

## Newsletter 1/2022

### AUS DEM INHALT

#### WISSENSSTAND

Editorial	2
Neues Netzwerk verbindet Kontinente	2

#### NACHGEFRAGT

Interview mit Prof. Richard Hooper	3
------------------------------------	---

#### WISSENSSTAND

Besser vor Sturzfluten warnen	4
Wasserkreisläufe bereits stark beeinflusst?	4
Der Superzelle auf der Spur	5
ICOS zertifiziert Messturm am Wüstebach	6
Zweite Phase gestartet	6

#### JUNGE TALENTE FÖRDERN

Von der Schulbank ins Labor	7
-----------------------------	---

#### NETZWERKE

COSMOS-Europe: Langzeitdaten zur Bodenfeuchte veröffentlicht	8
Städte nachhaltiger und widerstandsfähiger machen	8

#### VOR ORT

AgroScapeLab Quillow mit neuer Webseite	9
Wasserabfluss: auf der Suche nach wiederkehrenden Mustern	9

#### IM BLICKPUNKT

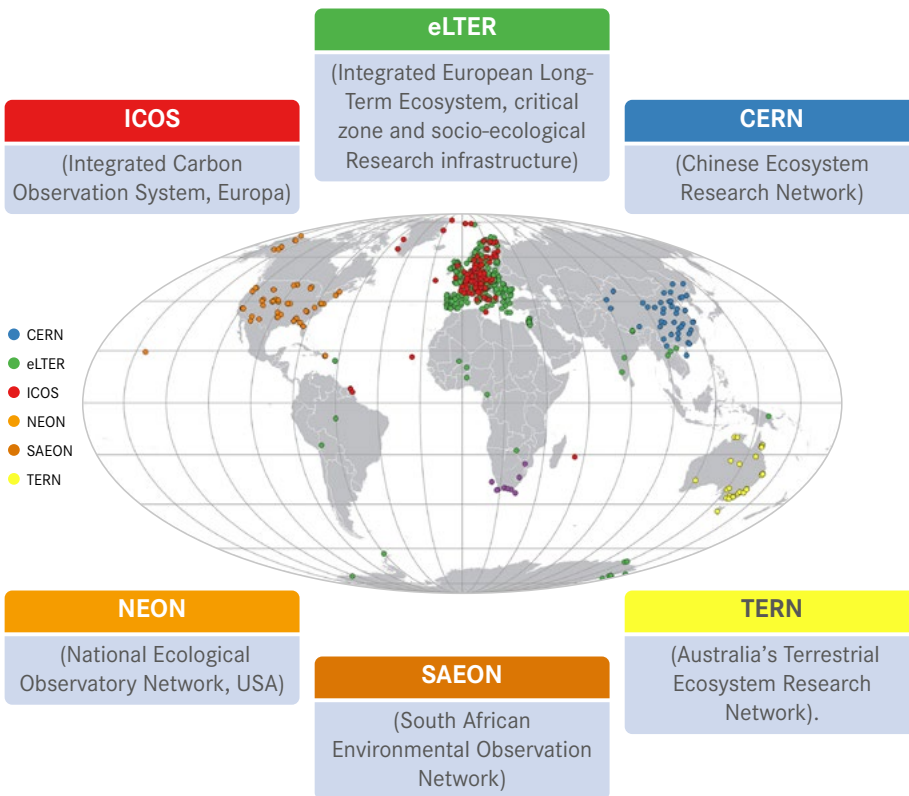
Effizient bewässern	10
Terminankündigung: TERENO-Workshop „From Measurements to Modelling“	10

Gute Aussichten: Die Global Ecosystem Research Infrastructure (GERI) verknüpft künftig Infrastrukturen und Daten aus fünf Kontinenten. Auch TERENO-Standorte wie das Waldgebiet Hohes Holz tragen dazu bei.

©UFZ/André Künzelmann

## 2. TERENO-OZCAR-KONFERENZ

25. bis 28. September 2023 in Bonn



## NEUES NETZWERK VERBINDET KONTINENTE

Sechs Umweltforschungsinfrastrukturen aus fünf Kontinenten haben sich zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Die Global Ecosystem Research Infrastructure (GERI) soll helfen, neue Erkenntnisse über globale ökologische Zusammenhänge zu gewinnen. TERENO ist über zwei europäische Infrastrukturen an dem neuen Netzwerk beteiligt.

