



Bericht im Rahmen der Smart City LoRaWAN Integration Labs@bw

Projektdokumentation

Stuttgart, 30. Dezember 2024



Baden-Württemberg
MINISTERIUM DES INNEREN, FÜR DIGITALISIERUNG UND KOMMUNEN



Universität Stuttgart
Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT



Fraunhofer
IAO

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hintergrundinformationen und Praxiserkenntnisse.....	2
2.1	<i>Friedrichshafen.....</i>	<i>2</i>
2.2	<i>Neckarsulm</i>	<i>7</i>
2.3	<i>Neulingen und Ölbrenn-Dürren</i>	<i>13</i>
2.4	<i>Ulm.....</i>	<i>15</i>
3	Begleitforschung.....	18
3.1	<i>Friedrichshafen.....</i>	<i>18</i>
3.1.1	Weitere Anwendungsmöglichkeiten: Mobile Gateways.....	18
3.2	<i>Neckarsulm, Neulingen und Ölbrenn-Dürren</i>	<i>18</i>
3.2.1	Wissenschaftliche Grundlagen und Handlungsempfehlungen für den Use Case »Intelligente Bewässerung«	18
3.2.2	Mobile Bodenfeuchtesensoren.....	23
3.3	<i>Ulm.....</i>	<i>23</i>
3.3.1	Entwicklungspotenzial: Standardisierte Kartenanwendung	23
3.3.2	Verbreitung der Daten in der Öffentlichkeit	24
4	Quellenverzeichnis	26

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht enthält die Dokumentation der im Rahmen der »Smart City LoRaWAN Integration Labs@bw« in Zusammenarbeit von Kommunen und Umsetzungspartnern durchgeführten LoRaWAN-Projekte. Es werden grundlegende Informationen zur Umsetzung, die gewonnenen Praxiserkenntnisse und die begleitende Forschung dargestellt. Der Umsetzung der Projekte ging eine Reihe von wissenschaftlichen Analysen und individuellen Konzeptions- und Planungsphasen voraus. Die entsprechenden Inhalte finden sich in weiteren, ebenfalls öffentlich zugänglichen Berichten. Grundlegend für das Verständnis dieses Berichts ist die vorherige Lektüre des Berichts zu den Projektkonzepten, in dem die zugrundeliegenden Use Cases, die damit verbundenen Innovations- und Forschungspotenziale, Produktlisten und Kostenkalkulationen aufgeführt sind.

Kommunale Projektbeteiligte:

- Gemeinde Brigachtal
- Gemeinde Neulingen
- Gemeinde Ölbrenn-Dürrn
- Stadt Friedrichshafen
- Stadt Herrenberg
- Stadt Karlsruhe
- Stadt Knittlingen
- Stadt Neckarsulm
- Stadt Ulm

Umsetzungspartner:

- citysens GmbH
- Fichtner IT Consulting GmbH
- SWP Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG

Abbildung 1 zeigt die Einbettung der Projekte in die Smart City LoRaWAN Integration Labs@bw. Die Gesamtdauer des Forschungsvorhabens betrug 9 Monate, wobei die Begleitung der eigentlichen Umsetzungsprozesse je nach Projekt nur wenige Wochen bis 3 Monate umfasste. Entsprechend begrenzt sind die Ergebnisse der Projektdokumentation.



Abbildung 1: Überblick über die Arbeitsschritte im Projekt »Smart City LoRaWAN Integration Labs@bw« (Quelle: Fraunhofer IAO, 2024)

In diesem Kapitel finden sich Fragebögen und die dazugehörigen Antworten zu den LoRaWAN-Projekten im Rahmen der Smart City LoRaWAN Integration Labs@bw. Gegenstand sind Hintergrundinformationen und Praxiserkenntnisse, die unter der Redaktion des Forschungsteams von Vertretenden der beteiligten Kommunen und Umsetzungspartner wiedergegeben werden.

2.1 Friedrichshafen

Beantwortet durch citysens, Fichtner und die Stadt Friedrichshafen:

1. Begründung für die spezifische Auswahl der Gateways und Sensoren

Die Auswahl der technischen Hardware orientierte sich an den jeweils spezifischen Anforderungen der Use-Cases, Wirtschaftlichkeitsaspekten und ggf. Erfahrungswerten aus der Praxis anderer Use-Cases. Neben den eigentlichen funktionellen Anforderungen spielten auch die verfügbaren Montagemöglichkeiten eine Rolle. So müssen z. B. die Tracker gut an den zu ortenden Gegenständen befestigt werden können. Beim Monitoring der Rettungszufahrten wurde auf einen neuartigen Sensor mit KI-Bildauswertung gesetzt, um einen größeren Bereich pro Sensor abdecken zu können. Zudem entfällt das aufwendige Einlassen der Sensoren in die Fahrbahnoberfläche, da die Sensoren vergleichsweise unkompliziert an Verkehrsschildern oder Straßenlaternen befestigt werden können.

2. Angaben zu den Standorten und zur Installation der Gateways und Sensoren

2.1 An wie vielen Standorten wurden stationäre Gateways installiert und wie hoch ist die Netzabdeckung?

In Friedrichshafen wurden sechs stationäre Gateways an strategisch günstigen Punkten im Stadtgebiet aufgebaut. Inwieweit diese das komplette Stadtgebiet abdecken können, wird im Rahmen des Sensorbetriebs aktuell noch verifiziert.

2.2 Mit welchen Fahrzeugen, auf welchen Routen und zu welchem Zweck werden mobile Gateways eingesetzt? Wo und wie sind die mobilen Gateways in den Fahrzeugen platziert?

In drei Botenfahrzeuge (zur Auslieferung der Post) und ein Feuerwehrfahrzeug, die sich häufig und auf unterschiedlichen Routen im Stadtgebiet bewegen wurden vier mobile Gateways installiert und über den Anschluss für den Zigarettenanzünder mit Strom versorgt.

2.3 An wie vielen Rettungsringen und -stangen wurden GPS-Tracker wie befestigt?

An den neun Rettungsringen, die ganzjährig am städtischen Uferbereich verfügbar sind, wurden GPS-Sender installiert. Sofern sich deren Anwendung bewährt, können perspektivisch weitere Wasser- und Eisrettungsgeräte ausgestattet werden.

2.4 An wie vielen Outdoor-Möbeln wurden GPS-Tracker wie befestigt?

Zunächst betrifft das GPS-Tracking testweise zwei Stühle. Weitere Stühle sind derzeit aufgrund des häufigen Abhandenkommens mit Stahlseilen und -nägeln im Boden

verankert. Sofern die Sensoren eine abschreckende Wirkung hinsichtlich des unerlaubten Entfernens haben, können weitere Stühle ausgestattet und von der stationären Befestigung gelöst werden.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

2.5 Wie viele GPS-Tracker sind für den städtischen Kurierdienst vorgesehen?

Fünf Geldtaschen des städtischen Kurierdienstes werden im Rahmen des Projekts mit GPS-Sensoren ausgestattet.

2.6 An wie vielen Rettungszufahrten wurden wo und wie Kamerasensoren angebracht?

23 Rettungszufahrten, die besonders häufig zugeparkt sind, wurden in Abstimmung mit dem Gemeindevollzugsdienst und der Feuerwehr für das Projekt ausgewählt. Die Anbringungshöhe der Sensoren unterscheidet sich je nach Befestigungsmöglichkeit und dem Straßenbereich der berücksichtigt werden soll. Grundsätzlich wurde aber eine Höhe gewählt, die vom Boden aus nicht erreichbar ist, mit einer kleineren Leiter aber dennoch Wartungsarbeiten zulässt. Die Sensoren wurden mit Schellen und Halterungen an Laternen oder Straßenschildern befestigt.

2.7 Gefährdung der Infrastruktur durch Vandalismus und Witterungseinflüsse?

Hierzu bestehen aufgrund des Umstands, dass die Sensoren erst vor kurzem installiert wurden, noch keine belastbaren Erfahrungswerte.

3. SenseCAP-Kamerasensor

3.1 Wie wurde die KI in die Lage versetzt, Fahrzeuge speziell auf Rettungszufahrten zu erkennen (und gleichzeitig Fahrzeuge in anderen vom Kamerasensor erfassten Bereichen zu ignorieren)?

Die KI erkennt nur Fahrzeuge und kann nicht unterscheiden ob es sich gerade auf der Rettungszufahrt befindet. Man muss hier beim Ausrichten der Kamera eben dies berücksichtigen.

3.2 Gibt es Alternativen zu der gewählten Lösung, um KI in die Lage zu versetzen, Fahrzeuge auf Rettungszufahrten über den SenseCAP-Kamerasensor zu erkennen?

Mit einem deutlich höheren Entwicklungsaufwand und für einzelne Standorte individuell trainierte / angepasste Modelle wäre mit dem SenseCAP dieses Verhalten zu bewerkstelligen. Aber da es sich hier eher um eine Minderheit an Standorten handelt würde ich abschätzen, dass hier dann auch auf teurere Sensoren zurückgegriffen werden kann, die so ein solches Feature (Region of Interest) standardmäßig mit anbieten.

3.3 Für welche Arten von Rettungszufahrten / in welchen Umgebungsszenarien ist eine KI-gestützte Überwachung mit dem SenseCAP nicht möglich? Welche alternativen Sensorlösungen können in diesen Fällen eingesetzt werden?

