Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

JÜLICH FORSCHUNGSZENTRUM

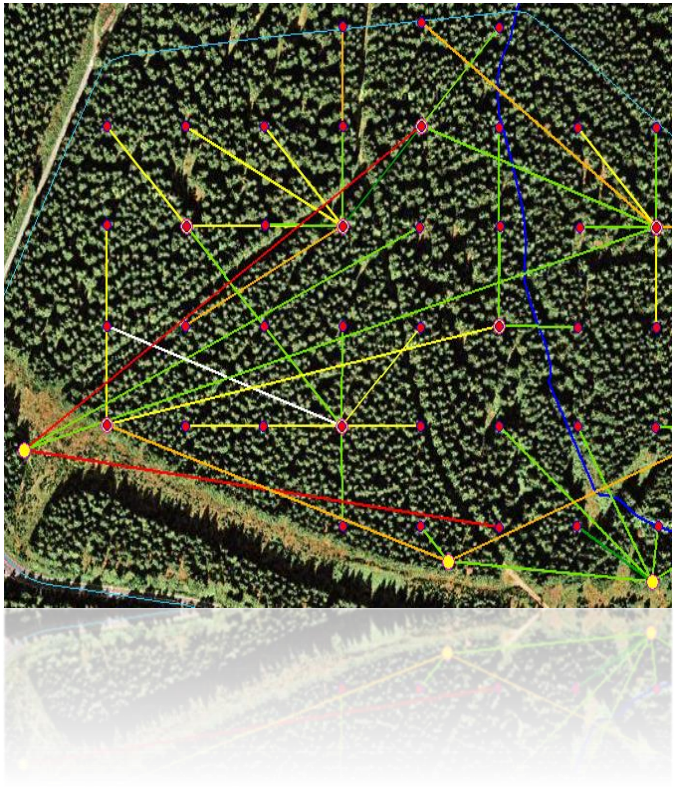
Ad-hoc Sensornetzwerke für die hydrologische Prozessforschung

Heye Bogena, Bernd Schilling und Ansgar Weuthen

Agrosphere Institute, IBG-3, Forschungszentrum Jülich, Germany

Inhalt

- Hintergrund
- Grundlagen Ad-hoc Netzwerke
- Signaldämpfung im Boden
- Sensornetzwerk SoilNet
- Hydrologische Prozessforschung
- Ausblick



DFG Initiative „Forschungsinfrastrukturen“

- Mit diesem Strategiepapier wollen die DFG Senatskommissionen Konzepte und Empfehlungen vorstellen, die der terrestrischen Umweltforschung Deutschlands Zugang zu adäquaten Forschungsinfrastrukturen sichern sollen.

- Langfristige Forschungsinfrastrukturen (Ökosystem Observatorien) sind notwendig, um im Rahmen von Langzeitbeobachtungen negative Entwicklungen unserer Ökosysteme zu erkennen und diesen rechtzeitig entgegenzusteuern oder zumindest gesellschaftlich negative Auswirkungen zu mindern.

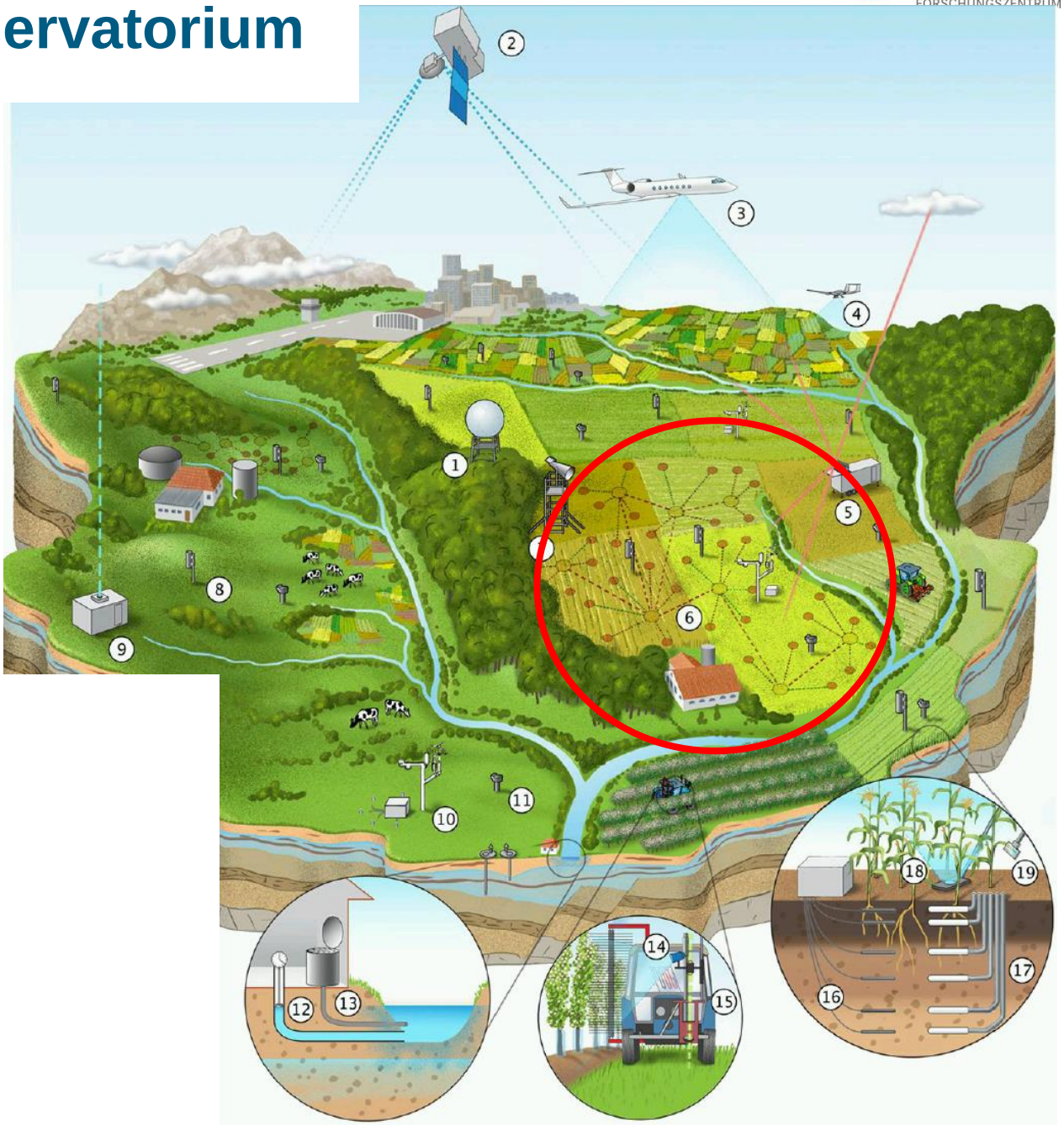
Deutsche Forschungsgemeinschaft

Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz

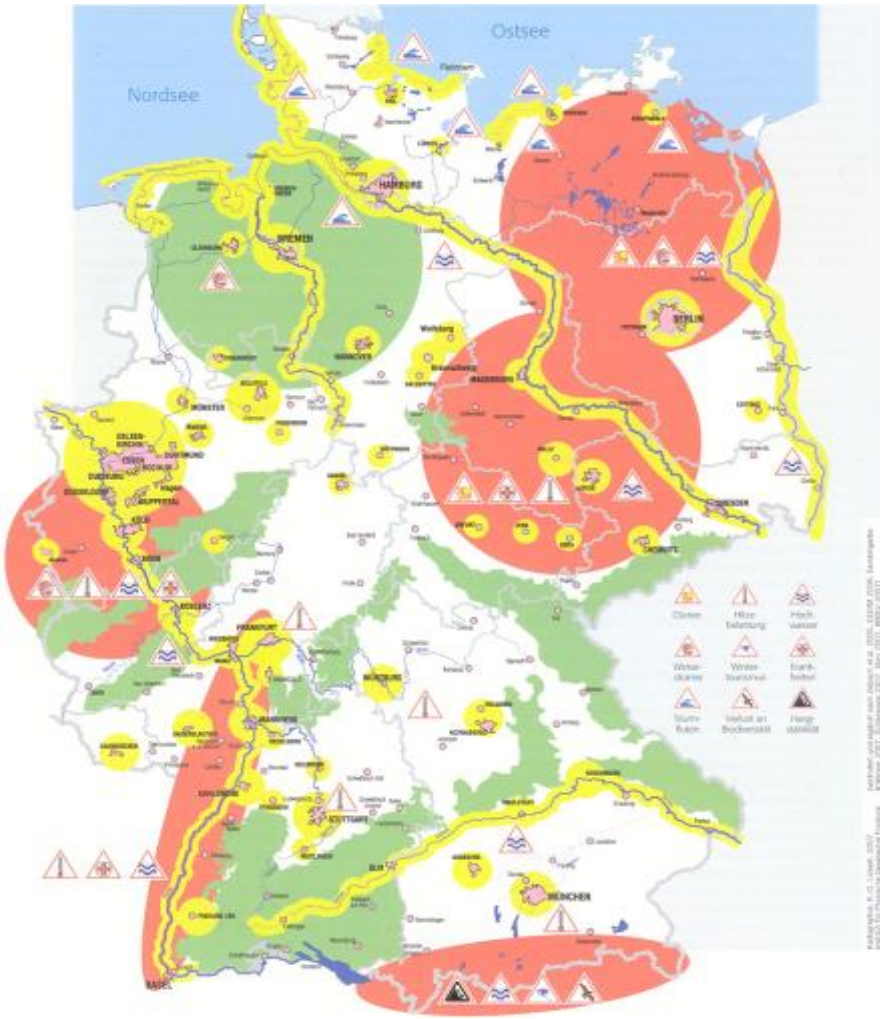
Stategiepapier

Ökosystem Observatorium

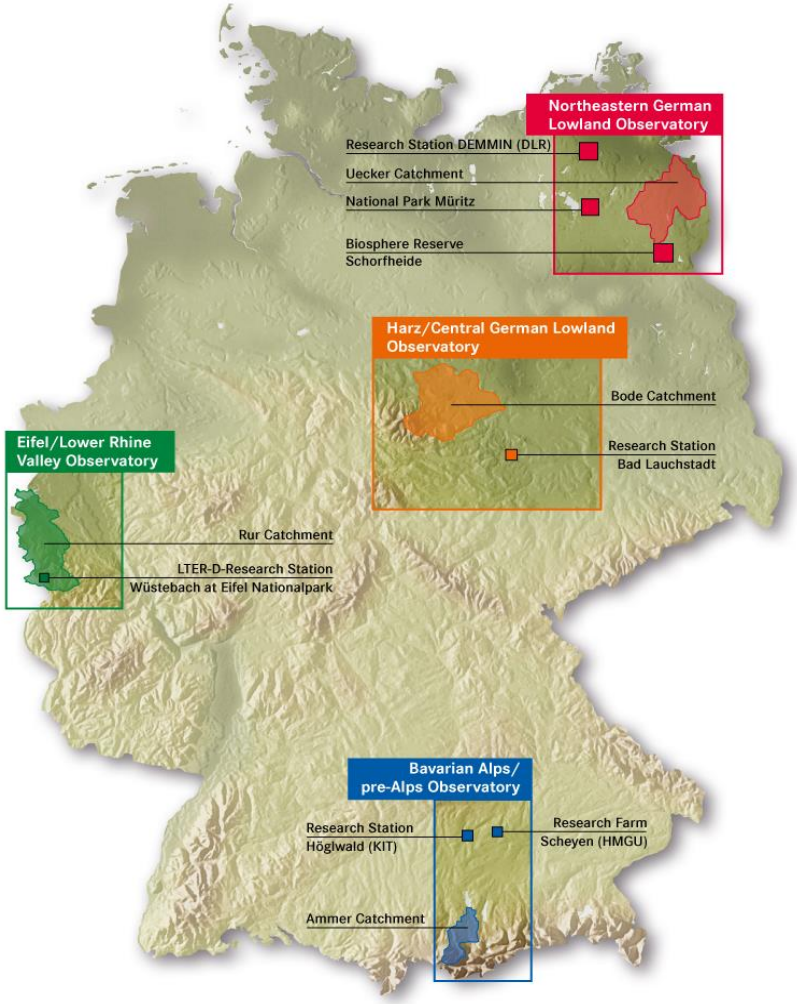
1: Weather radar
2: Satellite sensing
3: Airplane sensing
4: Drone sensing
5: Lidar
6: Ad-hoc sensor network
7: Radiometer
8: Deposition sampler
9: Atmospheric profiler
10: Eddy covariance tower
11: Groundwater station
12: Runoff gauging station
13: Automatic sampler
14: Optical sensor
15: Position sensor
16: Soil moisture sensor
17: Tensiometer
18: LAI sensor
19: Gas exchange sensor
18: LAI sensor



Die TERENO Initiative in Deutschland



Source: R. Glaser 2008: Klimageschichte Mitteleuropas – 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen mit Prognosen für das 21. Jahrhundert.