In den letzten zehn Jahren wurden auf allen Kontinenten große Umweltforschungsinfrastrukturen aufgebaut. Wissenschaftler:innen erfassen mit ihrer Hilfe, wie Ökosysteme auf die vom Menschen verursachten Umweltveränderungen reagieren. Das betrifft biophysikalische und biogeochemische Prozesse ebenso wie die sogenannte biotische Umwelt, also Vorgänge und Zustände, die sich direkt auf Lebewesen wie Pflanzen oder Tiere beziehen. Ein wesentlicher beeinflussender Faktor ist hierbei die Globalisierung. Sie führt zu einer immer stärkeren Vernetzung der Welt mit einem immer stärker werdenden Einfluss auf den Fluss und die Verteilung von Energie und Stoffen in Ökosystemen, aber auch auf Tier- und Pflanzenarten.

„Die konkreten Zusammenhänge wollen wir besser verstehen. Das ist leichter gesagt als getan, denn infolge des wachsenden Einflusses der fortschreitenden Globalisierung verändern sich diese Zusammenhänge – und zwar rasch und weitreichend“, sagt Dr. Steffen Zacharias vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Umweltforschungsinfrastrukturen liefern die für die Forschung notwendigen Daten. Über GERI werden nun Infrastrukturen und Daten aus fünf Kontinenten miteinander verknüpft: aus Afrika, Amerika, Asien, Australien und Europa. „Durch das Harmonisieren von Daten können wir etwa Unsicherheiten beim Verständnis von Prozessen verringern. Aber die Zusammenarbeit bietet noch viel mehr: Sie ermöglicht eine breitere, Kontinente übergreifende Forschung – und zwar auf eine Art und Weise, die bisher nicht möglich war. Das wird helfen, ökologische Prozesse über Kontinente, Zeiträume und Disziplinen hinweg besser zu verstehen“, hebt der UFZ-Wissenschaftler hervor, der an der Gründung des Netzwerks beteiligt war. Auch für TERENO als Partner der beiden beteiligten europäischen Infrastrukturen eLTER und ICOS ergeben sich neue Perspektiven, etwa beim Ausbau der internationalen Forschungs Kooperationen.

Henry W. Loescher et al. (2022). *Building a Global Ecosystem Research Infrastructure to Address Global Grand Challenges for Macrosystem Ecology. Earth's Future, Volume 10, Issue 5.*

► DOI: [10.1029/2020EF001696](https://doi.org/10.1029/2020EF001696)

## EDITORIAL

### Abschied und Ausblick



Die nächste Sitzung des TERENO Advisory Board wird anders sein. Zum ersten Mal seit der Gründung von TERENO im Jahr 2008 wird nicht Rick Hooper den Vorsitz führen, der auf eigenen Wunsch ausgeschieden ist. TERENO hat ihm viel zu verdanken. Unter seinem Vorsitz hat der Advisory Board die Entwicklung der Initiative nicht nur begleitet, sondern maßgeblich mitgeprägt. Dass TERENO zu einer Erfolgsgeschichte wurde, ist auch sein Verdienst. Im Interview blickt er zurück und gibt uns auch noch einmal mit auf den Weg, wie wichtig es ist, an einzelnen Orten gewonnene Erkenntnisse zu verallgemeinern und Daten zusammenzuführen.

Mit der Gründung von GERI, einem Netzwerk aus sechs Forschungsinfrastrukturen von fünf Kontinenten, wollen wir gemeinsam mit Kolleg:innen aus Südafrika, den USA, Australien, China und Europa genau diesen Weg gehen. Der Ausbau von gemeinsamen Aktivitäten mit nationalen und internationalen Partnern ist ein Thema, das sich durch fast alle Beiträge des Newsletters zieht: Wir etablieren gemeinsam mit dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung einen neuen TERENO-Standort, wir sind an COSMOS-Europe beteiligt, einem neuen europäischen Netzwerk von Cosmic-Ray-Bodenfeuchtesensoren, und wir bringen unsere Infrastruktur und Daten in verschiedene Forschungsvorhaben ein.