Eine KI-gestützte Überwachung mit dem SenseCAP ist immer dann nicht möglich, wenn
a) zu viele Fahrzeuge (legale Parkplätze oder viel befahrene Straße) zwangsläufig im Bild der Kamera zu sehen sind. -> Alternative sind hier wie oben beschrieben, ggf. teurere Kamerasysteme
b) Es keine Möglichkeit gibt, eine Kamera in angebrachter Höhe anzubringen. -> Alternativen könnten spezielle Bodensensoren sein, die aber vom Tiefbauamt in den Bodenbelag eingebracht werden müssten und pro Sensor nur einen geringeren Bereich abdecken könnten.

4. Datennutzung

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

4.1 In welchen Situationen bzw. Zeitintervallen erfolgt die Datenübertragung durch die Sensoren?

Bei den Rettungsringen nur bei Bewegung bzw. der täglichen Statusnachricht. Bei den Stühlen werden derzeit noch verschiedene Betriebsformen getestet. Die KI-Kameras senden in festen Zeitabständen von 5 min.

4.2 Erwartete Batterielebensdauer der Sensoren

Hierzu gibt es noch keine Erfahrungswerte.

4.3 Funktionalität der Datenübertragung

Die Daten werden aus dem IoT-Server an einem Alarmserver übergeben der über verschieden Wege Nachrichten versenden kann (z. B. Email, SMS, Telefon...). Perspektivisch kann auch ggf. eine noch tiefere Integration in an verschiedenen Stellen bereits genutzte Softwareprodukte erfolgen. Während mit GPS-Trackern die Koordinaten sehr zuverlässig ermittelt werden können, arbeiten die KI-Sensoren an den Rettungszufahrten mit Wahrscheinlichkeitswerten. Hier werden aktuell noch verschiedene Schwellwertszenarien getestet.

4.4 Welche Maßnahmen und Vereinbarungen zur Datennutzung wurden getroffen?

Teilweise können die Daten frei verfügbar gemacht werden (z. B. Standorte von Rettungsringen). Andere können großzügig intern genutzt werden (z. B. Belegung Feuerwehrezufahrten). Bei dem Tracken von Geldtaschen wird nur bei Verlust auf die Daten zugegriffen. Bei der Umsetzung des Use Cases wurde der Personalrat beteiligt.

4.5 Über welche Informationskanäle und für wen sind die Daten zugänglich?

Aktuell hauptsächlich für Projektbeteiligte. Im Rahmen des Aufbaus eines zentralen Datenmanagements sollen die Daten auch weiteren Gruppen wie unter 4.4 Beschrieben zugänglich gemacht werden.

4.6 Positive und negative Erkenntnisse zur Praxisrelevanz der Use Cases?

Die Use Cases des Projekts können nach Einschätzung der beteiligten Ämter zu einer Verbesserung der Ausgangssituation beitragen und Prozesse effektiver und effizienter gestalten. Für die Umsetzung der Use-Cases waren jedoch teilweise aufgrund ihrer Neuartigkeit (z. B. Monitoring von Rettungszufahrten mit KI-Bildsensoren) höhere Arbeitsaufwände notwendig als bei der Anwendung bereits etablierter Verfahren und Technologien (z. B. für das Sammeln von Trainingsdaten und dem Training des KI-Modells).

Beantwortet durch die Mitarbeitenden des Ordnungsamtes:

1. Wie häufig werden Sie zu blockierten Rettungszufahrten gerufen?

Ca. 300 - 450-mal im Jahr werden wir zu einer blockierten Rettungszufahrt gerufen.

2. Wie gehen Sie in der Regel vor, wenn Sie eine Beschwerde über eine blockierte Rettungszufahrt erhalten?

Rettungszufahrt aufsuchen, prüfen ob Nutzung der Zufahrt noch möglich (Verwarnung), wenn keine Nutzung mehr möglich ist wird das Fahrzeug abgeschleppt.

3. Welche Potenziale sehen Sie beim Einsatz von Kamerasensoren und KI zur Überwachung von Rettungszufahrten?

Bei funktionierender Datenintegration in den Betriebsalltag: schnellere Reaktionsmöglichkeiten.

4. Können die gewonnenen Daten auch anderweitig genutzt werden?

Die Informationen über Ort, Häufigkeit und Dauer von Zufahrtsblockaden können in die Parkraumplanung einfließen.

5. Glauben Sie, dass die öffentlichkeitswirksame Installation der Kamerasensoren eine abschreckende Wirkung auf Falschparker haben könnte?

Auf jeden Fall!

6. Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration der Sensordaten in Ihre bestehenden Prozesse und Systeme?

Die zeitnahe Bearbeitung und Kontrolle eingehender Meldungen über blockierte Rettungszufahrten stellt eine Herausforderung dar, da sie Flexibilität innerhalb der meist fest strukturierten Tagesabläufe erfordert. Dies gilt umso mehr, je mehr Sensoren im Einsatz sind.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

Beantwortet durch die Mitarbeitenden des städtischen Botendienstes:

1. (Wie häufig) sind Sie in Ihrem Arbeitsalltag mit Situationen konfrontiert, in denen Sie sich unsicher oder gar bedroht fühlen?

Keiner der Mitarbeitenden fühlt sich bedroht, allerdings beim Transport der Geldtaschen fühlen sich 3 von 6 MA unsicher. Aufgrund der immer weiter ansteigenden Gewaltbereitschaft der Bürgerinnen und Bürger bleibt beim Geldtransport ein „ungutes“ Gefühl.

2. Wie häufig transportieren Sie wertvolle Gegenstände (z.B. Geldtaschen) und welche Sicherheitsmaßnahmen ergreifen Sie derzeit?

Täglich werden 2 bis 3 Mal Geldtaschen (Handkassenvorschüsse, Getränkeeinnahmen) transportiert. Maßnahmen für mehr Sicherheit:

- Die Geldtaschen werden nicht offensichtlich oben drauf gelegt, sondern in der Postkiste/-tasche verstaut*
- Das Auto wird beim Verlassen immer abgeschlossen*
- Die Mitarbeitenden tragen keine Dienstbekleidung*

3. Welche Potenziale sehen Sie im Einsatz von GPS-Trackern mit Notfallknopf im städtischen Botendienst? Fühlen Sie sich mit Tracker und Notfallknopf sicherer?

2 von 6 MA finden den Notfallknopf gut, die restlichen 4 MA sind noch skeptisch. Ihnen ist allerdings frei gestellt, ob der Notfallknopf im Fahrzeug liegen bleibt oder ob sie diesen mitnehmen. Der Prozess sieht vor, dass das Fahrzeug nur geortet werden kann, wenn der Notfallknopf ausgelöst (gedrückt) wird, aber die 4 MA fühlen sich trotzdem ein wenig überwacht.

4. Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration der Tracker in Ihre bestehenden Prozesse und Systeme?

Die Größe, da wir nur einen kleinen Tresor im „Postraum“ haben und die Strahlung der Geräte.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

Beantwortet durch die Umsetzungspartner und die Stadt Neckarsulm:

1. Begründung für die spezifische Auswahl der Gateways und Sensoren

Die Gateways und Sensoren wurden nach Kosten und Nutzen für die Anwendungsfälle ausgewählt, wobei auch die bisherigen Erfahrungen der Dienstleister berücksichtigt wurden.

2. Angaben zu den Standorten und zur Installation der Gateways und Sensoren

2.1 An wie vielen Standorten wurden stationäre Gateways installiert?

Es wurden fünf Gateways verbaut, eines in jedem auswärtigen Ortsteil und drei Stück in der Kernstadt.

2.2 An wie vielen Standorten wurden wie und wo Bodenfeuchte- und Glättesensoren installiert?

Es wurden 25 Bodenfeuchtesensoren und 11 Glättesensoren installiert. Die Standorte wurden auf Basis verschiedener Faktoren ausgewählt. Grundsätzlich sollten mindestens zwei Messpunkte pro Stadtteil bzw. Ortsteil vorhanden sein, um die Datenqualität und Plausibilität zu gewährleisten. Die Bodenfeuchtesensoren wurden sehr differenziert angebracht, an Kreisverkehren, an neu angelegten Staudenbeeten oder neuen Baumquartieren mit Rigolensystem, in Grünanlagen aber vor allem an Baumscheiben von Straßenbäumen. Die Glättesensoren wurden insbesondere an erfahrungsgemäß glatteisgefährdeten Stellen sowie an Steigungs- und Gefällestrassen eingesetzt.

2.3 Gefährdung der Infrastruktur durch Vandalismus und Witterungseinflüsse

Die Bodenfeuchtesensoren wurden so eingebaut, dass das Kästchen über der Oberfläche liegt, um spätere Feuchtigkeitsschäden zu vermeiden. Je nach den örtlichen Gegebenheiten wurden diese zylindrischen Boxen ungeschützt befestigt oder mit einem übergestülpten KG-Rohr geschützt. Die Glättesensoren wurden komplett an Masten der Straßenbeleuchtung in 4,0 m Höhe montiert und befinden sich somit außerhalb vandalismusgefährdeter Bereiche.

3. Datennutzung

3.1 Welche Daten erfassen die Sensoren genau?

Die Bodenfeuchtesensoren erfassen jeweils zwei Werte der relativen Feuchtigkeit in Vol. %. Jeder Sensor hat zwei Messpunkte, die abhängig von der Bepflanzung in verschiedenen Bodentiefen eingesetzt sind.

