshauptstadt Hannover können der Einsatz und die feste Etablierung von Funk-Bodenfeuchte-Sensorik auch für andere Kommunen empfohlen werden. Die Technik unterstützt insbesondere die Vitalität von Jungbäumen und kann die Ausfallquote von Jungbäumen in Dürrejahre effektiv senken. Darüber hinaus kann die Menge an eingesetzten Ressourcen (Wasser, Kraftstoff, Maschinen, Personal und finanzielle Mittel) in feuchteren Jahren gesenkt werden, ohne die Gesundheit der Jungbäume zu gefährden.

Es können unterschiedliche Sensormodelle dafür verwendet werden, entscheidend ist, dass die Sensoren fachlich korrekt verbaut sind und dass die Daten fachlich sinnvoll ausgewertet werden (siehe „Sensorauswahl & Sensorvergleich“).

Zur Datenübertragung kann die NB-IoT Variante auf einer stadtweiten Skala empfohlen werden. Im Laufe des gesamten Projektes sind kaum Probleme damit aufgetreten und es gab fast immer guten Empfang. Somit hat es sich in der Praxis bewährt und ist in Hannover auch am wirtschaftlichsten.

Wichtig zu erwähnen ist jedoch der Personalaufwand, der dadurch in der Verwaltung entsteht, hier müssen bei einer Etablierung unbedingt Personalressourcen freigestellt werden, andernfalls kann nicht von einem dauerhaften Erfolg ausgegangen werden.

### 3.3. Handlungsempfehlungen aus Sicht von Agvolution

**Mobile Überwachung von Pflanzen- und Baumtransporten:** Die gleichzeitige Erfassung von Geo-Position und Vitalparametern bietet einen hohen, neuen Mehrwert. Dadurch können nachvollziehbar und unabhängig Messwerte, die exakt orts- und georeferenziert sind, gewonnen werden. Der Einsatz einer solchen „Transport-Box“ im Tagesgeschäft wird klar empfohlen, da hierdurch der bei Pflanzentransporten oftmals heikle Gefahrenübergang stringent nachvollzogen werden kann. Der Einsatz der Hard- und Software ist einfach: Die Sensorik kann im Betrieb am Ladegerät verbleiben, und wird bei Verladen mit auf das Transportfahrzeug gegeben. Die Datenübertragung ins Dashboard erfolgt ohne technische Vorkenntnisse und Einrichtungsaufwand in Echtzeit weltweit.

**Kosten-Nutzen-Abwägung Sensorik-Einsatz:** Das NuTree-Projekt hat klare Möglichkeiten der Kostenersparnis durch optimiertes Management im kommunalen Bereich aufgezeigt. Hiervon ist die bedarfsgerechte, sensorbasierte Bewässerung eine Komponente. Aus anderen Umfeldern mit wesentlich höheren Anzahlen an Sensorstandorten konnte eine klare Reduktion der Totbaum-Rate insbesondere im Jungbaum-Bestand aufgezeigt werden, wodurch sich Bodenfeuchte-Messsysteme im kommunalen Bereich regulär bereits nach einem Jahr amortisieren. Hierbei wird stark der Einsatz von dielektrischen Bodenfeuchtesensoren aufgrund der Langlebigkeit und Beständigkeit und des ausbleibenden Wartungsaufwands empfohlen.

**Bodenfeuchte-Sensorik:** Es ist essenziell, den richtigen Bodenfeuchte-Sensor-Typ für das jeweilige Einsatz-Szenario zu finden. Zunächst ist Wert auf eine Wahl eines Sensors zu legen, der grundsätzlich querstörungsfrei, stabile Zeitreihendaten liefert. Ein Ergebnis des NuTree-Projekts ist es, dass dielektrische Sensoren in der Praxis auch ohne (aufwändiger) bodenartabhängiger Kalibration auf Basis der relativen Verläufe und relativen Änderungen eingesetzt werden können. Dann überwiegen – wie oben erwähnt – Vorteile wie Wartungsfreiheit und Frostresistenz. Der Einsatz von manuellen, tensiometrischen Sensoren ist in Baumschulen bekannter, welche ebenso elektronisch ausgelesen werden können. Der Einsatz von Tensiometern kommt jedoch mit dem Nachteil von zusätzlichen Wartungsaufwänden und potenziellen Geräteschäden bei Frost.

**Datenübertragung:** Zur Datenübertragung auf Betrieben (beispielsweise Baumschul-Betrieben) wird generell Mobilfunk (hierzu zählen etwa Nb-IoT und LTE-M) aufgrund des ausbleibenden Wartungs- und Installationsaufwands empfohlen. Diese Technik ist gleichermaßen in anderen Umfeldern – etwa im kommunalen Umfeld – kompatibel. In kommunalen Umfeldern existieren oftmals auch private IoT-Funknetze, etwa mit LoRaWAN oder mioty. In diesem Fall kann gleichermaßen eine Datenübertragung auch über diese privaten IoT-Funknetze erfolgen, da der Wartungs- und Installationsaufwand für das Individuum entfällt (diese Netze werden idR. durch Stadtwerke betrieben). Sensoren mit LoRaWAN oder mioty bieten vor allem Vorteile hinsichtlich deren Energieverbrauch bei der Datenübertragung. Erfahrungsgemäß sind dennoch auch in Städten die Abdeckungen durch Mobilfunk oftmals besser präexistent.

#### Kontakt und weitere Informationen zum Projekt:

Baumschule Bonk:  
AGVOLUTION GmbH:  
Landeshauptstadt Hannover, Bereich Umwelt- und Stadtgrün:  
Seedhouse Accelerator GmbH:  
Thorkas UG:

info@bonk-baumschulen.de  
contact@agvolution.com  
67.33@hannover-stadt.de  
greta@seedhouse.de  
stieger@thorkas.com

<https://www.nutree-eip.de/>  
<https://projekte.eip-nds.de/schlusstechnologien/nutree-gesunde-baeume-in-staedten-und-parks-dank-sensortechnik-und-kuenstlicher-intelligenz/>