Ein wichtiges Anliegen aller an TERENO beteiligten Helmholtz-Zentren ist es, junge Talente für die Wissenschaft zu begeistern – sei es etwa durch Schülerlabore oder Partnerschaften mit Schulen. Auch Arbeiten an den TERENO-Standorten fließen mit ein. In dieser Ausgabe stellen wir vor, was das Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ und der Campus Alpin des Karlsruher Instituts für Technologie zu bieten haben.

Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen beim Lesen!

Ihr Harry Vereecken

Koordinator TERENO

## „INVESTITIONEN IN INSTRUMENTE ZAHLEN SICH AUS“

Interview mit Prof. Richard „Rick“ Hooper – der Experte für Hydrologie war seit dem Start von TERENO Vorsitzender des Advisory Board. Nun ist er in den Ruhestand gegangen.

### Herr Prof. Hooper, was hat Sie damals bewogen, als TERENO 2008 gegründet wurde, den Vorsitz des Advisory Board zu übernehmen?

In den Umweltwissenschaften haben wir das Problem, dass fast nie ausreichend finanzielle Mittel für langfristige innovative Projekte vorhanden sind. TERENO bot damals eine seltene Möglichkeit, das notwendige Geld für ein großflächiges Erdbeobachtungsnetz zusammenzubringen. Damit lassen sich langfristige ökologische, soziale und wirtschaftliche Auswirkungen des globalen Wandels erfassen. Meiner Ansicht nach ist das extrem wichtige Forschungsarbeit.

### Wie beurteilen Sie die bisherige Entwicklung von TERENO?

Äußerst positiv. Ehrlich gesagt hatten wir anfangs die Sorge, dass wir nicht genügend Leute finden werden, die mit den zahlreichen Messinstrumenten vor Ort Untersuchungen durchführen. Aber es hat dann hervorragend geklappt. In den vier TERENO-Observatorien forschen heute Wissenschaftler:innen aus verschiedensten Einrichtungen, nicht nur von den beteiligten Helmholtz-Zentren und nicht nur aus Deutschland.

### Was waren aus Ihrer Sicht Höhepunkte?

Hier fällt mir zum Beispiel die Forschung am Standort Wüstabach in der Eifel ein. Eine Forschergruppe untersucht dort seit 2008 den Wasser- und Stoffkreislauf eines Waldsystems mit Bach vor und nach der Abholzung von Fichten und der anschließenden Regeneration eines naturnahen Laubwaldes. Dabei wurden viele meteorologische, bodenkundliche und hydrologische Messdaten gewonnen. Solche wichtigen Datensammlungen sind an allen TERENO-Standorten entstanden. Das zeigt, dass sich Investitionen in Instrumente auszahlen. Wir können heute besser nachvollziehen, wie einzelne terrestrische Systeme an einem bestimmten Ort funktionieren. Auch aus technischer Sicht haben wir große Fortschritte gemacht, etwa was das Management großer Datenmengen angeht. Das ist sehr mühsame, harte Arbeit, aber sie lohnt sich.

### Was wünschen Sie sich für die weitere Entwicklung von TERENO?

Wie bei jedem langfristigen Vorhaben geht es vor allem darum, innovativ zu bleiben und nicht immer wieder das Gleiche zu tun. Müssen wir dazu vielleicht irgendwann noch einmal größer in Technik investieren? Hierauf gibt es kein Richtig oder Falsch, es ist eine Ermessensentscheidung, bei der Klugheit und Weitsicht gefordert sind. Langfristig wird es vor allem darum gehen, die Erkenntnisse aus den Messungen an individuellen Orten zu verallgemeinern: Was bedeuten die Erkenntnisse vom Wüstabach für den Rhein oder für andere Flüsse? Und wir benötigen Modelle auf globaler Ebene. Dafür braucht es Systeme, bei denen sich Daten aus ganz unterschiedlichen Quellen integrieren lassen – von Wetterstationen über Satelliten bis hin zu Forschungsinfrastrukturen wie TERENO.