Die Winterdienstsensoren messen je Standort drei Werte. Die Bodentemperatur auf der Fahrbahn, die Lufttemperatur in 4,0m Höhe und die relative Luftfeuchtigkeit in 4,0m Höhe.

3.2 Wie werden die Daten klassifiziert (z.B. was sind kritische Grenzwerte)?

Für die Bodenfeuchte werden Schwellen- oder Grenzwerte definiert, die eine Prozessfolge auslösen können. Dabei wird der Welkepunkt als absolute Eingriffsgrenze und die Trockenschwelle als Warngrenze festgelegt. Bei Unterschreitung der Trockenschwelle sowie des Welkepunktes wird die Leitungsspitze informiert und es werden Dienstpläne und

Ausbringmengen vorgeschlagen. Ergänzend wird als Feldkapazität die Bodensättigung genannt, die besagt, dass der Boden kein zusätzliches Wasser mehr aufnehmen kann.

Bei den Winterdienstsensoren werden niedrige Temperaturen in Verbindung mit erhöhter Luftfeuchtigkeit als Ereignis erkannt. Bei Absinken der Bodentemperatur $<1^{\circ}\text{C}$ und gleichzeitigem Anstieg der Luftfeuchtigkeit erfolgt eine Meldung an die Winterdienstverantwortlichen in der Verwaltung und im Bereitschaftsdienst.

3.3 In welchen Situationen bzw. Zeitintervallen erfolgt die Datenübertragung durch die Sensoren?

Bodenfeuchtesensoren senden alle 6 Stunden und Glättesensoren alle 15 Minuten.

3.4 Funktionalität der Datenübertragung und -nutzung

Die Daten werden von den Sensoren über die LoRaWAN-Gateways und die LoRaWAN-Netzwerk-Software an eine IoT-Plattform übermittelt. Von dort werden die Daten an die Visualisierung und die KI weitergeleitet. Die Bodenfeuchtesensoren messen die relative Bodenfeuchte. Ab welchem Wert eine Bewässerung notwendig ist, muss in der Praxis über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Dies hängt sowohl von der Bodenbeschaffenheit als auch von der Baumart ab. Anschließend werden die Daten analysiert, um Muster zu erkennen und genaue Bewässerungspläne zu erstellen. Dies hilft, den Wasserverbrauch zu optimieren und die Gesundheit der Pflanzen zu gewährleisten.

3.5 Erwartete Batterielebensdauer der Sensoren

Laut Hersteller Angaben sollen die Winterdienstsensoren zwischen 4 und 8 Jahren halten. Für die Bodenfeuchtesensoren gibt es keine Herstellerangaben zur Batterielebensdauer. Hier wird ebenfalls von mehreren Jahren ausgegangen.

3.6 Welche Maßnahmen und Vereinbarungen zur Datennutzung wurden getroffen?

Alle Sensordaten sind Eigentum der Stadt Neckarsulm und stehen zur freien Nutzung zur Verfügung. Die Speicherung erfolgt in einem eigenen Mandanten. Ein Zugriff von außen ist somit ohne gezielte Veröffentlichung nicht möglich. Die Daten werden über einen Layer für das städtische GEO-Datenportal zur Verfügung gestellt.

3.7 Über welche Informationskanäle und für wen sind die Daten zugänglich?

Die Daten sind zunächst nur innerhalb der Stadt und für die betreffenden Abteilungen zugänglich, um eigene Prozesse zu optimieren und Kosten einzusparen. Eine Integration der Glättedaten in MobiData BW wird in Kürze erfolgen.

3.8 Positive und negative Erkenntnisse zur Praxisrelevanz der Use Cases

Zum derzeitigen Stand bzw. Nutzung der Daten können keine belastbaren Aussagen zu Zielerreichungen getroffen werden. Wir rechnen mit tatsächlich verwertbaren, sicheren und richtigen Prognosen frühestens in der zweiten Nutzungssaison.

Beantwortet durch die Mitarbeitenden des Bauhofs (Intelligenter Winterdienst):

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

1. Wie wird derzeit im Winterdienst entschieden, wann und wie viel gestreut wird?

Der tatsächliche Räum- und Streudienst wird während den Geschäftszeiten über die Bauhofleitung ausgerufen und außerhalb der Geschäftszeiten werden durch den diensthabenden Bereitschaftsdienstkollegen definierte Kontrollstrecken abgefahren. Bei erkannter Glätte an kritischen Stellen oder gefühlt hohem Glätterisiko wird der Dienst ausgerufen.

Die Streumenge ist grundsätzlich bei 10-15 gr/m². Situativ entscheidet der Fahrer etwas weniger Streugut auszubringen oder auch bis zu 30 gr/m² zu erhöhen.

2. Wie beurteilen Sie die derzeitige Effizienz der Routen- und Streumengenplanung im Winterdienst?

Durch die Lage an mittleren Neckar sind wir grundsätzlich von winterlichen Verhältnissen eher weniger betroffen. Unsere Tätigkeitsfelder verursachen an anderen Handlungen ein vielfach höheres Einsparpotential. Daher war im Bereich Winterdienst der Fokus stärker auf den Sicherheitsaspekt gelegt als auf Wirtschaftlichkeit. Ein großer Schritt wurde erreicht, indem über den Gemeinderat eine Einschränkung der Winterdienststrecken beschlossen wurde und Nebenstraßen ohne Höhenunterschiede nicht mehr befahren werden. Aber nach wie vor werden im Glättefall alle im Plan stehenden Strecken bearbeitet.

3. Welche Potenziale sehen Sie beim Einsatz von Sensoren zur Glättemessung im Winterdienst in Bezug auf Personal, Finanzen und Bürgerschaft? Inwieweit können die Daten in bestehende Prozesse und Strukturen integriert werden?

Mittelfristiges Ziel ist ein vorbeugender Winterdienst begleitet mit situativer Streuung. Dies bedeutet, dass Nachteinsätze reduziert werden sollen. Dies soll dadurch erreicht werden, dass abhängig vom prognostizierten Glätterisiko zu den Tagesarbeitszeiten mit Sole vorgestreut wird. Die nächtlichen Kontrollfahrten sollen reduziert werden und auch die spontanen Nachteinsätze sollen reduziert werden. Die Messung der örtlichen Temperaturen wird die gefühlten Unterschiede der Glätte zwischen Kernstadt und im Außenbereich liegenden Ortsteilen durch objektive Messwerte unterstreichen und herausstellen. Ziel ist es, durch lokale Glätteprognosen eine situative Streuung zu erreichen, bedarfsweise nur einen Teil der Streufahrzeuge in Einsatz zu bringen und ggf. auch innerhalb der Teilorte nicht mehr alle Straßen abzufahren. Sofern diese mittelfristigen Ziele erreicht werden besteht die Möglichkeit das langfristige Ziel der Reduktion der Anzahl an Winterdienstfahrzeugen ebenfalls zu realisieren.

4. Wie schätzen Sie den Nutzen historischer Glättedaten für einen vorausschauenden Winterdienst ein?

Die Einbeziehung historischer Daten sehen wir als elementar wichtig. Dies entspricht quasi dem Kopfwissen der langjährigen Kollegen, auf dessen Erfahrung unser aktuelles Handeln beeinflusst oder auch geprägt wird. Dieses subjektive Quellen sollen durch objektive Messungen und Aufzeichnungen ergänzt und gefestigt werden.

5. Welche Kanäle und Visualisierungsformen für die Kommunikation der Glättedaten halten Sie für am besten geeignet?

Derzeit verfügen wir noch nicht über ein „führendes“ System im Winterdienst. Wir beziehen Daten aus verschiedenen Wetterdiensten und Dienstkollegen vom Landkreis (Straßenmeisterei). Zur Aufzeichnung der durchgeführten Räum- und Streutätigkeiten sollen in der Wintersaison 2024/2025 Tests mit Telematikdienstleistern umgesetzt werden.

Diese Tests ergänzen sich optimal zur Einführung der LoRaWAN Sensorik und Prognose. Die Ausgestaltung der geeignetsten Visualisierung kann erst nach Entscheidung der Fortführung der getesteten Telematik als fester Bestandteil unserer Gesamtstruktur definiert werden.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

6. Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration der Sensordaten in Ihre bestehenden Prozesse und Systeme?

Die Integration und Visualisierung der Sensordaten in GIS stellen für uns gewisse Herausforderungen dar. Dies liegt einerseits daran, dass stadtweit mit zwei verschiedenen GIS Systemen gearbeitet wird und im Bereich Q-GIS, wo wir diese Anwendung integrieren wollen, eine personeller Engpass besteht. Dieser Engpass geht zurück auf eine zeitlich beschränkte Abwesenheit durch Mutterschutz und durch Wissensverlust durch den Austritt eines Hauptakteurs in Q-GIS.

7. Welche Bedenken haben Sie bei der Installation der Sensoren (z.B. Vandalismus, Beschädigung)?

Der Punkt von willkürlich und vorsätzlich herbeigeführten Beschädigungen beschäftigen uns bei jeder Art von Stadtmobiliar und technischen Einrichtungen im öffentlichen Raum. Insofern wurde dies auch bei der Installation der Sensoren bedacht. Die Glättesensoren wurden vollständig an Masten der Straßenbeleuchtung in 4,0m Höhe montiert und befinden sich somit außerhalb der von Vandalismus gefährdeten Bereichen.