Network of Ökosystem Observatorien
Budget: ~20 Mio. €
Start: 2008

Definitionen

Sensornetz:

„Ein Sensornetz (von engl. wireless sensor network) ist ein Rechnernetz von Sensorknoten, winzigen („Staubkorn“) bis relativ großen („Schuhkarton“) per Funk kommunizierenden Computern, die entweder in einem infrastruktur-basierten (Basisstationen) oder in einem sich selbst organisierenden Ad-hoc-Netz zusammenarbeiten, um ihre Umgebung mittels Sensoren abzufragen und die Information weiterzuleiten.“

Ad-hoc-Netz

„Ein Ad-hoc-Netz (lateinisch ad hoc, sinngemäß „für diesen Augenblick gemacht“) ist ein Funknetz, das zwei oder mehr Endgeräte zu einem vermaschten Netz verbindet. Netze, die sich selbständig aufbauen und konfigurieren, nennt man auch mobile Ad-hoc-Netze (englisch mobile ad hoc network, MANet) oder Mesh-Netze (engl. mesh [mɛʃ] „Masche“ oder „Netz“).“

Quelle: Wikipedia

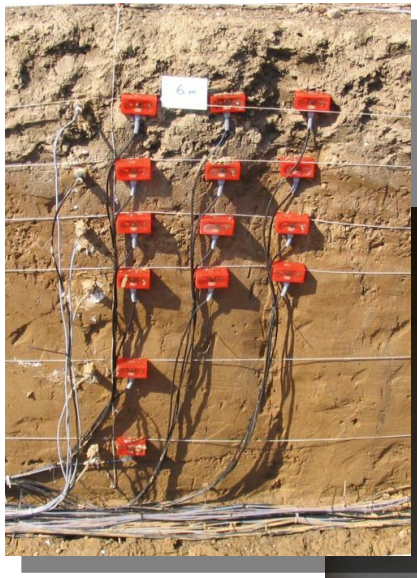
Paradigmenwechsel in der Umweltforschung

Eine Hauptlimitation in der Umweltforschung ist das Fehlen von regionalen Messdaten in hoher raumzeitlicher Auflösung

Sensornetzwerke versus „klassischer“ Messsysteme

Vorteile

- Preiswert -> hohe Anzahl an Sensoren möglich
- Keine Verkabelung
- Flexible Instrumentierung
- Geringer Stromverbrauch
- Gebietsabdeckung
- Datenübertragung in Echtzeit
- Zentrale Kontrolle (z.B. adaptive Messfrequenz)

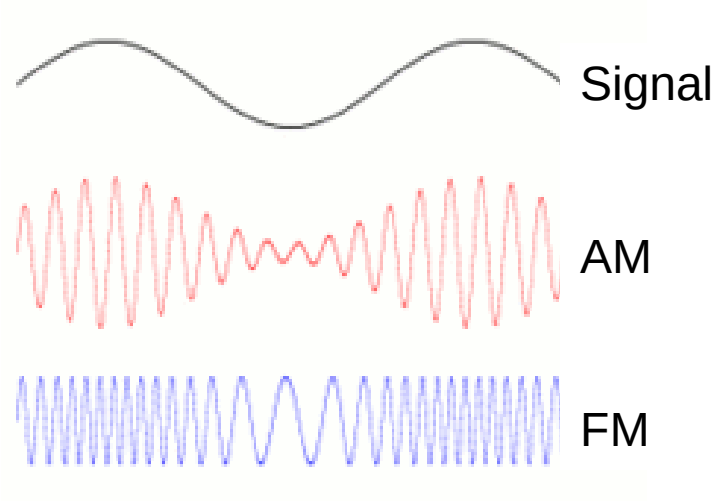


10-100K€

<1K€ “je Knoten”

Funktechnik

- Funktechnik ist ein Begriff für die Methode, Signale aller Art mit Hilfe modulierter elektromagnetischer Wellen im Radiofrequenzbereich (Radiowellen: 10 cm bis 100 km) drahtlos zu übertragen.
- Die Existenz von Radiowellen wurden 1864 von James Clerk Maxwell theoretisch und 1888 von Heinrich Hertz experimentell bestätigt.
- Eine elektromagnetische Welle wird mittels Modulation durch ein Nachrichtensignal gezielt verändert.



Dezibel

- In der Funktechnik werden Leistungspegel (L_P) in Dezibel angegeben
- dB (Dezibel) beschreibt das Verhältnis zweier Leistungspegel

$$L_P(dB) = 10log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

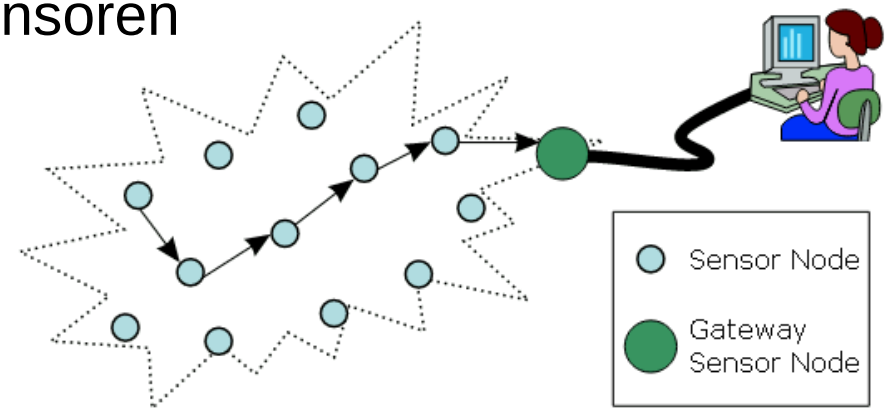
- dBm (Dezibel Milliwatt) nimmt Bezug auf eine definierte Leistung

$$L_P(dB_m) = 10log_{10}\left(\frac{P}{1\ mW}\right)$$

- 1 mW entspricht 0 dBm, Werte über 1 mW ergeben positive dBm-Werte, Werte unter 1 mW negative dBm-Werte

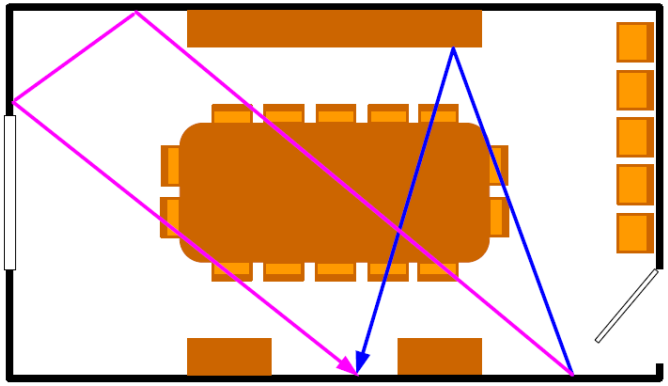
Herausforderungen an Ad-hoc Funknetzwerken

- Störanfälligkeit und Begrenzung der Datenübertragung
- Energiemanagement (Minimierung Batteriewechsel)
- Komplexität der Anwendung
- Standardisierung (Gewährleistung von Interoperationalität)
- Messgenauigkeit (Sensorkalibration)
- Datensicherheit
- Aufwand Datenverarbeitung und –auswertung
- Entwicklung neuartiger Sensoren



Funkübertragung

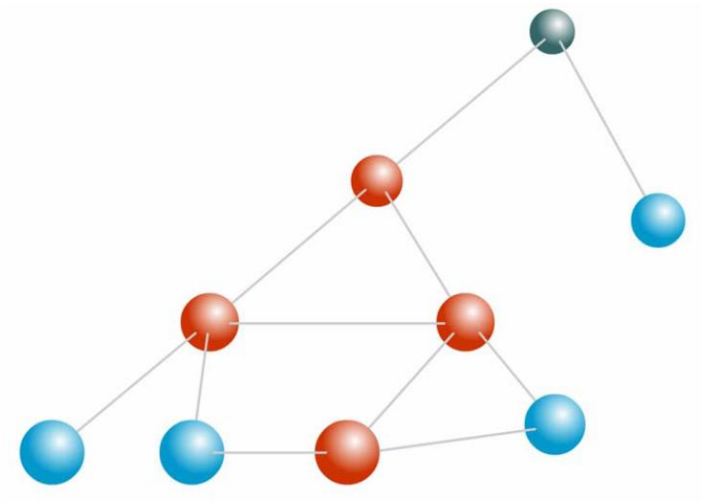
- Funkübertragung ist typischerweise beeinflusst durch Adsorption, Reflexionen, Blockaden und Mehrwegausbreitung des Radiosignals



- Eine Wand lässt zwischen 1/100 bis 1/4 der Signalenergie durch (in Abhängig von Einfallswinkel Wandstärke und Wassergehalt)

Mesh-Netzwerktopologie

- In einer Mesh-Netzwerktopologie kann jeder Netzwerkknoten mit anderen Knoten (Sensorknoten oder Router) in Sendereichweite kommunizieren

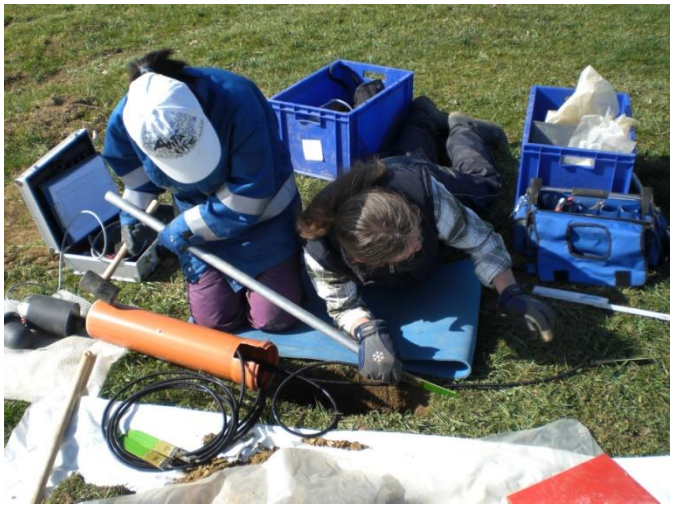


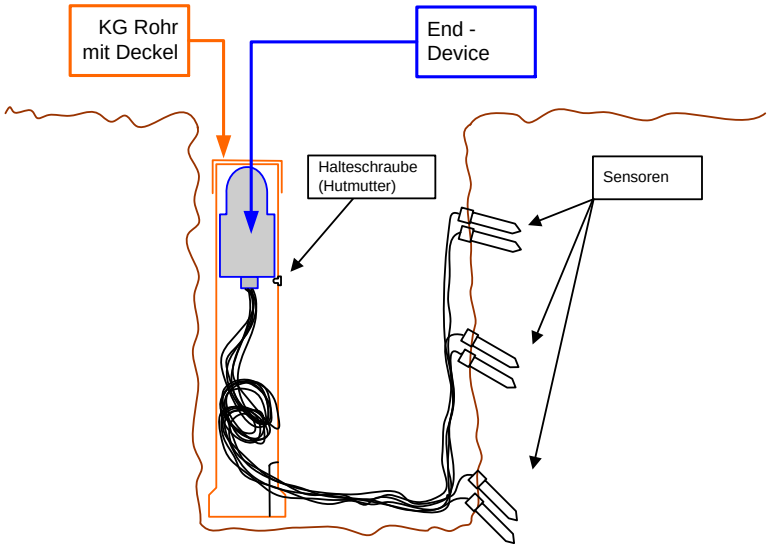
- Alternative Senderouten können gewählten werden, im Falle das es zu einer Signalblockade kommt.

Unterirdisches Funknetzwerk

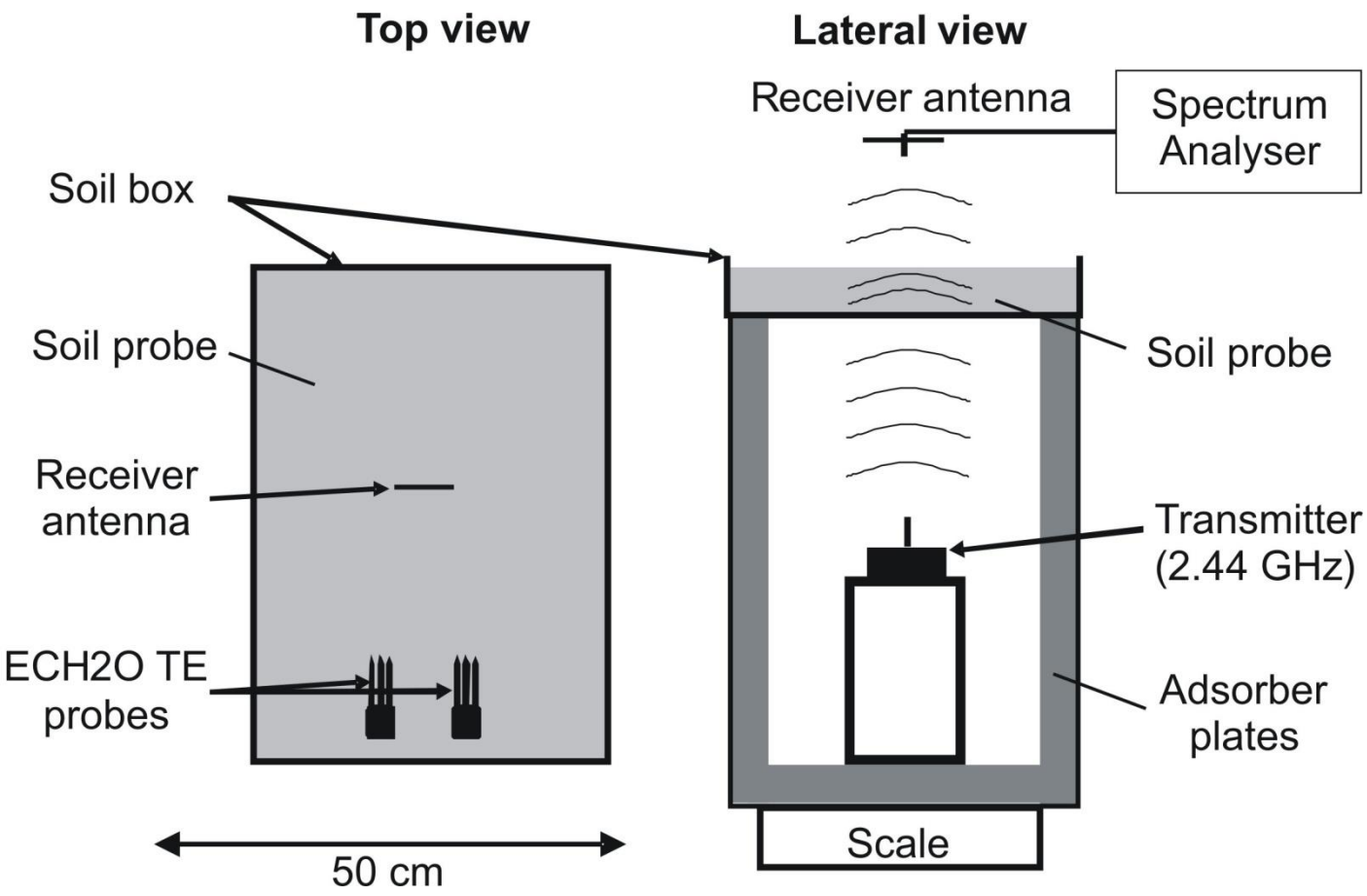
Vorteile:

- Geringe Sichtbarkeit (z.B. in sensitiven Gebieten wie NLP)
- Schutz vor Vandalismus, Tieren etc.
- Schutz vor Temperaturschwankungen
- Keine Behinderung von landwirtschaftlichen Arbeiten





Bestimmung der Signaldämpfung im Boden



Bogena et al., 2009, VZJ

Modell zur Simulation der Signaldämpfung

Dämpfung einer elektromagnetischen Welle im Boden nach Dane und Topp, 2002:

$$\alpha = 8.68 \times \frac{60\pi\left(2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r^{''} + \sigma_b\right)}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r^{'}}{2}\left(1+\sqrt{1+\left(\left(\varepsilon_r^{''}+\frac{\sigma_b}{2\pi f \varepsilon_0}\right)/\varepsilon_r^{'}\right)^2}\right)}}$$