### Was sind Ihre persönlichen Pläne?

Ich werde im Ruhestand meine Freizeit genießen und nicht mehr forschen. Das kann man nur ganz oder gar nicht machen. Ein bisschen Forschung funktioniert nicht wirklich. Ich kann mir lediglich vorstellen, weiterhin Studierende zu betreuen. Finanzierungsanträge werde ich nicht mehr schreiben. Meine Frau ist Deutsche. Wir freuen uns darauf, wieder mehr zu reisen, Familienmitglieder in Europa zu besuchen oder einfach mal für einen Monat ein Haus in der Bretagne zu mieten – das alles hoffentlich ohne Corona-Einschränkungen.



© CUAHSI

Richard Hooper hat Angewandte Mathematik und Ökosystem-ökologie studiert und in Umweltsystemtechnik promoviert. Nach seiner Zeit als Hydrologe beim US Geological Survey übernahm er 2003 den Posten des geschäftsführenden Direktors und Präsidenten des Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science (CUAHSI). Nach seiner Pensionierung 2017 wurde er Professor an der Tufts University. 2018 hat er den Edward A. Flinn III Award der American Geophysical Union erhalten.

### Wegweiser mit Weitblick

Seit dem Start von TERENO im Jahr 2008 führte Rick Hooper den Vorsitz des Advisory Board. In diesen 15 Jahren unterstützte und begleitete er die Entwicklung von TERENO von einer unbekannteren Beobachtungsplattform in Deutschland hin zu einer erfolgreichen und international anerkannten weltweiten Aktivität. Rick Hoopers Führungsqualitäten und sein Weitblick haben maßgeblich zu diesem Erfolg beigetragen.

Er als Vorsitzender und die anderen Mitglieder des Advisory Board haben immer wieder kritische Punkte angesprochen, aber auch Lösungswege aufgezeigt und so TERENO auf Kurs gehalten. Ihm war es stets wichtig, dass die in TERENO produzierten Daten verfügbar und zugänglich sind und dass es einen ständigen Austausch mit allen Interessengruppen gibt. Das führte zur Entwicklung der TEODOOR-Datenplattform, die Wissenschaft und Gesellschaft qualitätsgeprüfte Daten zur Verfügung stellt.

Während seiner Zeit als Vorsitzender entwickelte sich TERENO von einem nationalen Netzwerk zu einer Plattform, die Bestandteil europäischer Forschungsinitiativen ist, zum Beispiel des Integrated Carbon Observation System ICOS und des Critical Zone Exploratory Network CZEN. TERENO diente außerdem als Blaupause für die eLTER-Forschungsinfrastruktur.

Ende 2021 ist Rick Hooper auf eigenen Wunsch ausgeschieden. Wir danken ihm für seinen herausragenden Beitrag zu TERENO und wünschen ihm weiterhin alles Gute, viel Glück und gute Gesundheit.

Harry Vereecken im Namen von TERENO

Das Interview führte Janosch Deeg.

## BESSER VOR STURZFLUTEN WARNEN

Überschwemmungen und Starkregen können verheerende Folgen haben, wie etwa 2021 die Flutkatastrophe an der Ahr zeigte. Um so wichtiger ist es, solche Gefahren möglichst genau vorherzusagen. Die seit 2018 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschungsgruppe RealPEP entwickelt, insbesondere durch die möglichst vollständige Ausnutzung moderner Messungen wie etwa polarimetrische Radardaten, ein verbessertes Vorhersagesystem für Sturzfluten. TERENO unterstützt das Vorhaben.

Um Art und Menge des Niederschlags abzuschätzen, nutzen Wissenschaft und Wetterdienste bislang vornehmlich konventionelle, d.h. nicht-polarimetrische Radarmessungen. Algorithmen errechnen aus den Daten die aktuelle Niederschlagsintensität, deren Genauigkeit nun mit den modernen Radaren verbessert werden kann. Sogenannte Nowcasting-Verfahren bauen auf diesen Niederschlagsschätzungen auf und sind besonders gut darin, die Entwicklung der kommenden rund zwei Stunden vorherzusagen. Für längerfristige Prognosen werden noch komplexere Methoden benötigt. Numerische Vorhersagemodelle berechnen Niederschläge auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten – von einem bestimmten Anfangszustand aus bis zu mehreren Tagen im Voraus.