Beantwortet durch die Mitarbeitenden des Bauhofs (Intelligente Bewässerung):

1. Wie entscheiden Sie aktuell über die Bewässerungsmengen und -zeitpunkte?

Es werden ausschließlich Jungbäume, Sportanlage mit Naturrasen sowie teilweise Zierbeete und Pflanzkübel bewässert. Die Sportanlagen und Zierbeete werden über Bewässerungssysteme zeitlich gesteuert und automatisiert bewässert. Die Wassermenge ist von der Laufzeit abhängig und wird unabhängig von Niederschlägen durchgängig über die Sommermonate betrieben.

Die Baumbewässerung und das Gießen von Kübelpflanzen erfolgt über die Sommerzeit von Mai bis September, wobei der Beginn und Ende von den Wetter- und Bodenverhältnissen abhängt und auch von April bis Oktober andauern kann. Die Ausbringung erfolgt mittels Gießfahrzeugen in unterschiedlichen Größenklassen. Die Gießfahrzeuge haben zugeordnete Gebiete oder Pflanzpunkte und fahren diese nacheinander an. Nachdem alle Gießpunkte abgefahren wurden beginnt die nächste Gießroute in gleicher Reihenfolge. Die Wassermenge je Gießpunkt steuert das Fahrpersonal vor Ort. Hierbei ist hauptsächlich Personal mit fachlicher Ausbildung im gärtnerischen Bereich eingesetzt.

2. Wie beurteilen Sie die derzeitige Effizienz der Bewässerung öffentlicher Grünflächen?

Dies ist nicht beantwortbar. Stand heute haben wir noch nicht einmal eine Möglichkeit die Effektivität unserer Bewässerung zu messen. Wir haben sehr genau die Wasserverbräuche der automatischen Bewässerungsanlagen, aber die Aufwände für den Unterhalt der Bewässerungsanlagen könnte nur händisch ausgewertet werden. Bei der Bewässerung mittels Gießfahrzeugen verhält es sich genau umgekehrt. Dort kennen wir den Aufwand von Personal und Maschine sehr genau, haben jedoch lediglich eine mittelbare Größe zum Wasserverbrauch.

Was bei allen Gießtätigkeiten fehlt ist eine grundsätzliche zeitnahe Messbarkeit des Gießerfolges. So wären lokal überhöhten Gießvolumen gepaart mit Unterversorgungen an

anderen Stellen. Die Auswirkungen unserer Gießtätigkeiten erkennen wir nur mittel- und langfristig an Trockenschäden an Bäumen, Schäden durch Wurzelnässe und Fäulnis.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

3. Welche Potenziale sehen Sie beim Einsatz von Sensoren zur Bodenfeuchtemessung? Inwieweit können die Daten in bestehende Prozesse und Strukturen integriert werden?

Eine zeitnahe Messung der Bodenfeuchte kann eine direkte Korrelation zur Vitalität der Pflanze herstellen. Unser Schema der nacheinander abzufahrenden Reihenfolge und Gebiete könnte durch flexible Gießrouten abgelöst werden. Gebiete in denen die Bodenfeuchte am geringsten ist können mit Priorität versorgt werden. Die Bodenfeuchte hängt neben der oberflächlichen Wasserzufuhr auch an Faktoren der Bodenschichten, der Beschaffenheit der Erde und Gesteine sowie möglichen Quellverläufen. Wir sehen enormes Potential zum nachhaltigen Erhalt unserer Jungpflanzungen. In den Folgejahren soll das Messnetz weiter verdichtet werden um insbesondere bei neu angelegten Baumquartieren direkt bei der Pflanzung die Sensorik mit verbaut wird. Eine möglicherweise später folgende Erfassung der Gießmengen könnte diese in Bezug zu den Bodenfeuchtwerte bringen und optimierter Gießmengen errechnen. In Bereichen mit Bewässerungsanlagen gibt es Vermutungen, dass es eine gewisse Reduktion des Gießvolumens ohne negative Beeinflussung der Vegetation umgesetzt werden könnte

4. Welches Wissen zur gezielten Nutzung der Bodenfeuchtedaten ist bei Ihnen bereits vorhanden, welches muss noch erarbeitet werden?

Mit allgemeinen Bodenfeuchtwerte gehen wir um und die Bewässerungsrichtlinien der FLL sind bekannt. Regelmäßig werden Seminare oder Schulungen besucht sowie wissenschaftliche Untersuchungen über die Fachpresse verfolgt.

5. Wie schätzen Sie den Nutzen historischer Bodenfeuchtedaten für die vorausschauende Bewässerung ein?

Ausschlaggebend für unser Handeln sind die Momentanwerte oder auch die „Spitzenwerte“ wenn darum geht, welche Arten und Gattungen neu gepflanzt werden sollen. Historische Werte sind sicherlich sehr interessant um die Abnahme der Bodenfeuchte in Abhängigkeit der Wetterprognose für geplante Gießvorgänge sicherer zu machen. Aber auch um Szenarien abbilden zu können, welche Neupflanzungen an spezifischen Standorten sinnvoll sind und welcher Gießaufwand betrieben werden muss im Sinne einer Folgekostenberechnung.

6. In welcher Form soll die Funktionalität der datenbasierten Bewässerung evaluiert werden?

In weiteren Ausbaustufen ist es denkbar, die rein zeitliche Steuerung der Bewässerungsanlagen durch ein intelligentes über KI gesteuertes Bewässerungsmodul abzulösen. Neben der Bodenfeuchtigkeit könnten auch erwartete Niederschläge dort Beachtung finden.

7. Welche Kanäle und Visualisierungsformen für die Kommunikation der Bodenfeuchtedaten halten Sie für am besten geeignet?

Derzeit verfügen wir noch nicht über ein „führendes“ System im Grünbereich. Im Q-GIS wurden und werden die Einzelflächen kategorisiert und Pflegeklassen zugewiesen. Die Visualisierung in Q-GIS wird angestrebt. Parallel werden Softwareprodukte angeschaut, welche die Steuerung und Auswertung des Auftragsmanagement bis zur Abrechnung erfüllen und unsere GIS Datenbasis hierzu mit verwenden. Ob die Daten dann in GIS direkt geführt werden oder in einer anderen Datenbank und über ein GIS Layer visuell dargestellt werden kann derzeit nicht beantwortet werden.

8. Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration der Sensordaten in Ihre bestehenden Prozesse und Systeme?

Die bestehenden Prozesse zu ändern ist keine besondere Herausforderung, da diese kaum systemischen Zwängen unterliegen und über Bekanntmachung der Prozessänderung aktiv werden. Die Integration in bestehende Systeme ist jedoch eine Kernaufgabe, da wir an verschiedenen Projekten zur Digitalisierung parallel arbeiten. Des weiteren ist vorgesehen, die Gießfahrzeuge über Telematikeinheiten an ein Gießsteuerungssystem angeschlossen werden sollen. Dies dient der variablen Steuerung der Wassermenge je Gießpunkt und erfasst die tatsächlich ausgebrachte Wassermenge.

9. Welche Bedenken haben Sie bei der Installation der Sensoren (z.B. Vandalismus, Beschädigung)?

Der Punkt von willkürlich und vorsätzlich herbeigeführten Beschädigungen beschäftigen uns bei jeder Art von Stadtmobiliar und technischen Einrichtungen im öffentlichen Raum. Insofern wurde dies auch bei der Installation der Sensoren bedacht. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten wurden bei den Bodenfeuchtesensoren die zylindrischen Kästchen ungeschützt befestigt oder mit einem überstülpten KG Rohr geschützt.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

2.3 Neulingen und Ölbronn-Dürn

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

Beantwortet durch die Umsetzungspartner:

1. Angaben zu den Standorten und zur Installation der Gateways und Sensoren

1.1 An wie vielen Standorten wurden stationäre Gateways installiert und wie hoch ist die Netzabdeckung?

Die Gateways wurden an drei geeigneten Stellen der jeweiligen Gemeinden installiert. Die Netzabdeckung scheint gut zu sein. Für eine valide Aussage müssen allerdings Sensoren flächendeckend ausgerollt sein. Dies ist nicht vorgesehen. Die Abdeckung für die Use-Cases ist gut.

1.2 An wie vielen Standorten wurden Sensoren wie und wo installiert?

Die Sensoren werden an passenden Standorten in den Kommunen ausgebracht. Hierbei vertrauen wir auf die lokale Expertise der beiden Kommunen.

1.3 Gefährdung der Infrastruktur durch Vandalismus und Witterungseinflüsse

Die Gateways sind gegen Witterungseinflüsse (IP68) geschützt. Vandalismusgefahr können wir bei den Gateways bei den aktuellen Standorten nicht sehen. Die Sensorik für die Unterstützung des Winterdienstes ist potenziell ‚exposed‘, aber in ausreichender Höhe (über 2m) aufgestellt. Die Witterungseinflüsse auf die Sensorik ist vernachlässigbar, da die Technik für den Außeneinsatz konzipiert wurde. Allerdings muss dies die kommenden Monate und Jahre evaluiert werden und kann vorab nicht bewertet werden.