Permittivität des Bodens nach Roth et al., 1990:

$$\varepsilon^*_{bulk} = \left((1-\eta)\sqrt{\varepsilon_{solid}} + \theta\sqrt{\varepsilon^*_{water}} + (\eta-\theta)\right)^2$$

Elektrische Leitfähigkeit des Bodens nach Rhoades et al., 1976:

$$\sigma_b = \sigma_w\left(a\theta^2 + b\theta\right) + \sigma_s$$

Signalverlust durch Reflektion an Grenzflächen (Fresnel Gleichung):

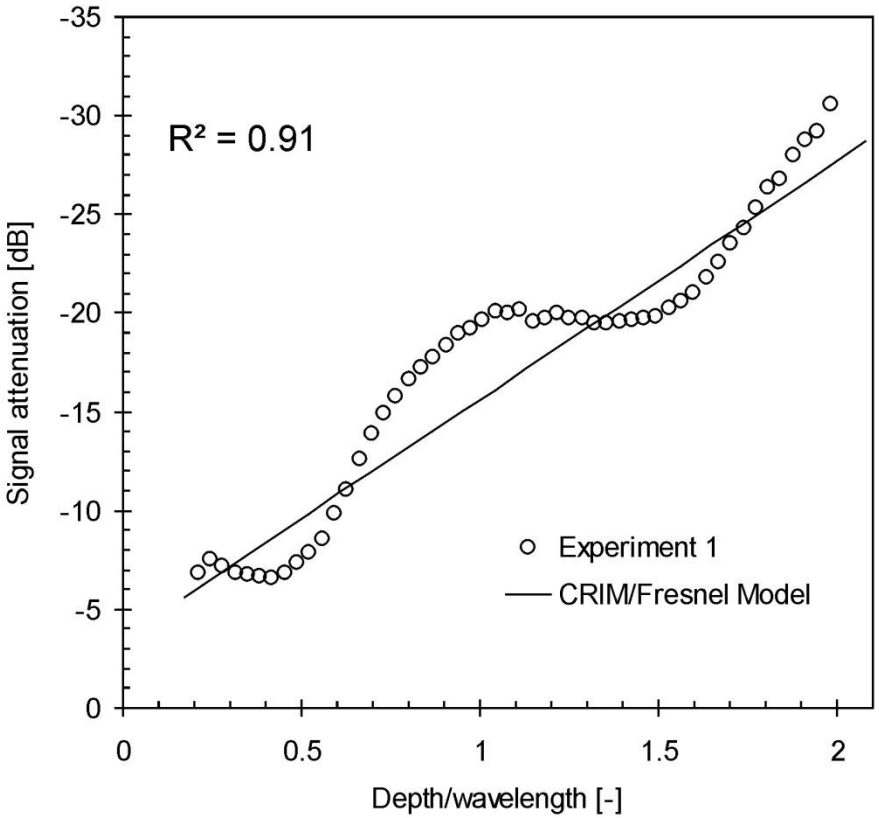
$$R = 1 - T = \left(\frac{1-\sqrt{\varepsilon^*}}{1+\sqrt{\varepsilon^*}}\right)^2 \approx \left(\frac{1-\sqrt{\varepsilon}}{1+\sqrt{\varepsilon}}\right)^2$$

Gesamtdämpfung durch den Boden:

$$A_{tot} = \alpha \cdot d + R$$

Bogena et al., 2009, VZJ

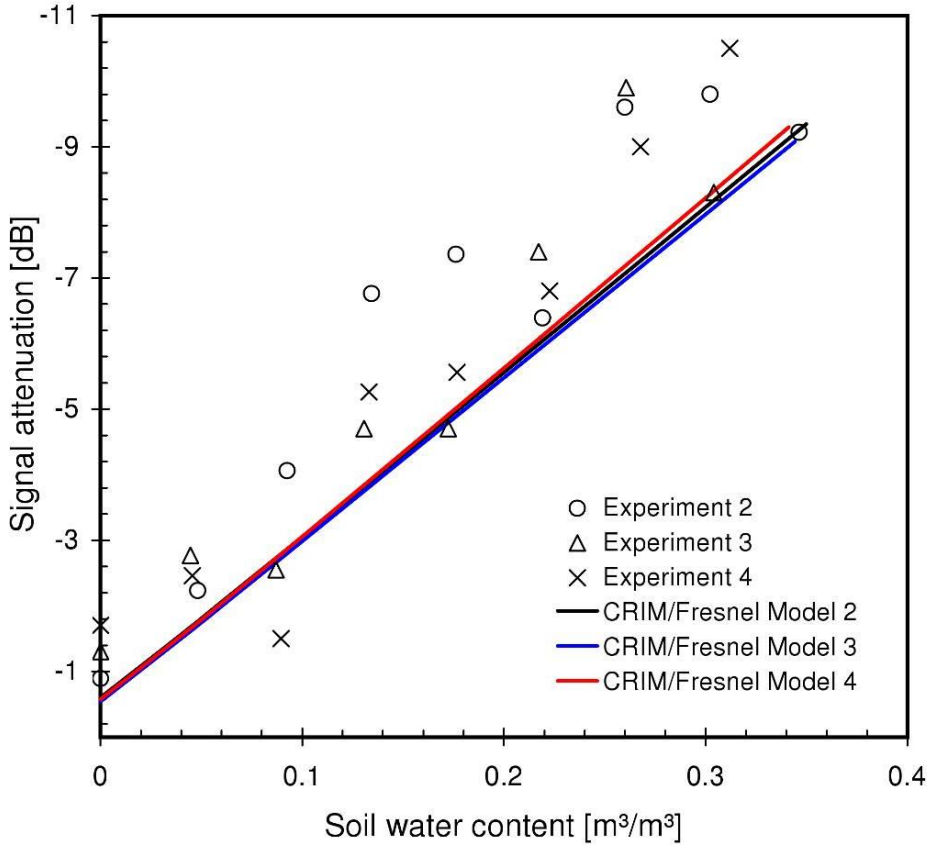
Validierung des Signaldämpfungsmodells



- Signaldämpfungsmessung in einer Flüssigkeit mit bekannten dielektrischen Eigenschaften (ε‘: 18.4)
- Interferenzen der multiplen Reflektionen führen zu über- und Unterschätzungen des Modells
- Diese können mit dem vereinfachten Modellansatz nicht berücksichtigt werden!

Bogena et al., 2009, VZJ

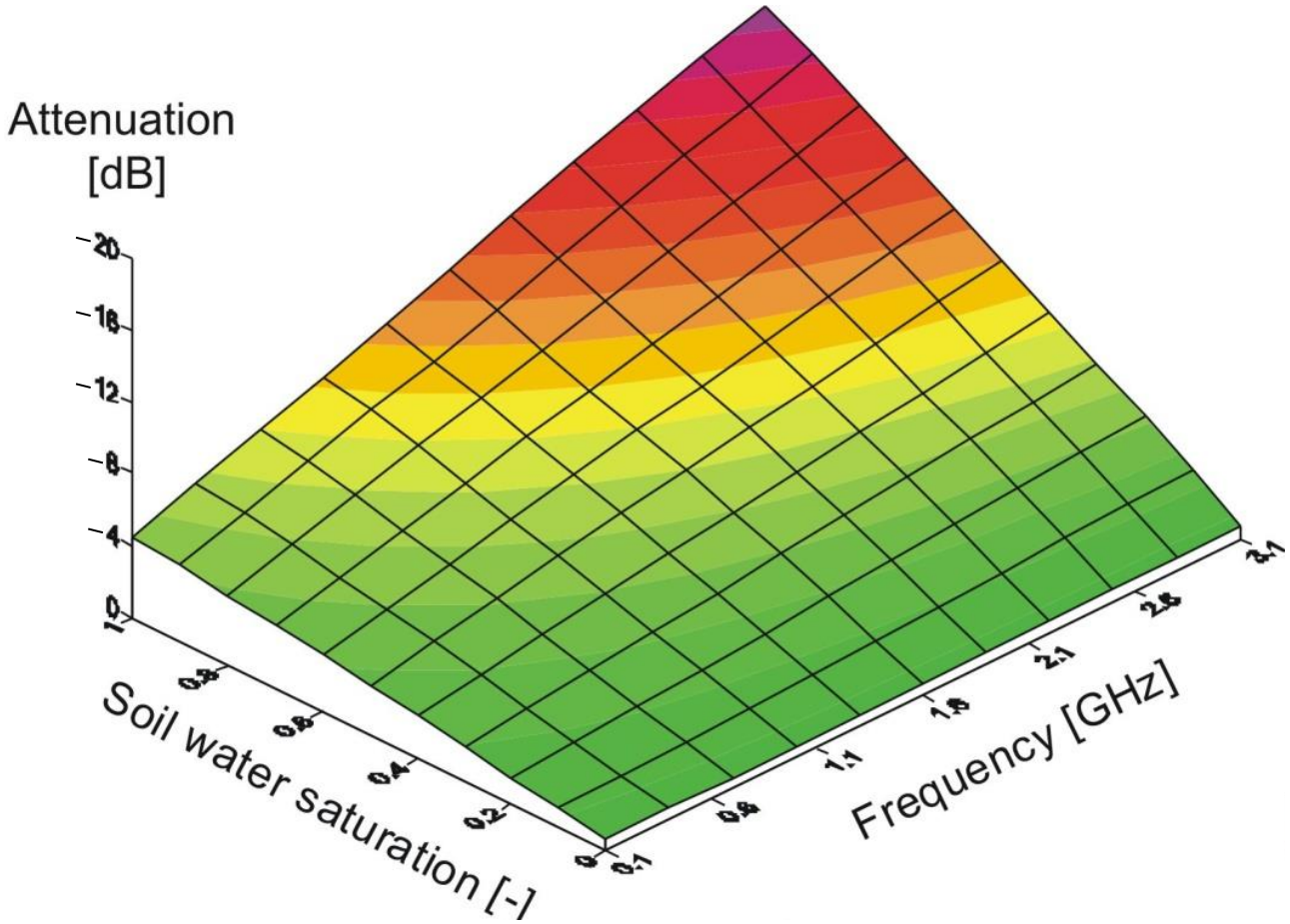
Validierung des Signaldämpfungsmodells



- Signaldämpfung im Sandboden mit steigender Bodenfeuchte
- Signaldämpfung wird vom Modell gut nachgebildet (keine Kalibration!)
- Bodendichte und elektrische Leitfähigkeiten haben nur einen geringen Einfluss

Bogena et al., 2009, VZJ

Abhängigkeit der Signaldämpfung von Frequenz und Bodenfeuchte



Bogena et al., 2009, VZJ

Modellierung der Senderreichweite

Leistungsübertragungsbilanz

$$P_r = P_t + G_r + G_t - L_{sd}$$

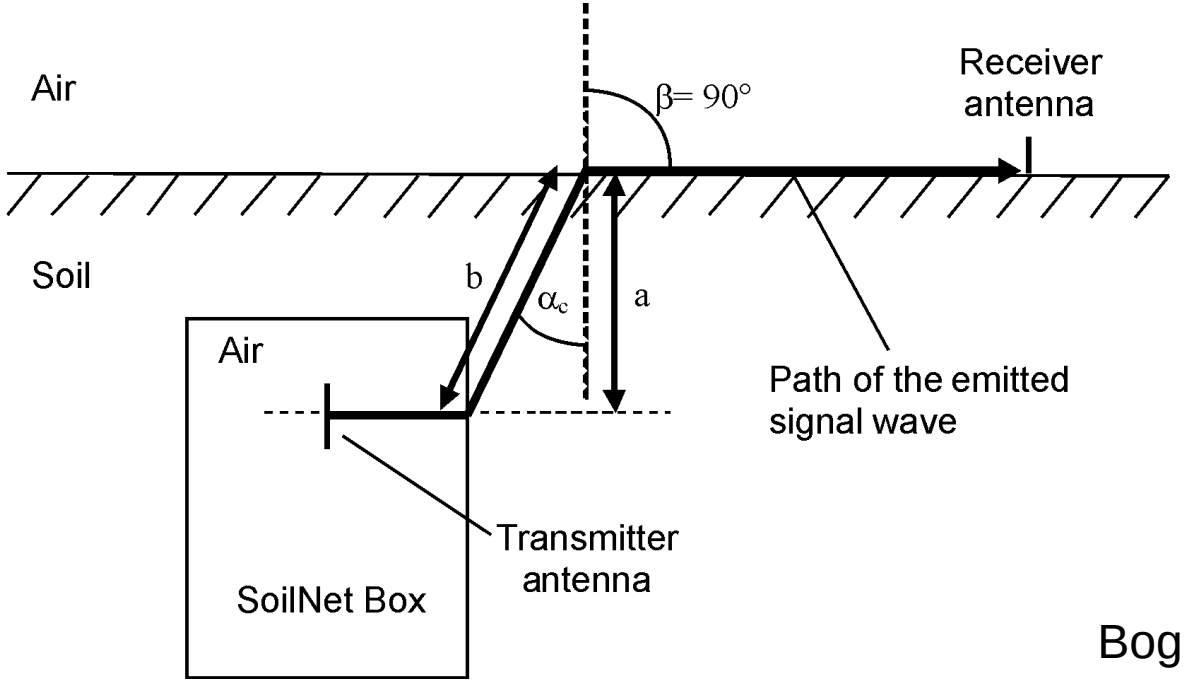
P_r: Leistung am Empfänger

P_t: Leistung am Sender

G_r: Antennengewinn am Empfänger

G_t: Antennengewinn am Sender

L_{sd}: Freiraumdämpfung

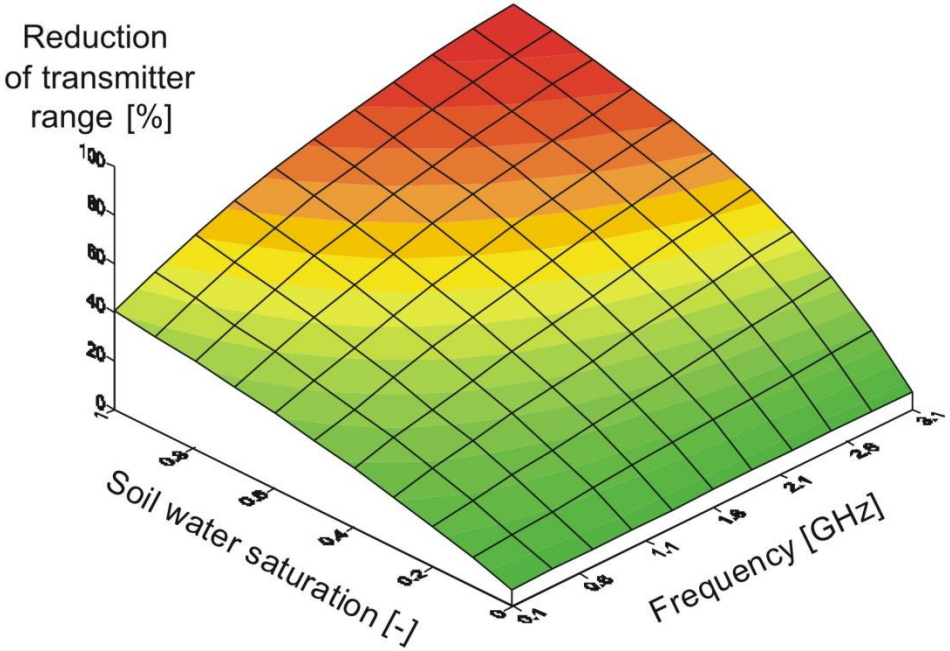


$$a_c = \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\right)$$

$$b = \frac{a}{\cos(a_c)}$$

Bogena et al., 2009, VZJ

Einfluss von Bodenfeuchte und Frequenz auf die Sendereichweite



- Bei hohen Frequenzen und Bodenfeuchten wird aufgrund der Dämpfung im Boden die Reichweite um über 90 % reduziert
- Eine Senderreichweite von ca. 100 m bei Bodentiefen von 5 cm
- Hybride Netzwerkarchitektur notwendig zur Abdeckung großer Gebiete