Liefert Daten für bessere Vorhersagen: das TERENO-Wetterradar auf der Sophienhöhe

„In RealPEP wollen wir diese Verfahren enger verknüpfen und so den Wert und die Effizienz von Warnungen für kleine bis mittelgroße Flusseinzugsgebiete in Deutschland verbessern“, sagt Dr. Silke Trömel von der Universität Bonn. Sie koordiniert RealPEP, zu dessen Partnern neben der Universität Bonn der Deutsche Wetterdienst, die Freie Universität Berlin, das Forschungszentrum Jülich und das Karlsruher Institut für Technologie gehören. Die Wissenschaftler:innen wollen Informationen aus Niederschlagsabschätzungen und Nowcasting in numerischen Vorhersagemodellen zusammenführen und alle Ergebnisse anschließend in hydrologische Modelle einspeisen. „Auf diese Weise liefern wir Vorhersagen für

Wasserstände und Abfluss, in die zusätzliche Informationen einfließen, etwa über den Zustand des Bodens“, verdeutlicht Silke Trömel. Bis 2024 soll die Entwicklung des Vorhersagesystems abgeschlossen sein.

TERENO steuert Daten seines Wetterradars auf der Sophienhöhe im Observatorium „Eifel/Niederrheinische Bucht“ bei, außerdem Bodenfeuchtedaten vom drahtlosen Sensornetzwerk SoilNet und von Cosmic-Ray-Neutronen-Sensoren. Die Daten helfen, die Ausgangsbedingungen für die hydrologischen Modelle der TERENO-Standorte in Einzugsgebieten etwa von Ammer, Bode und Ruhr besser abzuschätzen. Die Standorte dienen als Testgebiete für RealPEP.

### ► DFG-Forschungsgruppe 2589:

*Near-Realtime Quantitative Precipitation Estimation and Prediction (RealPEP)*

## WASSERKREISLÄUFE BEREITS STARK BEEINFLUSST?



Der TERENO-Standort Selhausen

Zahlreiche Regionen verzeichnen zunehmende Niederschläge, andere scheinen dagegen buchstäblich auszutrocknen. Erklärungsmuster wie „trockene Regionen werden noch trockener und feuchte Regionen erfahren mehr Niederschläge“ greifen jedoch nicht. Einige Veränderungen lassen sich auch mit derzeitigen Klimamodellen nicht hinreichend erklären. Hat der Mensch durch Landnutzungswandel

und intensiviertes Wassermanagement das regionale Klima stärker beeinflusst als bislang angenommen? Ein neuer Sonderforschungsbereich der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der SFB 1502 „Regionaler Klimawandel: Die Rolle von Landnutzung und Wassermanagement“ (DETECT), will dieser These nachgehen.

Die beteiligten Forscher:innen vermuten, dass der Mensch regionale Wasserkreisläufe bereits stark beeinflusst und dadurch zu Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation von Wasser beigetragen hat, die sich wiederum auf die atmosphärischen und terrestrischen Wasserbilanzen in entfernteren Regionen auswirken. In dem SFB, den die Universität Bonn koordiniert, wollen Forscher:innen aus verschiedenen Disziplinen ein Modellsystem entwickeln, das insbesondere die Interaktionen von Mensch und Klima abbildet, die den kontinentalen Wasserkreislauf beeinflussen. TERENO bringt hierfür seine Umweltdaten, Standorte und das Lysimeter-Netzwerk SoilCAN ein.

### ► SFB 1502 DETECT



© Susanna Mohr

Das Gewitter naht: Forscher bei Rottenburg am 29. Juni 2021.