2. Datennutzung

2.1 Welche Daten erfassen die Sensoren genau:

*Winterdienstsensor: (Umgebungs-/Boden)Temperatur, Luftfeuchtigkeit
Flusspegelsensor: Abstand von Sensor zu Oberfläche
Bodenfeuchtesensor: Bodenfeuchte und -temperatur, Leitfähigkeit*

2.2 Wie werden die Daten klassifiziert (z.B. was sind kritische Grenzwerte)?

Beim Winterdienst sind Temperaturen zwischen 3 und beliebigen Minusgraden kritisch. Daraufhin kann ein Alarm ausgespielt werden via Signal Messenger, SMS oder E-Mail.

2.3 In welchen Situationen bzw. Zeitintervallen erfolgt die Datenübertragung durch die Sensoren?

Die Zeitabstände können zwischen 15 Minuten und einem Tag variieren. Je kürzer die Zeitabstände, desto geringer ist die Lebensdauer der Batterie. Hier gilt es gemeinsam mit Ölbronn-Dürn und Neulingen einen idealen Zeitabstand definieren, der eine gute Balance zwischen Batterielebensdauer und Sinnhaftigkeit der Anwendung darstellt. So machen kurze Zeitabstände beim Winterdienst v.a. in der kalten Jahreszeit Sinn, wohingegen im Sommer diese Abstände eher länger sein dürfen.

2.4 Funktionalität der Datenübermittlung in der Praxis?

Die Datenübermittlung funktioniert bislang fehlerfrei

2.5 Erwartete Batterielebensdauer der Sensoren

Je nach Einstellung des Zeitintervalls, Witterungsbedingungen und Messgrößen rechnen wir mit Laufzeiten zwischen zwei und fünf Jahren. Im Einzelfall hoffen wir auf Laufzeiten über sieben Jahren bei einfachen und großzügig dimensionierten Sensoren (bspw. Temperatursensoren). Bei der Unterstützung des Winterdienstes gibt es bislang noch keine Erfahrungswerte.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

2.6 Welche Maßnahmen und Vereinbarungen zur Datennutzung wurden getroffen?

Die Daten werden von der Kommune für ein bzw. zwei Dashboard genutzt. Zudem wurde mit MobiData BW ein Entwurf zur Datenverwendung entwickelt, der aktuell in der Prüfung ist.

2.7 Über welche Informationskanäle und für wen sind die Daten zugänglich?

Die Daten können als Public Dashboard im WWW abgerufen werden. Die Veröffentlichung kann auch per iFrame/ Einspielung auf die Webseite perspektivisch erfolgen. Somit sind die Daten potenziell für alle BürgerInnen als auch Nutzende der Webseite bzw. WWW zugänglich.

2.8 Positive und negative Erkenntnisse zur Praxisrelevanz der Use Cases

Bislang kann hierzu noch keine valide Aussage gemacht werden. Wir sehen, dass die Anwendungsfälle funktionieren, allerdings ist auf Grund der Kürze der Zeitschiene noch keine Bewertung vorzunehmen.

Beantwortet durch Umsetzungspartner und Stadt Ulm:

1. Begründung für die spezifische Auswahl des Trackers

Bei der Marktrecherche erfüllte der Tracker unsere Anforderungen hinsichtlich Größe, Preis/Leistung und Konfigurationsmöglichkeiten am besten.

2. Anzahl der erworbenen Tracker

50

3. Welche Akteure erhalten in welchem Umfang Zugang zu den GPS-Trackern?

Dieser Punkt ist noch offen. Bisher werden die Tracker von citysens für die Stadt Ulm verwahrt. Es ist vorgesehen, dass in Zukunft verschiedene verwaltungsinterne und -externe Stellen, die die Tracker in ihrer täglichen Arbeit nutzen, einen unmittelbaren Zugriff erhalten.

4. Welche Daten erfassen die Tracker?

GPS-Koordinaten und bei Bedarf, wie der integrierte Kontaktknopf gedrückt wurde (kurz, lang, zweimal), um verschiedene Aktionen zu differenzieren.

5. Wie erfolgt die Datenübertragung?

Sobald ein konkreter Einsatz mit den Trackern beginnt, wird das entsprechende GPS-Modul aktiviert. Ist dies geschehen, sucht es nach Satelliten zur Positionsbestimmung und sendet die Positionsdaten zusammen mit weiteren Daten wie z.B. dem Batteriestatus in dieser Konfiguration alle 90 Sekunden über die LoRaWAN-Gateways an das Backend.

6. Datenübertragung während des Einstein-Marathons

Die Daten wurden direkt in den Datenhub der Stadt Ulm geschickt und sind dort für die Öffentlichkeit einsehbar: <https://datenhub.ulm.de/ckan/dataset/einsteinmarathon-2024>.

Parallel wurden sie zur Visualisierung in unsere WebApplication geschickt: <https://citysens.app/p/einstein-marathon/>

7. Erwartete Batterielebensdauer der Tracker

Die Batterielebensdauer hängt stark von der Konfiguration ab. Am meisten Energie benötigt das GPS. Deshalb ist GPS nicht dauerhaft eingeschaltet. Mit eingeschaltetem GPS und einer Übertragung alle 90 Sekunden sind nach unseren Erfahrungen ca. 10-12 Tage möglich. Dies ist jedoch für keinen unserer aktuellen Anwendungsfälle notwendig. Während des Einstein Marathons haben wir die Tracker ca. 12 Stunden mit GPS und einer 90-sekündigen Übertragung betrieben.

8. Funktionalität der Datenübertragung in der Praxis

Die Daten wurden größtenteils zuverlässig übertragen. Hin und wieder sind jedoch Datenpakete nicht angekommen. Die Sendefrequenz von 90 Sekunden war für einige Situationen nicht ausreichend, kann aber bei den Trackern nicht noch kürzer eingestellt werden. Eine Option für die weitere Nutzung wäre, die Tracker so zu konfigurieren, dass sie nicht nach einem bestimmten Zeitintervall, sondern bei Bewegung (aktueller und

vorheriger GPS-Wert liegen mindestens x Meter auseinander) senden. Alternativ kann auch der Einsatz einer anderen Funktechnologie in Betracht gezogen werden, bei der sich kürzere Sendeintervalle einstellen lassen.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

9. Bewertung der Praxistauglichkeit

Sowohl die Leitstelle der Einsatzkräfte als auch der für die Straßensperren zuständige Sicherheitsdienst gaben trotz der genannten Schwierigkeiten bei der Datenübertragung insgesamt ein positives Feedback und sind offen, die Tracker in Zukunft bei verschiedenen Anlässen weiter zu testen und einzusetzen. Die korrekte Handhabung der Tracker erfordert nur eine kurze Einweisung.

10. In welchem Rahmen sollen die Tracker künftig eingesetzt werden?

Die Tracker sollen allgemeingültig für Straßensperren und Großveranstaltungen eingesetzt werden. Beispiele sind das Donaufest, Schwörmontag, Tagesbaustellen aufgrund von Baumaßnahmen und ganz konkret die Demonstrationen im November anlässlich des AfD Parteitages in Ulm.

Beantwortet vom Sicherheitsdienst, der für die Straßensperren bei städtischen Veranstaltungen wie dem Einstein-Marathon zuständig ist:

1. Wie wird die Öffentlichkeit derzeit über Straßensperren informiert?

Großbaustellen mit entsprechenden Straßensperren werden über die Presse, sozialen Medien und die Homepage der Stadt Ulm angekündigt. Klein- und Tagesbaustellen werden über die Homepage der Stadt Ulm angekündigt. Die Aufhebung erfolgt ebenfalls über die Homepage, allerdings oft mit zeitlicher Verzögerung.

2. Wie beurteilen Sie die Idee, GPS-Tracker zur Visualisierung von Straßensperren einzusetzen? Welche Potenziale sehen Sie?

Die bereits erprobte Möglichkeit, Abbauteams mit den Trackern auszustatten, um dann entsprechende Straßensperrengruppen in einem definierten Gebiet aufheben zu können, ist sehr gut. Die Idee, die Tracker direkt am Sperrmaterial zu befestigen, muss noch genauer definiert werden. Derzeit halten wir das Tragen der Tracker durch die Teams selbst für am vielversprechendsten, da hier die Teams auch entsprechend gesteuert werden können. Wir sehen Einsatzgebiete vor allem bei Tages- und Kurzbaustellen aber auch bei Langzeitbaustellen.

3. Auf welche Herausforderungen sind Sie beim Einsatz der GPS-Tracker in der Praxis gestoßen und haben Sie dafür geeignete Lösungsvorschläge?

Die Sendezeiten während des Einstein-Marathons waren in einigen Situationen zu lang und sollten zugunsten der Praxistauglichkeit der Tracker auf ein Minimum reduziert werden. Auch sollten die Einsatzabläufe noch klarer definiert und auftretende GPS-Abweichungen besser eingeordnet werden. Wenn die Tracker in Zukunft bei anderen Veranstaltungen eingesetzt werden, sollte es immer eine Kontrollinstanz geben, die den Beteiligten eine Rückmeldung geben kann, ob die Datenübertragung und -anzeige funktioniert. Bei einer Veranstaltung wie dem Einstein-Marathon kann diese Aufgabe von der übergeordneten Leitstelle übernommen werden.

4. In welchen Fällen außerhalb von städtischen Großveranstaltungen kann der Einsatz der Tracker sinnvoll sein?

Grundsätzlich können die Tracker bei allen Straßensperren eingesetzt werden. Darüber hinaus könnten sie auch für das Asset-Tracking von öffentlichem Mobiliar oder zur Teamsteuerung bei Großveranstaltungen eingesetzt werden.