Bogena et al., 2009, VZJ

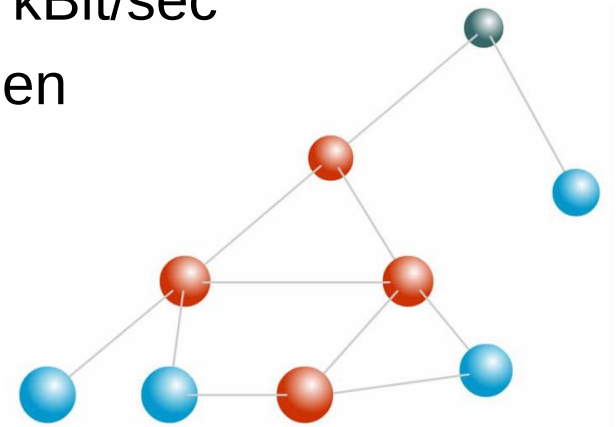
Funksensornetzwerk-Technologien

Drei Gruppen in Abhängigkeit zu der erzielbaren Ausdehnung oder Distanz:

- **WPAN** (Wireless Personal Area Network)
  - Bis zu 10 m Reichweite (z.B. Bluetooth)
- **WLAN** (Wireless Local Area Network)
  - Gebäude bis Gelände (z.B. ZigBee)
- **WWAN** (Wireless Wide Area Network)
  - Regional (z.B. UMTS)

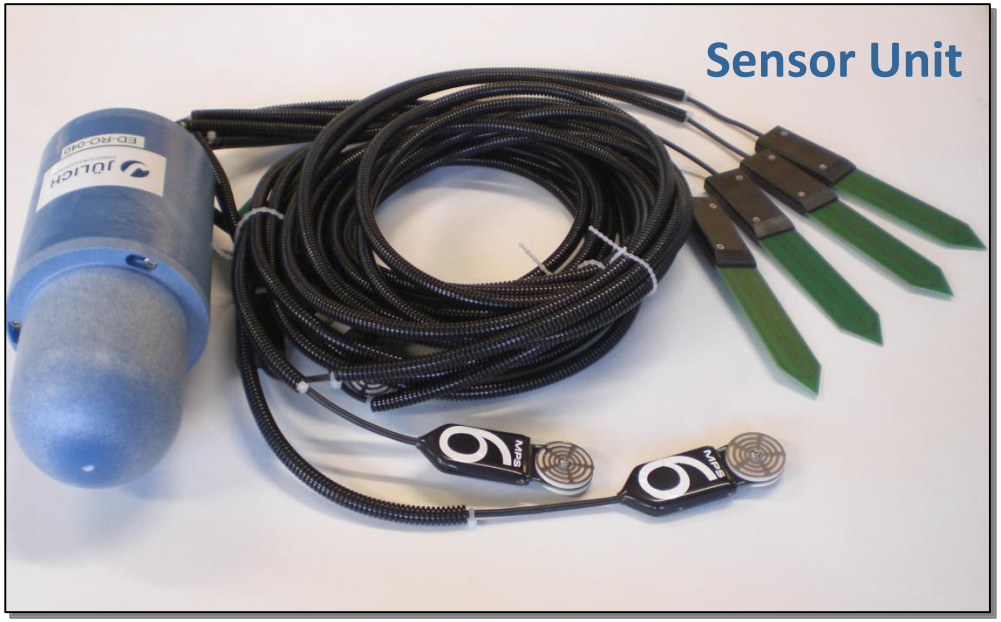
ZigBee Technologie

- Optimiert für die Vernetzung von intelligenten Sensoren
  - hohe Zuverlässigkeit,
  - geringe Kosten,
  - geringe Leistungsaufnahme,
  - geringe Datenrate
  - hohe Sicherheit
- Nutzung des 2,4-GHz-ISM-Bands
- 16 Kanäle mit einer Datenrate von 250 kBit/sec
- Automatische Suche nach freien Kanälen
- Unterstützt Mesh- und Tree-Topologie (redundante Übertragungspfade)



Das hybride Funksensornetzwerk SoilNet

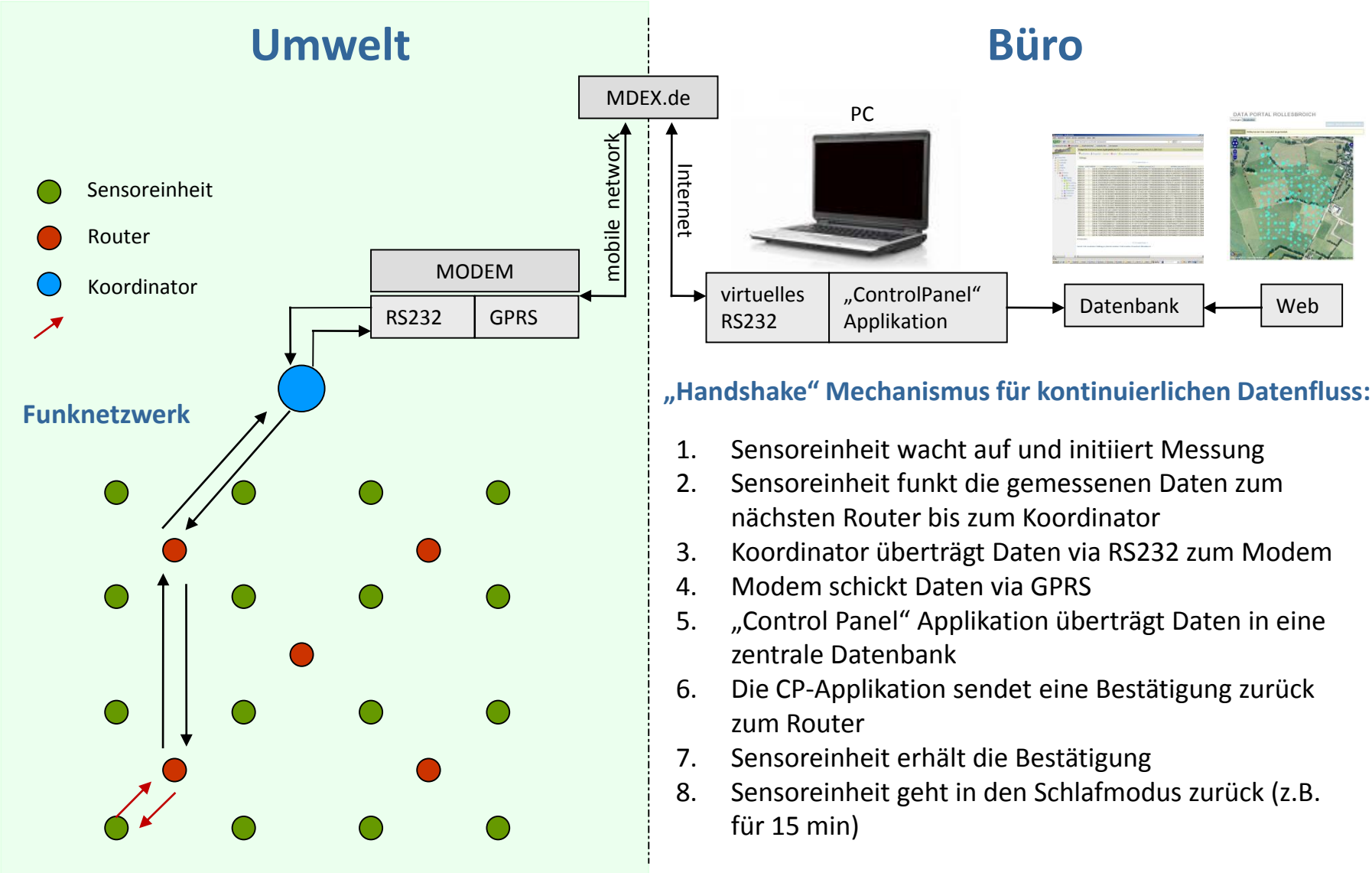
Unterirdische Installation:



Oberirdische Installation:

- Eigenentwicklung auf Basis kommerziellen Funkmodulen (Jennic) entwickelt für JenNet und ZigBeePro
- Erste Feldinstallation von SoilNet in 2007
- Seit dem an 16 Standorten in Betrieb (insgesamt 1111 Sensoreinheiten)

Der Datenfluss in SoilNet



„Handshake“ Mechanismus für kontinuierlichen Datenfluss:

1. Sensoreinheit wacht auf und initiiert Messung
2. Sensoreinheit funkt die gemessenen Daten zum nächsten Router bis zum Koordinator
3. Koordinator überträgt Daten via RS232 zum Modem
4. Modem schickt Daten via GPRS
5. „Control Panel“ Applikation überträgt Daten in eine zentrale Datenbank
6. Die CP-Applikation sendet eine Bestätigung zurück zum Router
7. Sensoreinheit erhält die Bestätigung
8. Sensoreinheit geht in den Schlafmodus zurück (z.B. für 15 min)

Soilnet Sensoreinheit

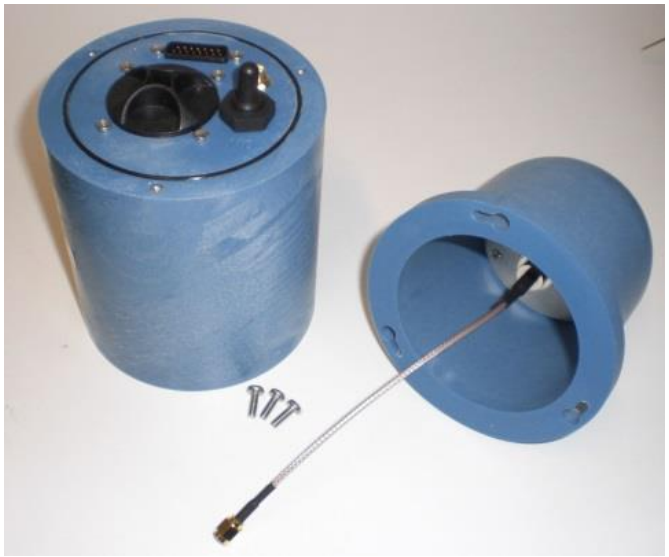
V 1.0

V 2.0

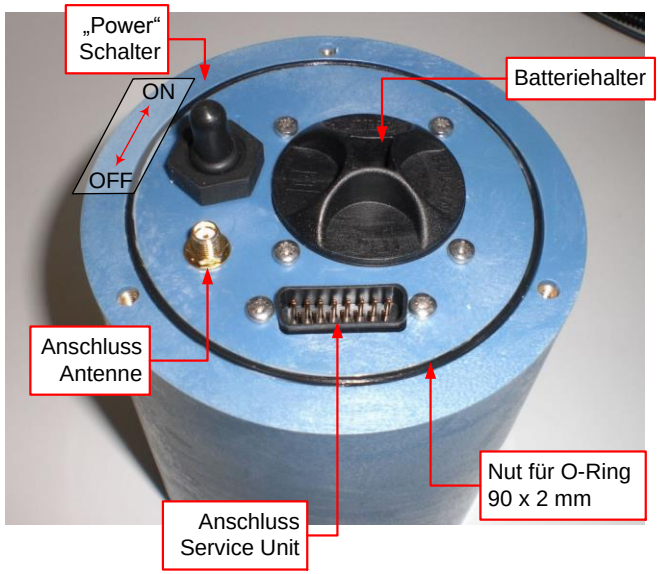
V 3.0

Funktionen	V 1.0	V 2.0	V 3.0
Bis zu 300 Sensoreinheiten pro Netzwerk	X	X	X
Batterielaufzeit > 2 Jahre	X	X	X
Echtzeituhr		X	X
Verbessertes Gehäuse		X	X
Optimierte Antenne		X	X
Konfigurationstool		X	X
Autarke Betriebsmöglichkeit			X
SDI-12 Schnittstelle für 9 Sensoren			X
SD Speicherkarte (bis zu 3.800.000 Messungen)			X
GSM Modem (optional)			X

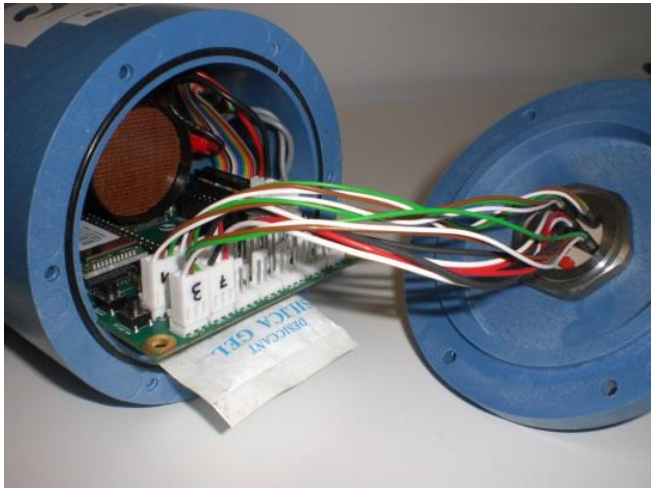
Soilnet Sensoreinheit



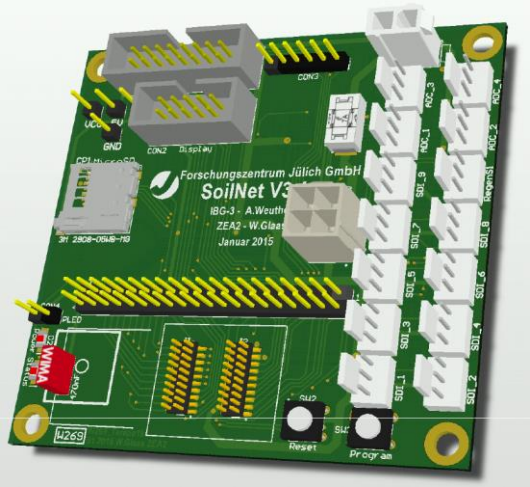
Gehäuse und Deckel mit integrierter Antenne