Hintergrundinformationen und
Praxiserkenntnisse

5. Welche Informationskanäle zur Bewerbung und Darstellung der Karte sind Ihrer Meinung nach am besten geeignet, um die breite Öffentlichkeit zu erreichen?

Alle Möglichkeiten, die für wenig Geld machbar sind. Es sollte mindestens eine Landing Page und/oder App für das Tracking bzw. die Ergebnisse daraus geben.

Beantwortet vom Rettungsdienst:

1. Welchen Herausforderungen sehen Sie sich derzeit bei der Koordination von Rettungseinsätzen bei Großveranstaltungen gegenüber?

Die Absprachen vor der Veranstaltung sind in der Regel sehr aufwändig und konzentrieren sich darauf, mit dem Veranstalter geeignete Standorte festzulegen und die Einsatzteams einzuteilen. Im Gedränge einen Notarzt immer schnellstmöglich an die richtige Stelle zu dirigieren, ist nie ganz einfach. Aber hier gab es in der Vergangenheit keine größeren Probleme.

2. Wie beurteilen Sie die Idee, GPS-Tracker mit Notfallknopf bei städtischen Großveranstaltungen einzusetzen?

Der Einsatz der Tracker bietet den Vorteil, dass durch die Darstellung der Standorte der Einsatzkräfte auf einer Karte auf einen Großteil der Kommunikation im Einsatz verzichtet werden kann. Die Einsatzkräfte können sich somit besser auf die Beobachtung des Veranstaltungsorts und die Bewältigung von Notfällen konzentrieren. Im Vergleich zum Praxistest während des Einstein-Marathons sollten jedoch bei zukünftigen Einsätzen der Tracker die Einsatzabläufe mit mehr Vorlauf präzisiert und getestet werden. Dann können die Tracker aus Rettungsdienstsicht bei jeder (Groß-)Veranstaltung sehr hilfreich sein.

3. Was halten Sie davon, die GPS-Daten nicht nur den Einsatzkräften, sondern auch der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen, damit Veranstaltungsbesuchende Einsatzkräfte im Notfall gezielt aufsuchen bzw. herlotsen können

Bei einer öffentlichen Anzeige der GPS-Daten der mobilen Einsatzteams befürchten wir, dass Gaffer angelockt werden. Die Anzeige nur der stationären Posten kann wiederum sinnvoll sein.

4. Auf welche Herausforderungen sind Sie beim Einsatz der GPS-Tracker in der Praxis gestoßen und haben Sie dafür geeignete Lösungsvorschläge

Schwierigkeiten ergaben sich zum einen hinsichtlich der Genauigkeit der Daten. So wichen die GPS-Daten teilweise deutlich von der tatsächlichen Position ab. Ein weiteres damit verbundenes Problem lag in der Übertragungsgeschwindigkeit. Größere Bewegungen wurden teilweise erst mit Verzögerung sichtbar, was eine effiziente Koordination erschwerte.

3 Begleitforschung

3.1 Friedrichshafen

3.1.1 Weitere Anwendungsmöglichkeiten: Mobile Gateways

Im Rahmen der Begleitforschung wurden drei weitere Anwendungsmöglichkeiten für die mobilen Gateways identifiziert, die neben den ursprünglich angedachten Anwendungsmöglichkeiten zukünftig in Betracht gezogen werden können.

- Gezielte Bereitstellung bzw. Erhöhung von Netzkapazität und -redundanz in bestimmten Stadtbereichen bei Großveranstaltungen und Baustellen, wenn dort temporär Sensoren wie Personenzähler, GPS-Tracker, Lärm- und Glättemesssensoren eingesetzt werden sollen.
- Temporäre Netzverbindungen für wichtige IoT-Geräte und Datenströme, z. B. im Kontext von Sicherheitssystemen, bei vollständigem oder teilweisem Ausfall des stationären Netzes, z. B. durch Naturkatastrophen und Stromausfälle.
- Fahrzeuge mit mobilen Gateways können zusätzlich mit mobilen Umweltsensoren ausgestattet werden und Einblicke in Umweltparameter außerhalb des stationär mit LoRaWAN abgedeckten Stadtgebietes geben, z.B. um dort den Streueinsatz im Winter datenbasiert zu optimieren.

3.2 Neckarsulm, Neulingen und Ölbronn-Dürren

3.2.1 Wissenschaftliche Grundlagen und Handlungsempfehlungen für den Use Case »Intelligente Bewässerung«

Die folgenden Informationen wurden zusammengestellt, um die an den »Smart City LoRaWAN Integration Labs@bw« beteiligten Kommunen Neckarsulm, Neulingen und Ölbronn-Dürren (und jede andere Kommune) bei der Implementierung von Bodenfeuchtesensoren zur Realisierung einer intelligenten Bewässerung öffentlicher Grünflächen zu unterstützen. Sie basieren auf wissenschaftlichen Literaturquellen, Interviews mit Vertretenden von Kommunen, die eine intelligente Bewässerung mit LoRaWAN bereits erprobt und eingeführt haben, Sensorherstellern und Fraunhofer-internen Expertinnen und Experten.

3.2.1.1 LoRaWAN-Bodenfeuchtesensoren

Bodenfeuchtesensoren messen typischerweise einen oder mehrere der folgenden Werte, die Auskunft über die Bodenfeuchte und den Bewässerungsbedarf geben:

- Dielektrische Permittivität
- Bodentemperatur
- Saturation
- Volumetrischer Wassergehalt
- Elektrische Leitfähigkeit

In Neckarsulm wird der Bodenfeuchtesensor LW-5 des Sensorherstellers Tinovi eingesetzt, der im Gegensatz zu den meisten anderen Sensoren alle fünf Werte gleichzeitig misst. Für jeden Wert gibt es verschiedene Messbereiche, Toleranzen und Auflösungen.

Die Toleranz gibt an, wie weit die Messwerte vom wahren Wert abweichen dürfen, ohne als ungenau zu gelten. Die Auflösung beschreibt die kleinste Änderung einer Messgröße, die der Sensor erkennen und anzeigen kann. (tinovi, o.D.)

Begleitforschung

Im Folgenden werden die 5 Werte näher erläutert und die zugehörigen Messbereiche, Toleranzen und Auflösungen des Tinovi LW5 angegeben.

1. Dielektrische Permittivität (ϵ):

Die dielektrische Permittivität beschreibt die Fähigkeit eines Mediums, elektrische Felder zu speichern, und dient zur Bestimmung des Wassergehalts, da Wasser eine deutlich höhere Permittivität aufweist als trockener Boden oder Luft.

- Messbereich: 1 (Luft) bis 80 (Wasser)
- Auflösung: 0,1 ϵ
- Toleranz: 5%.

2. Bodentemperatur ($^{\circ}\text{C}$):

- Messbereich: -20°C bis 70°C
- Auflösung: 0,1 $^{\circ}\text{C}$
- Toleranz: 3%

3. Grad der Wassersättigung im Boden (Saturation):

- Messbereich: 0–100%
- Auflösung: 0,1%
- Toleranz: 8%

4. Volumetrischer Wassergehalt (VWC):

Der volumetrische Wassergehalt gibt an, wie viel Wasser (Volumen) pro Volumeneinheit Boden vorhanden ist.

Berechnung aus Dielektrischer Permittivität (ϵ)

Formel: $\text{VWC} = 0.002974 \cdot \epsilon^2 + 0.07424 \cdot \epsilon - 1.295$

5. Elektrische Leitfähigkeit (EC):

Die elektrische Leitfähigkeit misst, wie gut der Boden elektrischen Strom leitet. Dies hängt von der Salzkonzentration, dem Wassergehalt und der Temperatur ab und ist ein Indikator für die Nährstoffkonzentration und die Bodenqualität.

- Messbereich: 0...800 mS/m
- Auflösung: 0,1 mS/m
- Toleranz: 20% im Bereich 0...300 mS/m; Bei höheren Leitfähigkeiten (>300 mS/m) nimmt Genauigkeit ab.

(tinovi, o.D.)

3.2.1.2 Sensorinstallation

Bodenfeuchtesensoren sollten in einer Tiefe vergraben werden, die den Hauptwurzelraum der zu überwachenden Pflanzen abdeckt. Der Hauptwurzelraum ist der Tiefenbereich des überwiegenden Anteils der Pflanzenwurzeln im Boden. Die optimale Vergrabungstiefe in Abhängigkeit von der Lage des Hauptwurzelraumes variiert je nach Pflanzenart und Bodenbeschaffenheit und sollte daher mit Fachleuten abgeklärt werden. (Mittelbach et al., 2012; Ramson et al., 2021)

Es besteht die Möglichkeit, nur den eigentlichen Sensor oder das gesamte Gerät, d.h. auch die weiteren Komponenten, wie z.B. die Sendeantenne, zu vergraben. Die zweite Variante kann sinnvoll sein, wenn am Installationsort die Gefahr von Vandalismus besteht, hat aber den Nachteil einer höheren Anfälligkeit für elektronische Wasserschäden und einer schlechteren Empfangsqualität. Der eigentliche Sensor wird in der Regel horizontal in die ungestörte Seitenwand des Loches eingeführt. (Hossain et al., 2022)

Um eine Abschätzung der maximal möglichen Entfernung eines vergrabenen Bodenfeuchtesensors zu einem LoRaWAN-Gateway zu erhalten, können Einzelpunktmessungen durchgeführt werden, bei denen ein mobiles LoRaWAN-Gateway so weit wie möglich nach Norden, Süden, Osten und Westen bewegt wird, bis keine Datenpakete mehr empfangen werden. (Hossain et al., 2022)

Um den Sensor und die anderen Gerätekomponten nach dem Vergraben vor Witterungseinflüssen zu schützen und eine Beeinträchtigung der Messung durch Partikel zu vermeiden, können u.a. folgende Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

- Verwendung von Schutzgehäusen
- Verwendung von Geotextilien
- Beschichtung der Sensorelemente
- Verwendung von Kanalgrundrohren

Nach der physischen Installation muss der Sensor in das LoRaWAN-Netzwerk integriert und die Datenerfassung auf regelmäßige Übertragung eingestellt werden. Die Übertragungsfrequenz sollte sich an der ungefähr erforderlichen Bewässerungsintensität in Abhängigkeit von Boden- und Pflanzenart orientieren. (Mittelbach et al., 2012; Ramson et al., 2021)

3.2.1.3 Grundlagen der Bodenfeuchteanalyse

Zwei wichtige Fachbegriffe im Zusammenhang mit der Bodenfeuchte sind »Feldkapazität« und »Welkepunkt«.