Bedienelemente und Anschlüsse



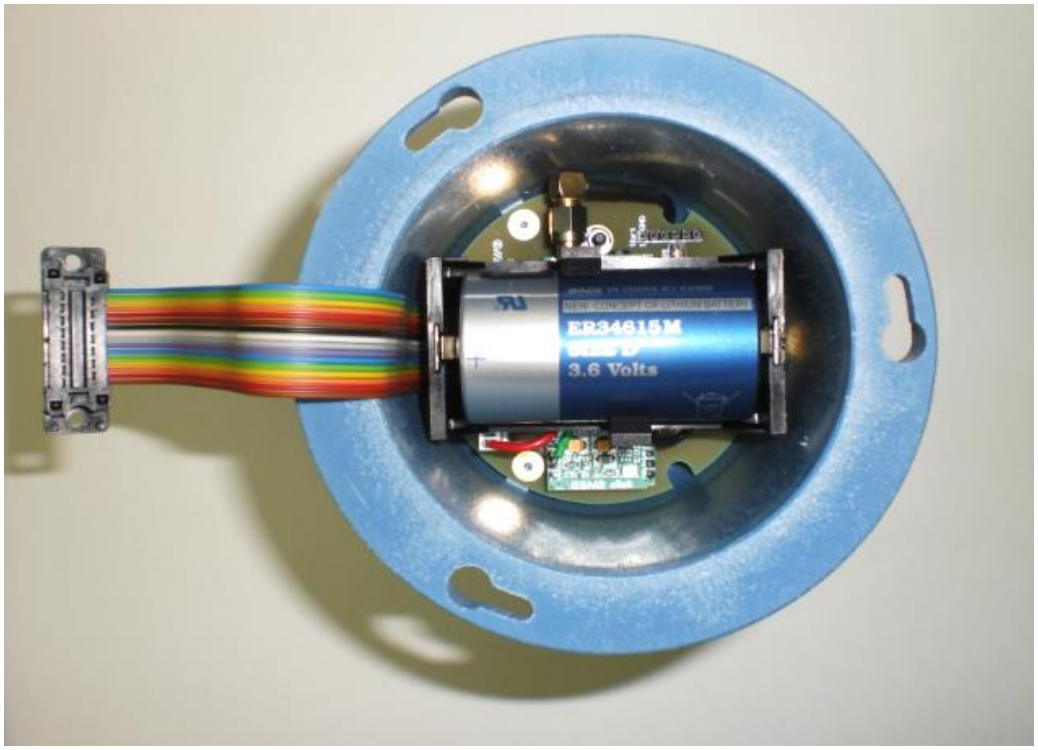
Bodendeckel mit Kabeldurchführung



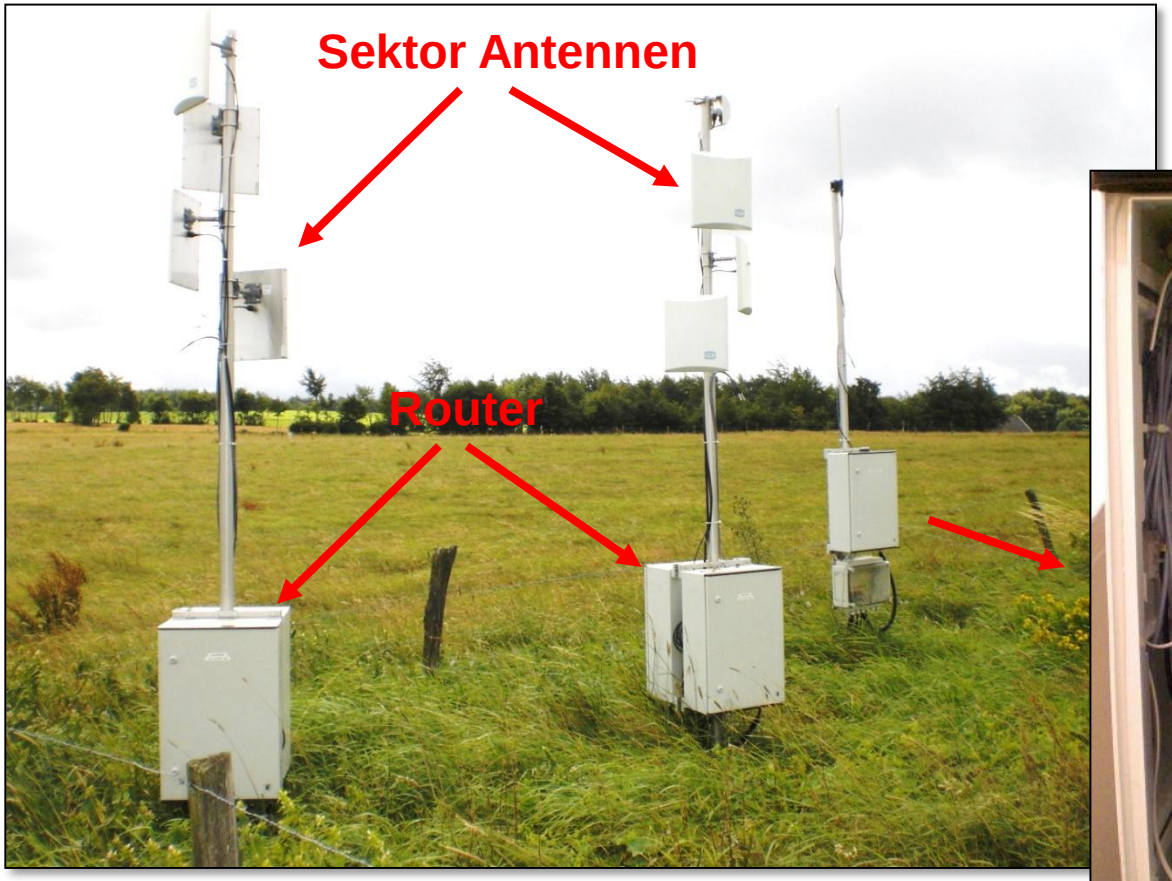
Hauptplatine

Soilnet Sensoreinheit mit integriertem Modem

- SoilNet Sensorknoten sendet Daten autark per Email-Anhang
- Ermöglicht Aufbau großräumiger Sensornetzwerke (>10 km²)



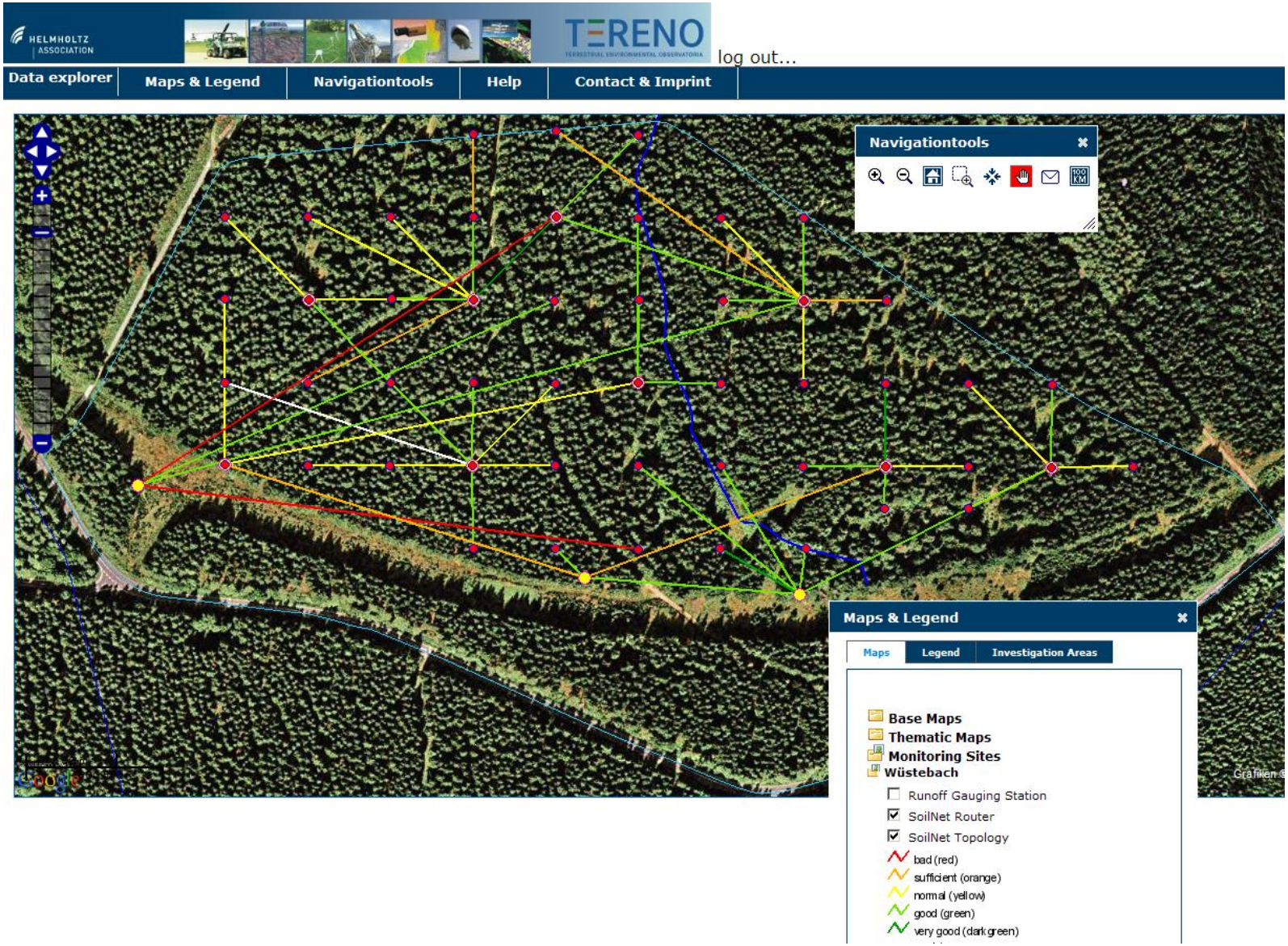
SoilNet Router und Koordinator



Sensornetzwerk im Testgebiet Rollesbroich

Koordinator mit GSM-Modem

Routeranordung im Testgebiet Wüstebach



Beispiele für Umweltsensoren

Name	Messgröße	Schnittstelle	Firma
SMT100	Bodenfeuchte, Temperatur	SDI-12	truebner.de
MPS-6	Wasserpotential	SDI-12	decagon.com
GS3	Bodenfeuchte, Temperatur, el. Leitfähigkeit	SDI-12	decagon.com
5TE	Bodenfeuchte, Temperatur, el. Leitfähigkeit	SDI-12	decagon.com
CTD-10	Wasserstand, Temperatur, el. Leitfähigkeit	SDI-12	decagon.com
RT-1	Bodentemperatur	SDI-12	decagon.com
EC-5	Bodenfeuchte	analog	decagon.com
RG2501	Niederschlag	puls	omega.com

SMT100

MPS-6

GS3

5TE

CTD-10

RT-1

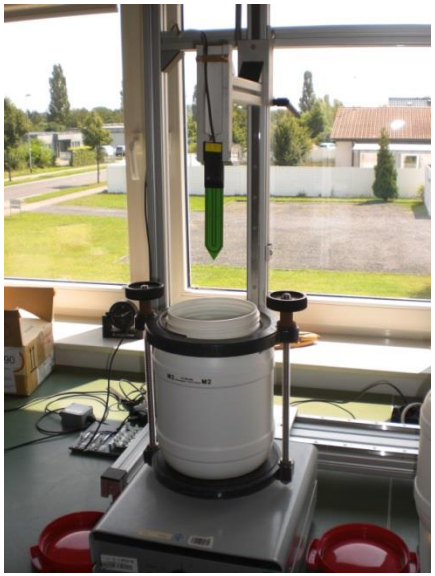
EC-5

RG2501

Kalibration von Bodenfeuchtesensoren

1. Schritt: Beziehung zwischen Sensorausgabe und Permittivität

SMT100



M1: Luft (έ=1)
M2: Glaskugeln (έ=3)
M3: (2-Isopropoxyethanol, έ ~ 18.1)
M4: (2-Isopropoxyethanol, έ ~ 26.3)
M5: (2-Isopropoxyethanol, έ ~ 34.8)

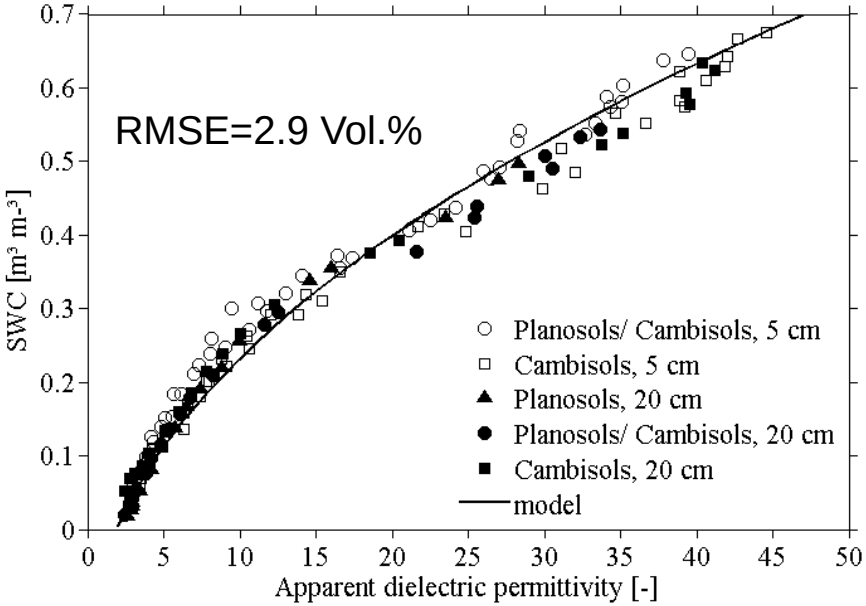
Kalibration von Bodenfeuchtesensoren

2. Schritt: Beziehung zwischen Permittivität und volumetrischen Wassergehalt

Bodenproben:

CRIM Modell:

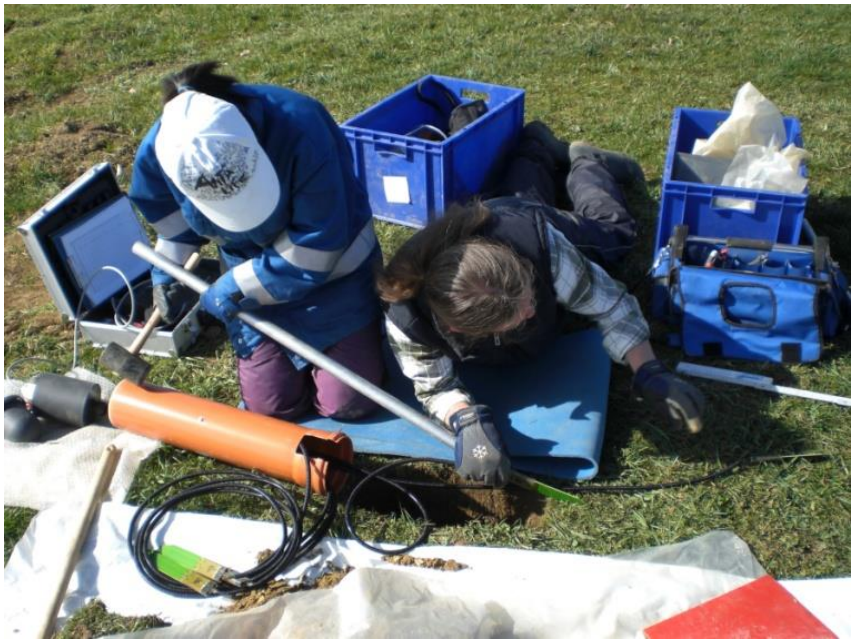
$$\theta = \frac{K_a^{\beta} - (1-\eta)\cdot K_s^{\beta} - \eta K_{air}^{\beta}}{K_w(T)^{\beta} - K_{air}^{\beta}}$$



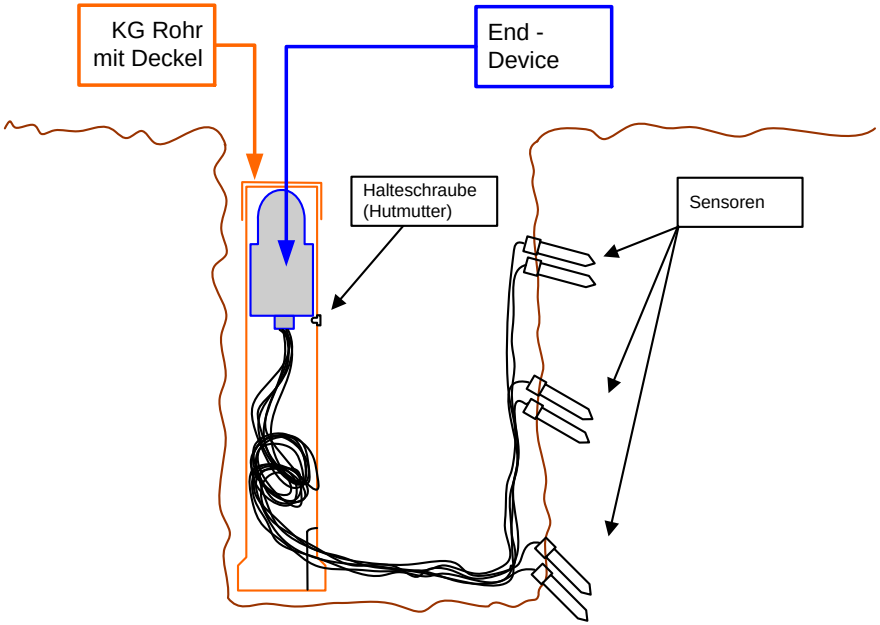
Rosenbaum et al. (2012)

Unterirdische SoilNet Installation

Bis zu 100 m Reichweite zwischen Sensoreinheit und Router



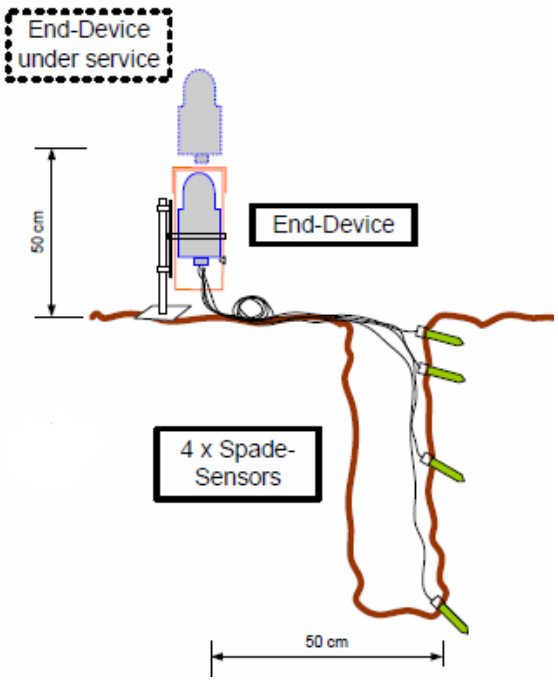
Rollesbroich (D)



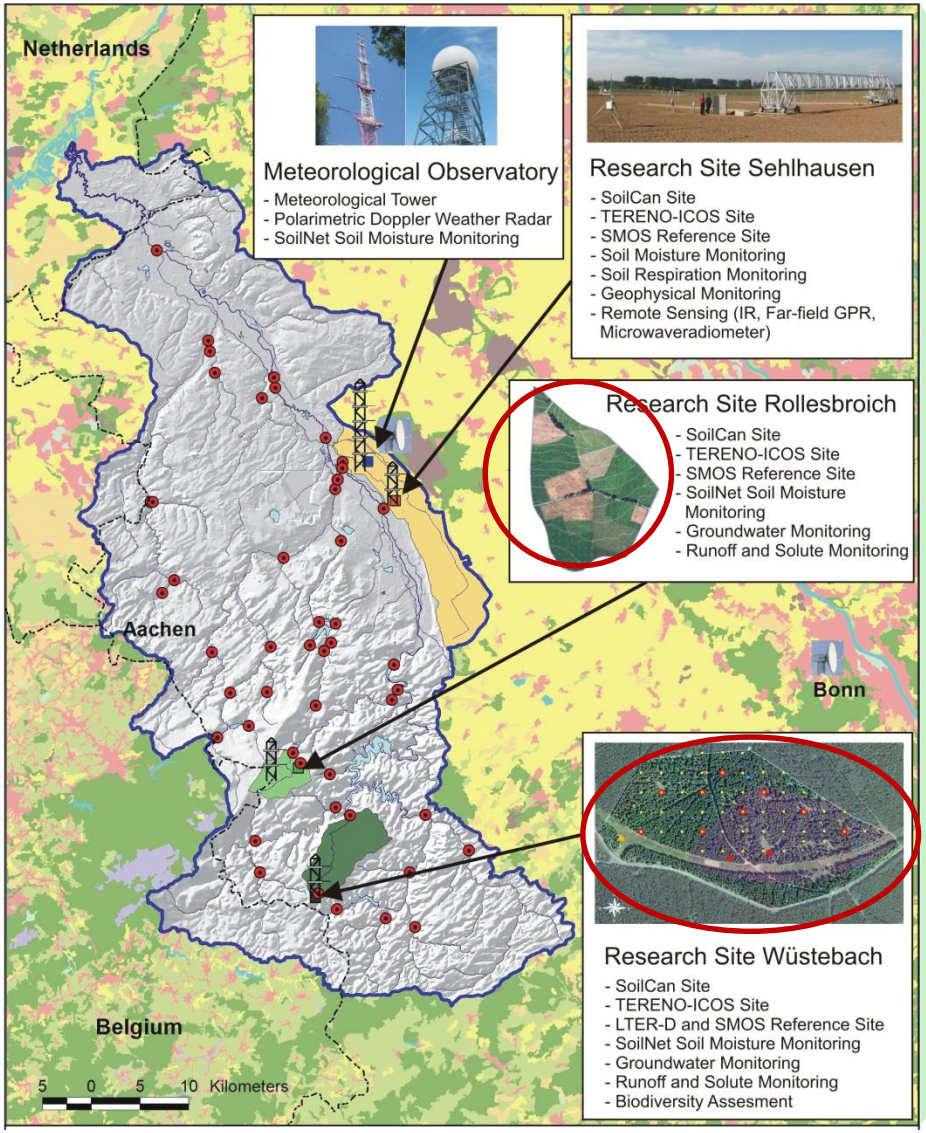
Oberirdische SoilNet Installation

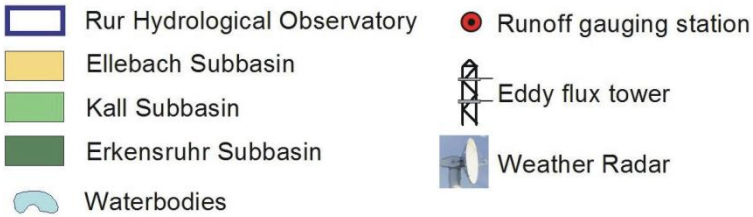
Bis zu 2 km Reichweite zwischen Sensoreinheit und Router

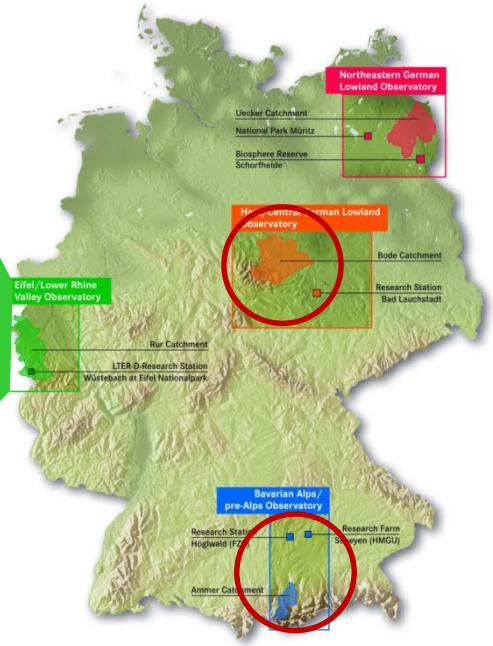
Petzenkirchen (AUT)



SoilNet installations in TERENO observatories



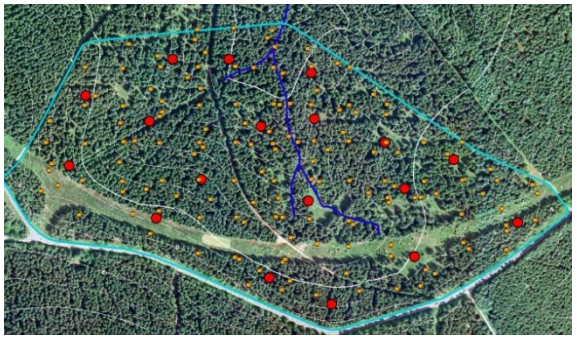


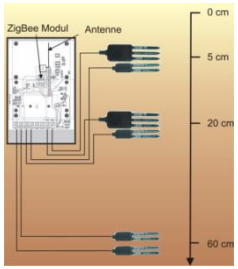


TERENO
TERRESTRIAL ENVIRONMENTAL OBSERVATORIES

Gemessene Bodenfeuchtemuster

Beispiel: Wüstebach Einzugsgebiet (NLP Eifel)