- Feldkapazität: bezeichnet die maximale Wassermenge, die ein Boden nach einem Starkregen oder einer Bewässerung speichern kann, ohne dass es zu einer weiteren Versickerung kommt.
- Welkepunkt: der Punkt, an dem Pflanzen nicht mehr genügend Wasser aus dem Boden aufnehmen können, um ihren Wasserbedarf zu decken.

Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD) weisen verschiedene Bodenarten folgende unterschiedliche kritische Feuchtwerte (volumetrischer Wassergehalt) auf:

- Sand: Feldkapazität ca. 20 Vol.-%, Welkepunkt ca. 3 Vol.-%
- Schluff: Feldkapazität ca. 39 Vol.-%, Welkepunkt ca. 11 Vol.-%
- Lehm: Feldkapazität ca. 35 Vol.-%, Welkepunkt ca. 17 Vol.-%
- Ton: Feldkapazität ca. 41 Vol.-%, Welkepunkt ca. 29 Vol.-%

Zwischen Feldkapazität und Welkepunkt liegt die Trockenschwelle. Sie bezeichnet den kritischen Punkt der Bodenfeuchte, unterhalb dessen Pflanzen anfangen, unter Trockenstress zu leiden, und ist damit ein wichtiger Anhaltspunkt dafür, wann eine Grünfläche bewässert werden sollte. Je nach Bodenart sind folgende Trockenschwellen typisch:

- Sand: Trockenschwelle ca. 5–10 Vol.-%
- Schluff: Trockenschwelle ca. 15–20 Vol.-%
- Lehm: Trockenschwelle ca. 20–25 Vol.-%
- Ton: Trockenschwelle ca. 30–35 Vol.-%

Bei der Festlegung der Trockenschwelle einer mit Bodenfeuchtesensoren überwachten Grünfläche ist neben der Bodenart auch der individuelle Wasserbedarf der darauf wachsenden Pflanzenarten zu berücksichtigen. Verschiedene Pflanzenarten können einen sehr unterschiedlichen Wasserbedarf haben, der von Faktoren wie Wurzeltiefe, Wachstumsphase und Transpirationsrate beeinflusst wird.

Flachwurzeln Pflanzen sind in der Regel auf regelmäßige Bewässerung angewiesen, da sie nur die Feuchtigkeit aus den oberen Bodenschichten nutzen können, die insbesondere bei sonnigen und windigen Verhältnissen relativ schnell austrocknen. Im Gegensatz dazu können tiefwurzeln Pflanzen wie einige Sträucher und Bäume Wasser aus tieferen, oft feuchteren Bodenschichten ziehen. Diese Fähigkeit ermöglicht es ihnen, auch längere Trockenperioden ohne regelmäßige oberflächliche Bewässerung zu überstehen. Die Festlegung der Trockenschwelle sollte solche unterschiedlichen Anforderungen berücksichtigen, um eine effiziente und pflanzenschonende Bewässerung zu gewährleisten. Außerdem benötigen Pflanzen in der Blüte- und Wachstumsphase in der Regel mehr Wasser als in der Ruhephase, so dass die Trockenschwelle in dieser Zeit höher anzusetzen ist.

Auf dieser Grundlage sind in Zusammenarbeit mit entsprechenden Fachleuten erste Schwellenwerte zu definieren, bei denen die Bewässerung einer Grünfläche jeweils gestartet bzw. gestoppt wird. Teilweise stellen auch die Sensorhersteller speziell auf ihre Geräte abgestimmte Feuchtebereiche zur Verfügung, die berücksichtigt werden können. Danach ist eine kontinuierliche Bewertung und Anpassung der gewählten Schwellenwerte an die tatsächlichen Bodenverhältnisse und Sensorgenauigkeiten erforderlich. Insbesondere ist zu prüfen, wie lange die Bodenfeuchte nach der Bewässerung im optimalen Bereich bleibt. Regelmäßige Feuchteschwankungen können ein Hinweis darauf sein, wie gut der Boden Wasser speichert und wie viel zusätzliches Wasser benötigt wird.

(Hillel, 1982; Kohnke & Franzmeier, 1995; Borgmann & Sternberg, 2023; Campbell, o.D.)

3.2.1.4 Beispielhafte Ableitung von Bewässerungsmaßnahmen

Aus den Feldkapazitäts- und Welkepunktwerten sowie dem typischen Wasserbedarf verschiedener Baumarten lässt sich eine beispielhafte, grobe Bewässerungsstrategie für unterschiedliche Bodentypen ableiten:

1. Sandiger Boden: trocknet schnell aus und erfordert häufigere Bewässerung mit geringeren Mengen.

- Feldkapazität: ca. 20 Vol.-%
- Trockenschwelle: ca. 10 Vol.-%
- Welkepunkt: ca. 3 Vol.-%

Bewässerung am Beispiel der Kiefer (Tiefwurzler): Bewässerungsbeginn bei ca. 10 Vol.-% und Bewässerungsende bei Erreichen der Feldkapazität (ca. 20 Vol.-%).

Begleitforschung

2. Schluffiger Boden: mittlere Wasserspeicherkapazität, weniger häufige Bewässerung erforderlich.

- Feldkapazität: ca. 39 Vol.-%
- Trockenschwelle: ca. 20 Vol.-%
- Welkepunkt: ca. 11 Vol.-%

Bewässerung am Beispiel Ahorn (mittlere Wurzeltiefe): Bewässerungsbeginn, wenn der VWC auf die Trockenschwelle von ca. 20 Vol.-% fällt und Bewässerungsende kurz vor Erreichen der Feldkapazität (ca. 37 Vol.-%).

3. Lehmiger Boden: gute Wasserspeicherung, daher seltenere, aber ausreichende Bewässerung.

- Feldkapazität: ca. 35 Vol.-%
- Trockenschwelle: ca. 25 Vol.-%
- Welkepunkt: ca. 17 Vol.-%

Bewässerung am Beispiel der Birke (Flachwurzler): Bewässerungsbeginn kurz vor der Trockenschwelle von ca. 25 Vol.-% und Bewässerungsende kurz vor Erreichen der Feldkapazität (ca. 33 Vol.-%).

4. Toniger Boden: speichert das meiste Wasser, aber ein großer Teil davon ist für Pflanzen schwer verfügbar. Seltener, aber großzügiger bewässern.

- Feldkapazität: ca. 41 Vol.-%
- Trockenschwelle: ca. 35 Vol.-%
- Welkepunkt: ca. 29 Vol.-%

Bewässerung am Beispiel der Esche (Tiefwurzler): Bewässerungsbeginn bei Erreichen der Trockenheitsschwelle von ca. 33-35 % und Bewässerungsende bei Erreichen der Feldkapazität (ca. 41 %).

(Kohnke & Franzmeier, 1995; Taiz, 2010; Scheberl et al., 2019; Meter Group, o.D.)

3.2.1.5 Maßnahmen zur Evaluierung der datengestützten Bewässerung

Die Kommunen (, die zu ihren praktischen Erfahrungen mit Bodenfeuchtesensoren befragt wurden, haben unter anderem folgende Evaluierungsmaßnahmen durchgeführt:

1. Wöchentliche Visuelle Inspektion (in den ersten Monaten)

Ziel: Frühzeitiges Erkennen von Trockenstress oder Überbewässerung.

Ablauf: Gärtner oder Pflegepersonal begutachten die Flächen einmal pro Woche visuell. Dabei achten sie auf Anzeichen von Trockenstress (z. B. verwelkte Blätter) oder Überwässerung (z. B. Staunässe oder Moosbildung).

Dokumentation: Eine kurze, digitale Dokumentation in Form eines Protokolls oder Fotos wird erstellt, um Trends und Abweichungen zu erfassen.

2. Halbjährliche Begutachtung des Pflanzenzustands und des Bodenprofils

Ziel: Langfristige Bewertung der Pflanzengesundheit und Bodeneigenschaften.

Ablauf: Alle sechs Monate wird eine detaillierte Begutachtung der Pflanzenentwicklung durchgeführt. Dabei wird das Wurzelwachstum, die allgemeine Vitalität und eventuelle Anzeichen von Stress beurteilt. Gleichzeitig wird eine kleine Bodenprobe entnommen, um die Bodentextur und Feuchtigkeit in den Wurzelschichten zu überprüfen.