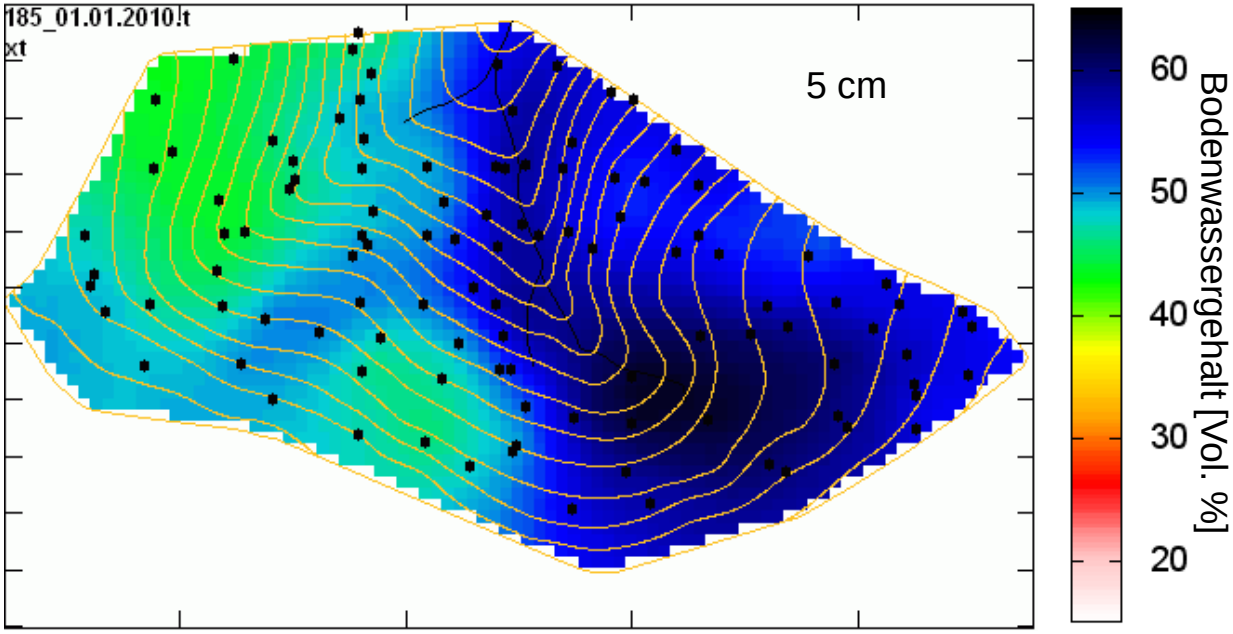


150 Sensor units

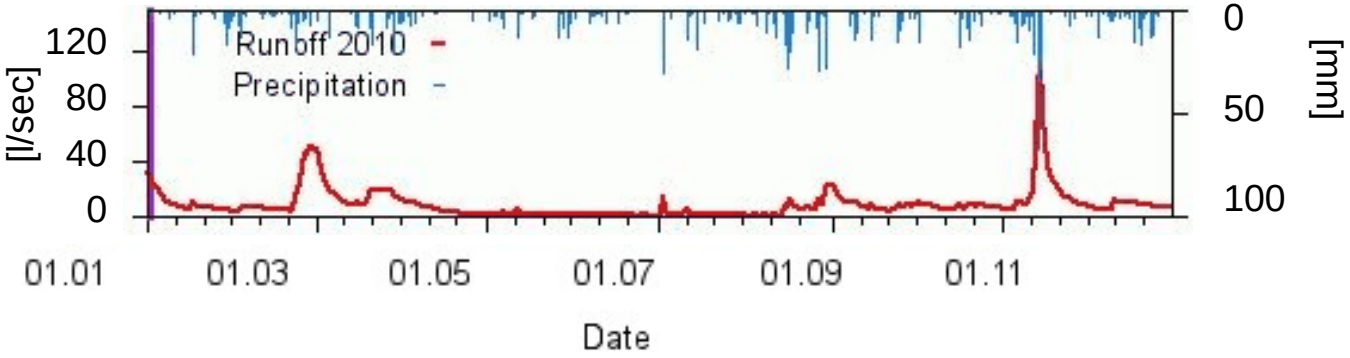
18 Router units

900 Soil moisture sensors

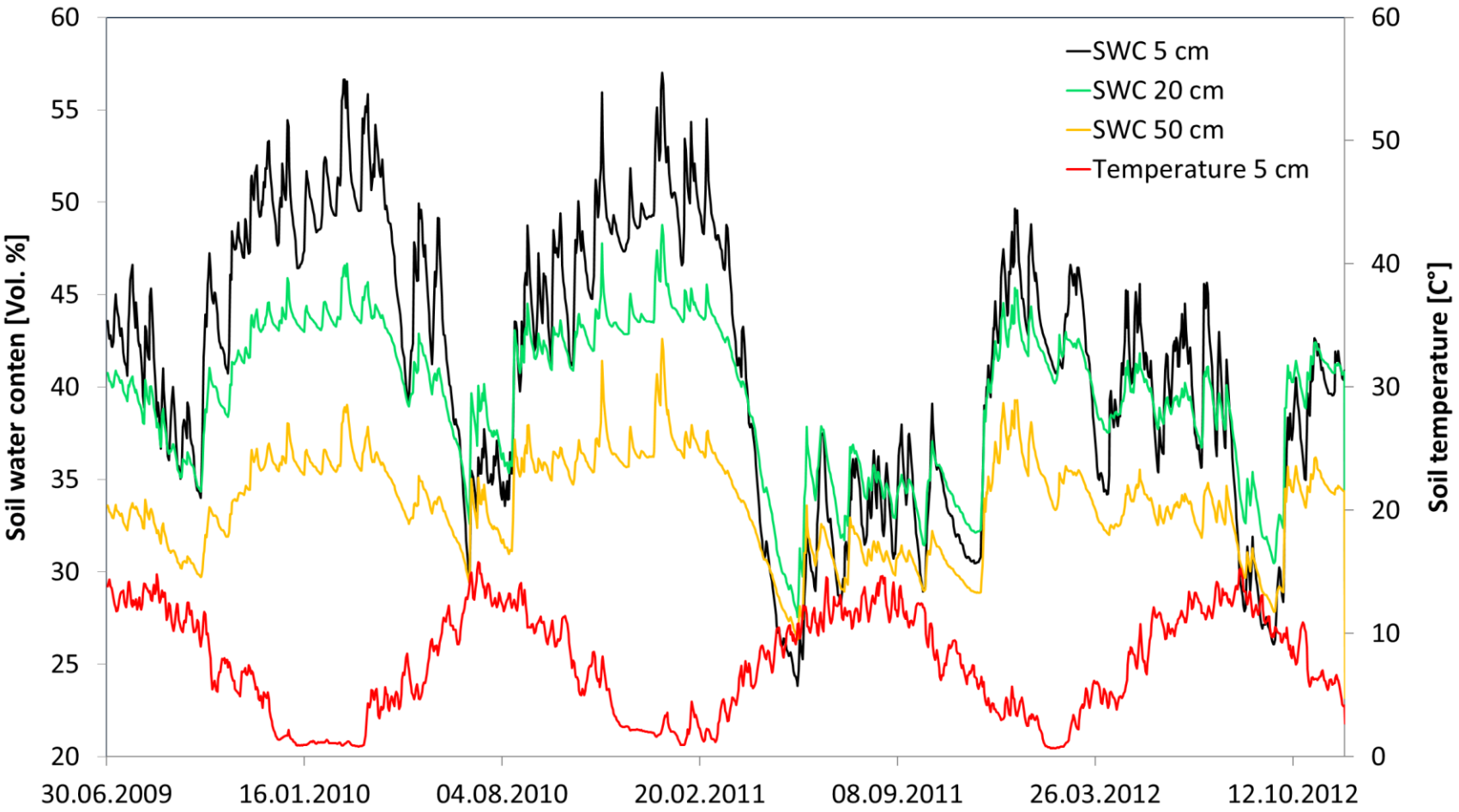
300 Temperature sensors



>30 Mio. Messungen pro Jahr seit 2008!



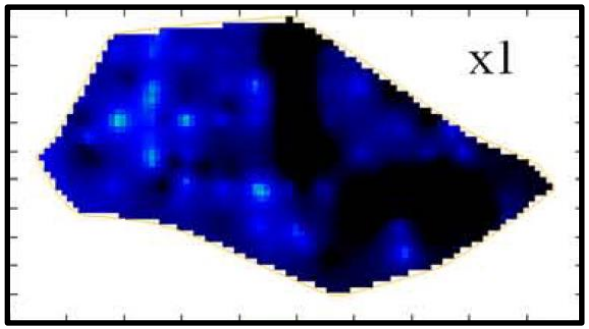
Zeitliche Dynamik des mittleren Wassergehalts



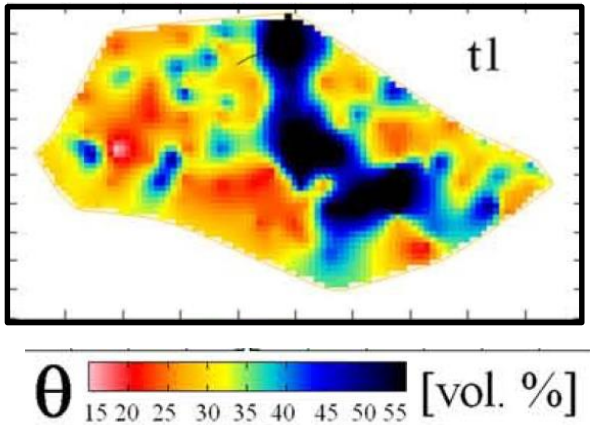
Rosenbaum et al., 2012, WRR

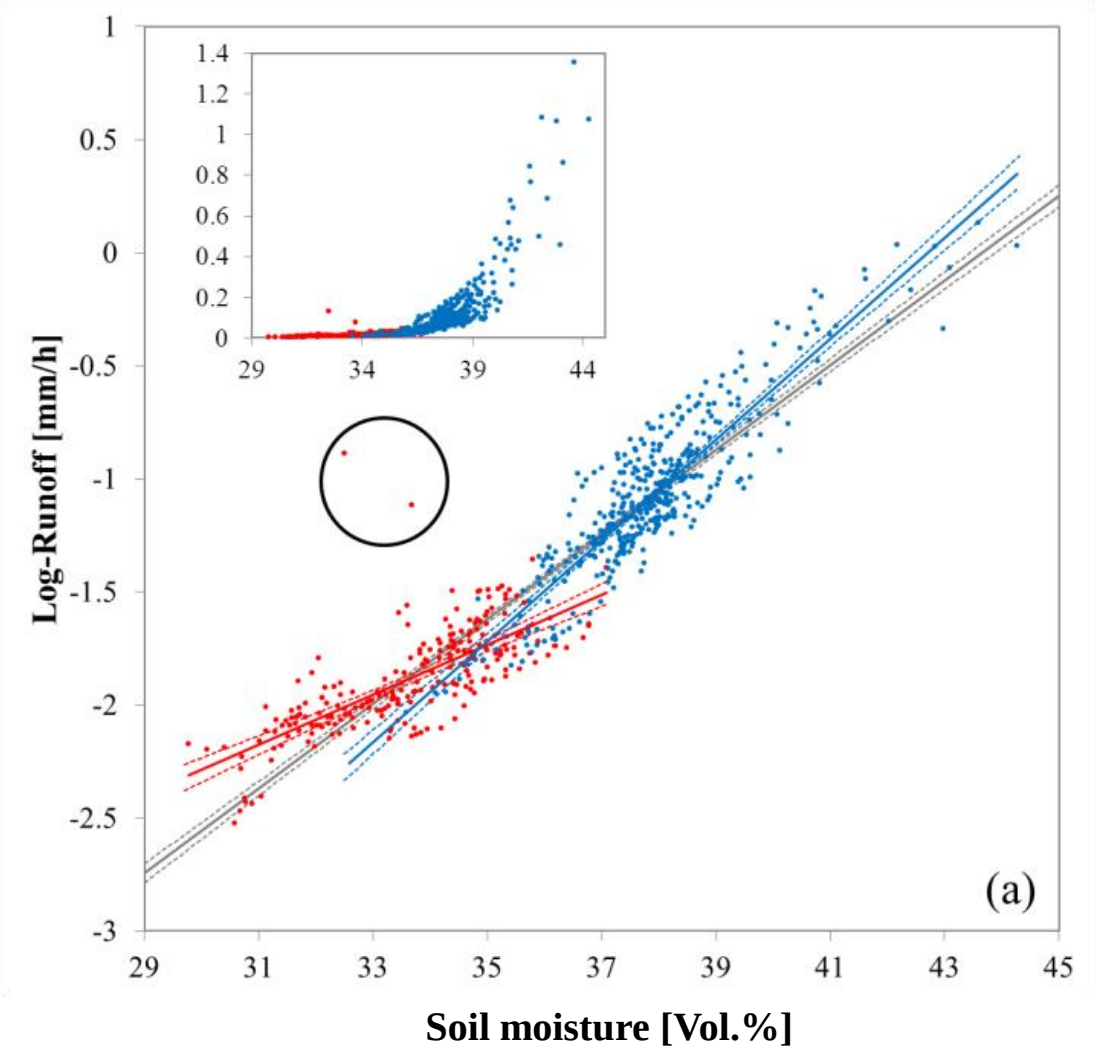
Bodenfeuchte steuert laterale Fließprozesse

Feuchter Zustand



Trockener Zustand

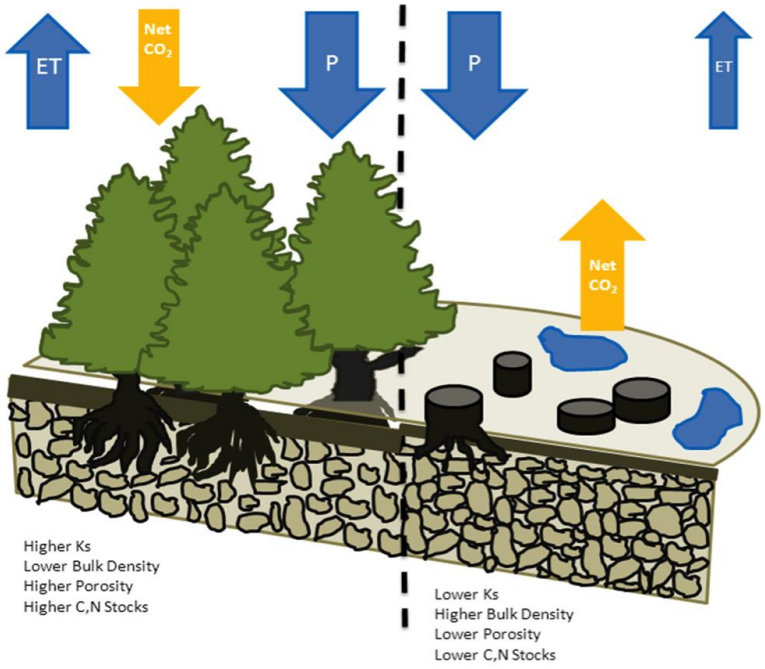


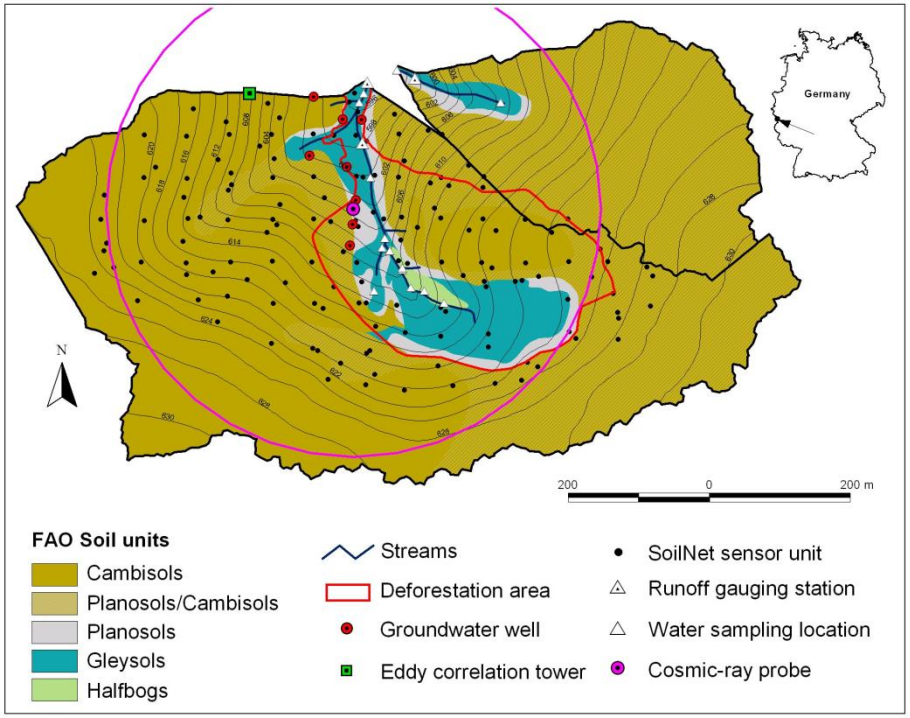


Stockinger et al., 2014, WWR

Waldumbauexperiment (NLP Eifel)

- Wechsel von einem Fichten-Reinbestand zu einem standortgerechten Laubmischwald
- Langzeit-Untersuchung des Einflusses auf:
  - Wasserhaushalt und Wasserqualität
  - Kohlenstoff- und Stickstoffumsätze
  - C- und N-Pools, sowie hydraulische Eigenschaften des Bodens
  - Fauna und Flora



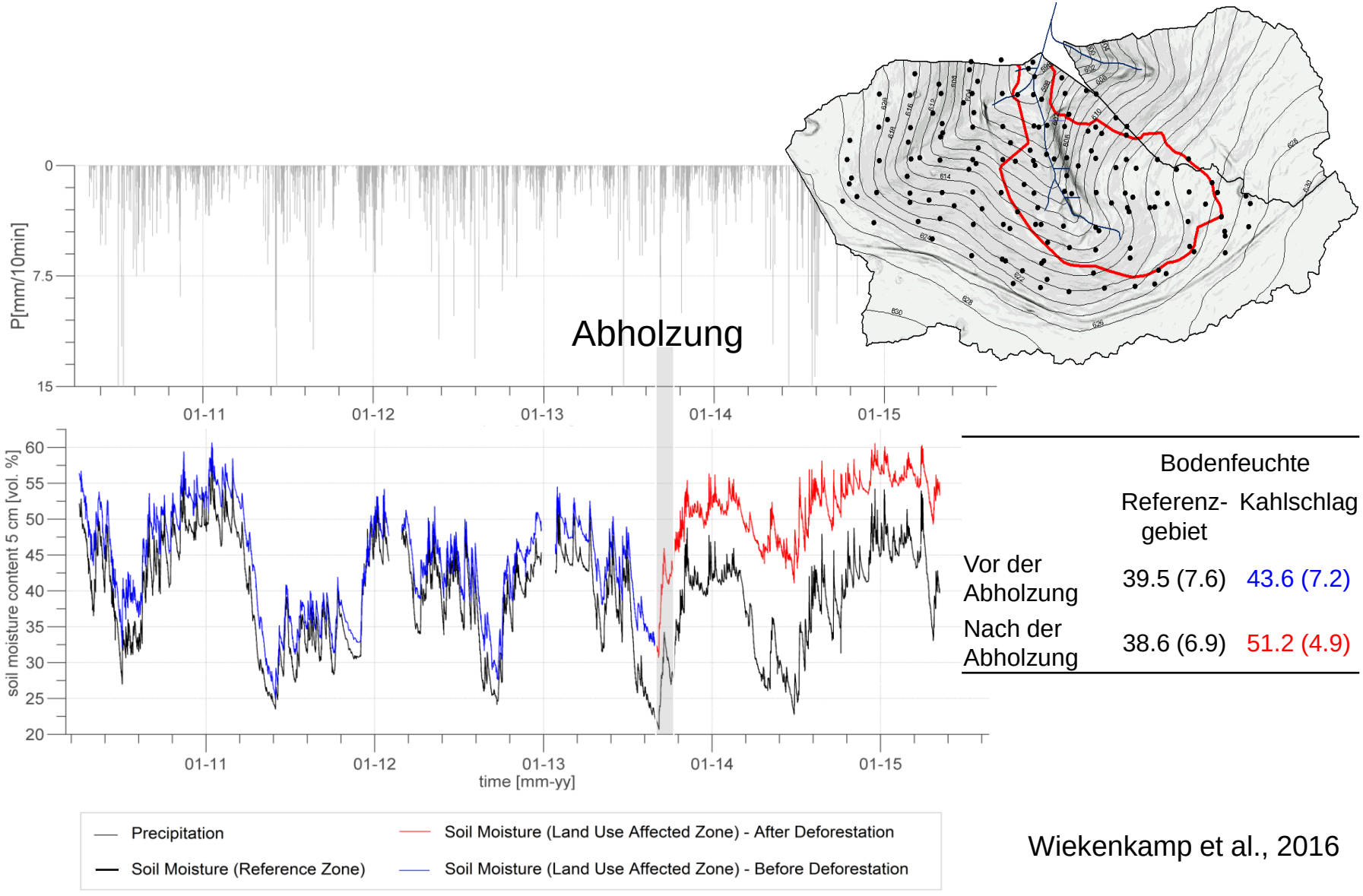


Abholzung (August bis Oktober 2013)

Kahlschlagfläche Sommer 2014

Kahlschlagfläche Herbst 2015

Bodenfeuchte vor und nach der Abholzung

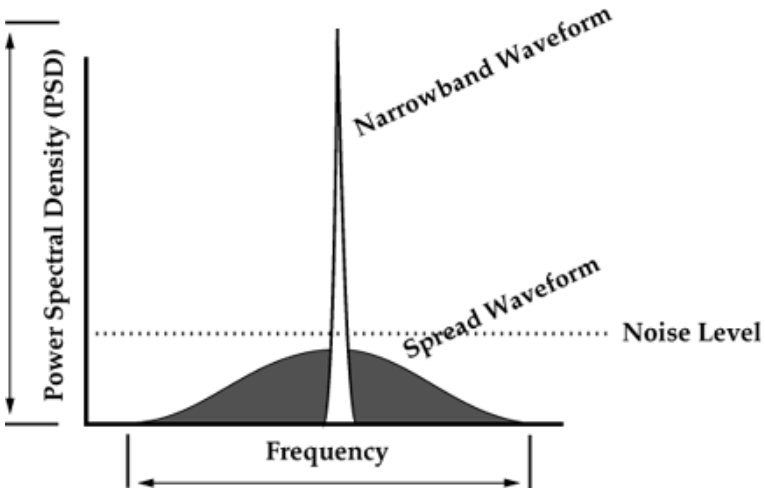


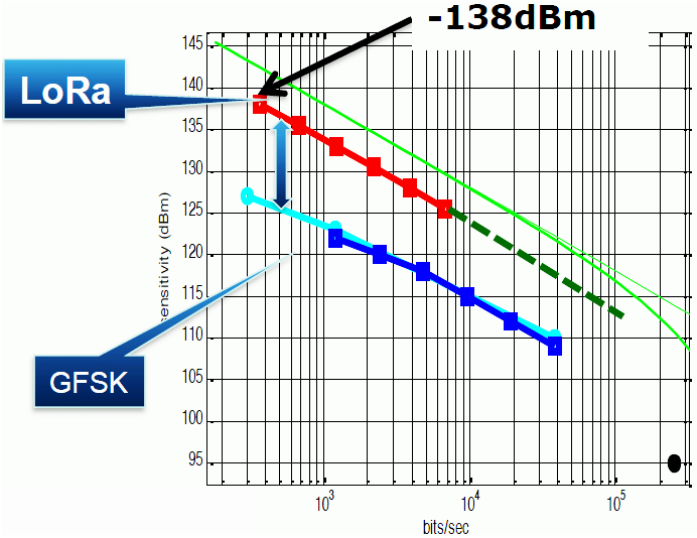
	Bodenfeuchte	
	Referenz-gebiet	Kahlschlag
Vor der Abholzung	39.5 (7.6)	43.6 (7.2)
Nach der Abholzung	38.6 (6.9)	51.2 (4.9)

Wiekenkamp et al., 2016

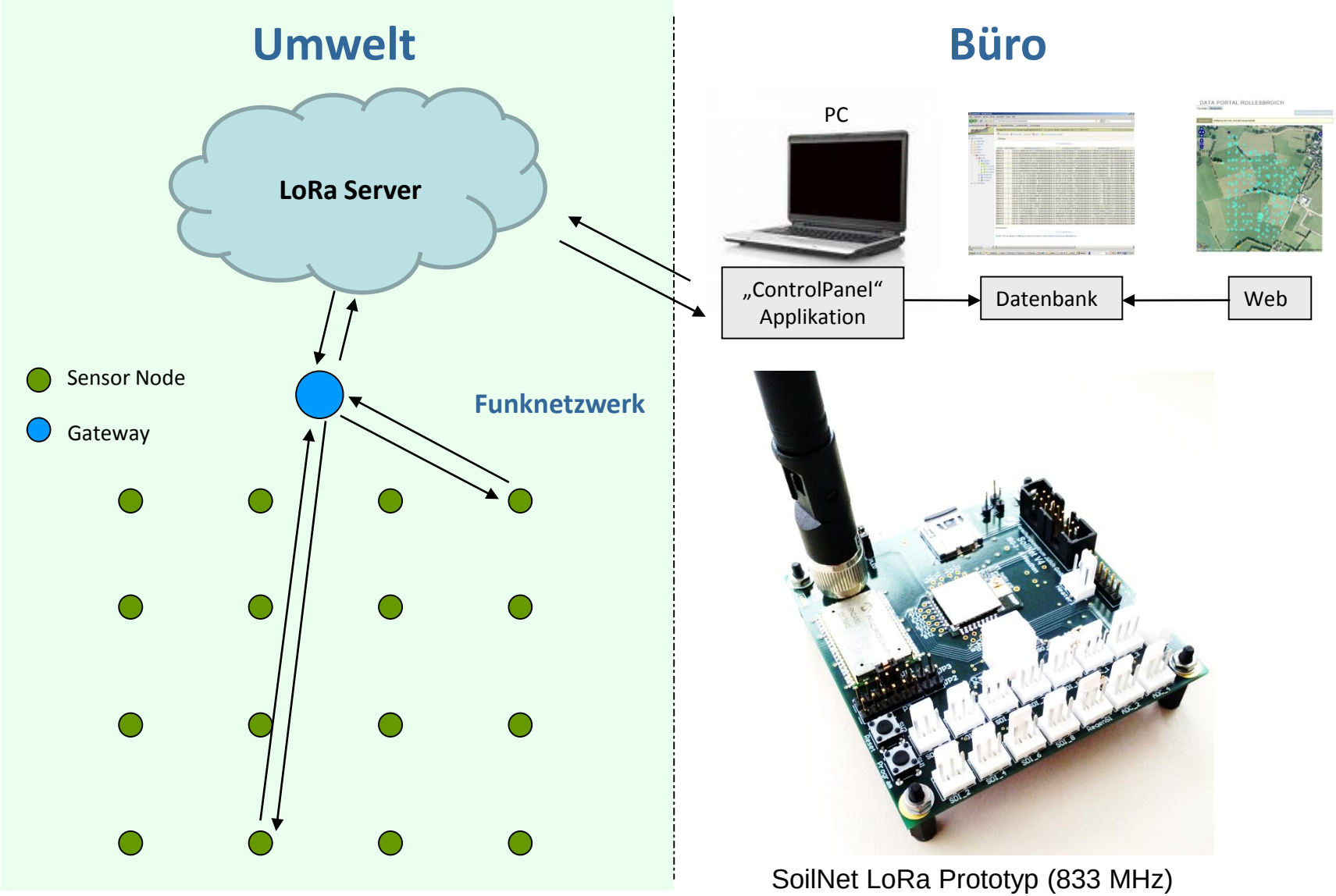
Ausblick: LoRa Technik

- Gewährleitung der Interoperabilität durch Verwendung von Standards
- Verringerte Betriebskosten durch Nutzung von vorhandenen Infrastrukturen
- Niedrigere Frequenz (z.B. 433 oder 868 MHz) und Frequenzspreizungstechnik
  - Höhere Sensitivität (~20dB)
  - Reichweiten im freien Feld von mehr als 15 km möglich
  - Höhere Robustheit gegenüber Störsignalen und Kanalrauschen





Der Datenfluss im SoilNet LoRa Netzwerk



SoilNet LoRa Prototyp (833 MHz)

Zusammenfassung

- Funkbasierte Sensornetzwerke haben viele Vorteile gegenüber klassischen Messsystemen
- Wasser im Boden führt zu einer starken Dämpfung -> Hybride Funknetzwerke notwendig
- SoilNet wird seit 9 Jahren erfolgreich eingesetzt, insbesondere um Bodenwasserdynamik zu erfassen
- Zukünftige Entwicklungen wie LoRa werden die Funktionalität und Verbreitung von Ad-hoc Sensornetzwerken noch deutlich verbessern

Publikationen

Qu, W., H.R. Bogena., J.A. Huisman, J. Vanderborght, M. Schuh, E. Priesack and H. Vereecken (2015): Predicting sub-grid variability of soil water content from basic soil information. Geophysical Research Letters, 2014GL062496.

Qu, W., H.R. Bogena., J.A. Huisman, G. Martinez Garcia, Y. Pachepsky and H. Vereecken (2014): Effects of soil hydraulic properties on the spatial variability of soil water content: evidence from sensor network data and inverse modeling. Vadose Zone J., 13(12), doi:10.2136/vzj2014.07.0099.

Korres, W., T.G. Reichenau, P. Fiener, C.N. Koyama, H.R. Bogena, T. Cornelissen, R. Baatz, M. Herbst, B. Diekkrüger, H. Vereecken, and K. Schneider (2014): Spatio-temporal soil moisture patterns - a meta-analysis using plot to catchment scale data. J. Hydrology J. Hydrol., doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.042

Stockinger, M., H. Bogena, A. Lücke, B. Diekkrüger, M. Weiler and H. Vereecken (2014): Seasonal Soil Moisture Patterns Control Transit Time Distributions in a Forested Headwater Catchment. Water Resour. Res., 50, doi:10.1002/2013WR014815.

Cornelissen, T., B. Diekkrüger and H.R. Bogena (2014): Importance of a bedrock aquifer in the 3D simulation of discharge and soil moisture patterns at different spatial and temporal scales - The Wüstebach case study. J. Hydrol. 516: 140-153, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.060.

Graf, A., H.R. Bogena, C. Drüe, H. Hardelauf, T. Pütz, G. Heinemann and H. Vereecken (2014). Spatiotemporal relations between water budget components and soil water content in a forested tributary catchment. Water Resour. Res. 50, doi: 10.1002/2013WR014516.

Hasan S., C. Montzka, C. Rüdiger, M. Ali, H. Bogena and H. Vereecken (2014): Soil moisture retrieval from airborne L-band passive microwave using high resolution multispectral data. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 91: 59-71, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.005.

Bogena, H.R., J.A. Huisman, R. Baatz, R., H.-J. Hendricks Franssen and H. Vereecken (2013): Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. Water Resour. Res., 49 (9): 5778-5791, DOI: 10.1002/wrcr.20463.

Cornelissen, T., B. Diekkrueger and H. Bogena (2013): Using HydroGeoSphere in a forested catchment: How does spatial resolution influence the simulation of spatio-temporal soil moisture variability? Procedia Environmental Sciences, 19: 198-207, doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.022.

Qu, W., H.R. Bogena, J.A. Huisman, and H. Vereecken (2013): Calibration of a novel low-cost time domain transmission soil water content sensor. Vadose Zone J., 12(2), doi:10.2136/vzj2012.0139.

Rosenbaum, U., H.R. Bogena, M. Herbst, J.A. Huisman, T.J. Peterson, A.W. Western and H. Vereecken (2012): Dynamics of spatial soil moisture patterns at the catchment scale. Water Resour. Res., 48(10), doi:10.1029/2011WR011518.

Bogena H.R., M. Herbst, J.A. Huisman, U. Rosenbaum, A. Weuthen, and H. Vereecken (2010): Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability. J. 9(4): 1002-1013, doi:10.2136/vzj2009.0173.