Dokumentation: Erstellung eines detaillierten Berichts, der die Beobachtungen, Ergebnisse der Bodenanalyse und Empfehlungen für die weitere Pflege zusammenfasst.

3.2.2 Mobile Bodenfeuchtesensoren

In der Landwirtschaft werden mobile Bodenfeuchtesensoren eingesetzt, um die Bodenfeuchte dynamisch und ortsvariabel zu erfassen und damit eine differenzierte Bewässerungssteuerung auch ohne zahlreiche stationäre Sensoren zu ermöglichen. Sie kombinieren Feuchtemessungen mit GPS-gestützten Positionsdaten, so dass die Feuchteverteilung im Boden genau kartiert werden kann. Gerade bei großen Flächen mit sehr unterschiedlichen Bodenverhältnissen besteht ein hohes Potenzial.

Im Zuge der praktischen Umsetzung hat sich die Stadt Neckarsulm entschieden, ab 2025 den Einsatz von mobilen Bodenfeuchtesensoren zu erproben. Dazu sollen mehrere der beschafften tinovi-Bodenfeuchtesensoren mit sogenannten LGT92 LoRaWAN-GPS-Trackern gekoppelt werden. Diese ermöglichen den Anschluss verschiedener Sensoren über Open Source und das Senden von Positionsdaten per Knopfdruck.

Der Einsatz von mobilen Bodenfeuchtesensoren ist in der deutschen Kommunalverwaltung bisher noch unüblich. Neckarsulm möchte herausfinden, inwieweit er zur Kosteneffizienz der LoRaWAN-Bodenfeuchteüberwachung und zur differenzierten Bewässerung heterogener städtischer Grünflächen beitragen kann.

3.3 Ulm

3.3.1 Entwicklungspotenzial: Standardisierte Kartenanwendung

Im Rahmen des Umsetzungsprojektes in Ulm fand während des Einstein-Marathons im September ein Praxistest der beiden konzipierten Use Cases statt. Im Folgenden werden die damit verbundenen Prozesse aus Sicht des Umsetzungspartners citysens beschrieben:

Vor dem Einstein-Marathon wurden die wichtigsten Straßensperren auf einer digitalen Karte eingezeichnet. Am Tag des Marathons wurden diese rot als "gesperrt" markiert. Die Abbauteams erhielten GPS-Tracker, mit denen sie die Straßensperren nach dem physischen Abbau vor Ort per Knopfdruck wieder aus der Karte entfernen konnten. Durch die Einteilung der Straßensperren in Gruppen wurden mehrere Straßensperren gleichzeitig auf der Karte als aufgehoben angezeigt, wenn jeweils eine bestimmte vordefinierte Straßensperre aufgehoben wurde.

Neben den Läufen, Läuferfeldern und den vorhin erwähnten Straßensperren, wurden auch fixe Rettungsstationen, die an den Strecken entlang aufgebaut waren, auf der Karte angezeigt. Zusätzlich bekamen die mobilen Rettungsteams GPS-Tracker. Der jeweilige Standort der mobilen Teams konnte auf einer internen Karte zur besseren Steuerung der Einsätze angezeigt. Zusätzlich wäre es möglich gewesen über eine Konfigurationsoberfläche die mobilen Teams auch auf der öffentlichen Karte anzuzeigen und im Falle eines Einsatzes auch wieder für die Öffentlichkeit auszublenden. Dies wurde jedoch von den Einsatzkräften vorerst abgelehnt.



Abbildung 2: Digitale Kartenanwendung für den Einstein-Marathon (Quelle: citysens, o.D.)

Nach der praktischen Erprobung der Use Cases wurde diskutiert, ob und wie zukünftig eine standardisierte Kartenanwendung zur Verfügung gestellt werden kann, die eine flexible Konfiguration für unterschiedliche Veranstaltungen und weitere Anwendungsszenarien ermöglicht. Darauf aufbauend wurde gemeinsam mit den Projektbeteiligten ein erstes grobes Konzept für eine solche Kartenanwendung erarbeitet:

Die standardisierte Kartenanwendung basiert auf einem GIS-System und wird so weit wie möglich in Echtzeit aktualisiert, um Änderungen schnell sichtbar zu machen. Sie zeigt eine detaillierte Straßendarstellung, die durch zusätzliche (benutzerdefinierte) Layer ergänzt werden kann. Denkbar sind z.B. Layer zur differenzierten Darstellung von:

- Straßensperren (allgemein oder spezifische Kategorien wie Baustellen und Veranstaltungen)
- Umleitungen und Ausweichstrecken
- Standorte von Rettungs- und Sicherheitskräften bei Veranstaltungen

Die Layer erhöhen die Übersichtlichkeit und ermöglichen es den Einsatzkräften und anderen Nutzenden, die Relevanz der Karteninformationen für ihre spezifischen Bedürfnisse schneller zu erkennen. Eine webbasierte Konfigurationsoberfläche ermöglicht die einfache Eingabe neuer Informationen in die verschiedenen Layer. Feste Standorte können durch Eingabe der Standortkoordinaten, mobile Standorte durch Zuordnung zu einem bestimmten Tracker hinterlegt werden. Weitere integrierbare Informationen sind z.B. Dauer und Anlass einer Straßensperre. Darüber hinaus steht eine Benutzer- und Rollenverwaltung mit differenzierten Zugriffsrechten für verschiedene Benutzergruppen (z.B. Einsatzkräfte, Verwaltung, Veranstalter) zur Verfügung. Alle Daten werden in einer zentralen Datenbank gespeichert und können über definierte Zeiträume analysiert werden. Dies hilft der Verwaltung und ihr nahestehenden Akteuren, fundierte Entscheidungen zu treffen und das Verkehrs- und Sicherheitsmanagement kontinuierlich zu verbessern.

3.3.2 Verbreitung der Daten in der Öffentlichkeit

Im Rahmen der Begleitforschung wurden drei mögliche Verbreitungs Kanäle für die Daten der beiden Ulmer Use Cases identifiziert, die über die bereits im Projektkonzept verankerten und teilweise während des Einstein-Marathons erprobten Kanäle hinausgehen. Ihre Nutzung soll dazu beitragen, in Zukunft eine möglichst große Aufmerksamkeit für die Daten in der Öffentlichkeit zu erreichen:

- QR-Codes, die bei städtischen Veranstaltungen z.B. an Straßensperren und Einsatzorten angebracht werden und durch Scannen mit dem Smartphone direkt zu den entsprechenden Informationen in der digitalen Kartenanwendung führen.
- Informationsstände und Workshops zu den Use Cases parallel zu städtischen Veranstaltungen, bei denen sie eingesetzt werden.
- Pressemitteilung der Stadt in Verbindung mit einer gezielten Online- und Printkampagne in verschiedenen lokalen Zeitungen und Zeitschriften.

Begleitforschung

Borgmann, A.; Sternberg, C. (2023). Der Einsatz von Bodenfeuchtigkeitssensoren: Systematische sensorgestützte Baumbewässerung. Stadt und Grün. <https://stadtundgruen.de/artikel/der-einsatz-von-bodenfeuchtigkeitssensoren-systematische-sensorgestuetzte-baumbewaesserung-16986>

Campbell, G. S. (o.D.). Verfügbares Wasser für Pflanzen: Wie bestimme ich die Feldkapazität und den permanenten Verwelkungspunkt? METER Group. <https://metergroup.com/de/measurement-insights/plant-available-water-how-do-i-determine-field-capacity-and-permanent-wilting-point/>

Deutscher Wetterdienst. (o.D.). Erläuterungen zur Bodenfeuchte. https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/basis_bodenfeuchte_doku.html

Hillel, D. (1982). Introduction to Soil Physics. In Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-03052-9>

Hossain, F. F., Messenger, R., Captain, G. L., Ekin, S., Jacob, J. D., Taghvaeian, S. & O'Hara, J. F. (2022). Soil Moisture Monitoring Through UAS-Assisted Internet of Things LoRaWAN Wireless Underground Sensors. IEEE Access, 10, 102107–102118. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3208109>

Kohnke, H.; Franzmeier, D. P. (1995). Soil science simplified.

Meter Group. (o.D.). How to analyze soil moisture data. <https://metergroup.com/measurement-insights/how-to-analyze-soil-moisture-data/>

Mittelbach, H., Lehner, I., Seneviratne, S. I. (2012). Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. Journal Of Hydrology, 430–431, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.041>

Ramson, S. R. J., Leon-Salas, W. D., Brecheisen, Z., Foster, E. J., Johnston, C. T., Schulze, D. G., Filley, T., Rahimi, R., Soto, M. J. C. V., Bolivar, J. A. L. & Malaga, M. P. (2021). A Self-Powered, Real-Time, LORAWAN IoT-Based soil health monitoring system. IEEE Internet Of Things Journal, 8(11), 9278–9293. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3056586>

Taiz, L. (2010). Plant physiology. Internet Archive. https://archive.org/details/plantphysiology0000taiz_o2x1

Tinovi. (o.D.). LW-5 LoRaWAN Soil Moisture, Temperature | Air temperature/humidity | boosted 12v output from battery. <https://tinovi.com/shop/lw-5-lorawan-soil-moisture-temperature-air-temperature-humidity-boosted-12v-output-from-battery/>