## DER SUPERZELLE AUF DER SPUR

Tausende Blitze, bis zu fünf Zentimeter dicke Hagelkörner, extreme Windböen, heftiger Niederschlag – das Hagelunwetter im Neckartal vom 23. Juni 2021 bot reichlich Daten für die Messkampagne „Swabian MOSES“ der Helmholtz-Initiative MOSES. Rund fünf Monate zwischen Mai und September 2021 hatten Wissenschaftler:innen von neun Einrichtungen – darunter auch die fünf TERENO-Partner – Daten zu Gewittern und Hitzewellen im Neckartal und auf der Schwäbischen Alb gesammelt. Die Auswertungen laufen noch, aber die Nachfolgekampagne ist bereits in Planung – ein Interview mit dem Troposphärenforscher Dr. Andreas Wieser vom Karlsruhe Institut für Technologie, der im Juni 2021 die Messphase zusammen mit seinen Kollegen Prof. Michael Kunz und Dr. Jannik Wilhelm geleitet hatte.

### Herr Dr. Wieser, welche Erkenntnisse konnten Sie bei Swabian MOSES sammeln?

Zunächst haben wir Unmengen wertvoller Daten gesammelt, insbesondere in der 2. Junihälfte mit der Gewitter-Superzelle. Für uns sehr interessant war, dass nicht alle der fünf ausgewerteten operationellen Vorhersagemodelle dieses Wetterextrem vorausgesagt hatten. Die Datenauswertung wird uns helfen, die gesamte Ereigniskette besser zu verstehen und damit langfristig auch die Modelle zu verbessern. Im Sommer 2022 soll das erste Paper erscheinen.

### Ist es schwierig, solche Superzellen vorherzusagen?

Ja, aufgrund der chaotischen Natur der Atmosphäre ist es nach wie vor eine große Herausforderung. Hochwasser wie etwa an Elbe oder Rhein oder Flutkatastrophen nach Starkregen wie im Ahrtal im Juli 2021 lassen sich zuverlässig mehrere Tage im Voraus vorhersagen. Bei Superzellen können wir das oft nur wenige Stunden vorher und selbst da bleiben Unsicherheiten. Wir hatten etwa in der zweiten Junihälfte während einer Woche nahezu jeden Tagen Hinweise auf hochreichende Konvektion, schwere Gewitter bzw. Superzellen gab es allerdings nur am 23. und am 28./29.

### Was ist an einer Superzelle so besonders?

Gewitter entstehen durch sogenannte Konvektion. Dabei wird die Bodenoberfläche aufgeheizt, feucht-warme Luft steigt auf und daraus entsteht in der Atmosphäre eine Gewitterwolke. Feucht-warme Luft kann auch aufsteigen, wenn Luftmassen Gebirge umströmen und wieder aufeinander treffen. Solche Gewitter dauern etwa eine halbe Stunde, danach geht ihnen die Energie aus, weil ziemlich rasch keine feuchtwarme Luft mehr nachströmt. Bei Superzellen, kommt der Faktor Wind hinzu. Manchmal, wenn kräftiger Wind weht, ändern sich mit der Höhe die Windrichtung und -geschwindigkeit. Dadurch werden Auf- und Abwindbereiche getrennt und es kommt zu einer Rotation der Luftmassen, wodurch das Gewitter weiter wandert und sich intensivieren kann. So eine Superzelle kann rund sechs Stunden lang für Blitze, Hagel und Starkniederschlag sorgen.

### Sind Superzellen ein häufiges Phänomen?

Glücklicherweise treten sie in Deutschland selten auf. Unser Untersuchungsgebiet in Baden-Württemberg, das etwa den Bereich zwischen Stuttgart und Donaueschingen abdeckte, gilt jedoch als Schwerpunkt. Rund acht Mal pro Jahr kommt es hier zu solchen Extremereignissen. 2021 könnte Sahara-Staub ein Hemmfaktor gewesen sein.

### Wieso ausgerechnet Sahara-Staub?

In der ersten Junihälfte haben wir viel Sahara-Staub in der Atmosphäre gemessen. Starke Luftströmungen hatten ihn von Afrika nach Europa getragen. Staub, also kleine Teilchen, in der Luft, absorbieren Strahlung – oder anders ausgedrückt: Es kommt zur Erwärmung im Bereich der Staubschicht, und reduziert die Erwärmung des Erdbodens. Das hemmt die Entstehung von Konvektion und damit von Superzellen. Die genauen Zusammenhänge versuchen wir gerade aus den Daten abzuleiten.

### Nächstes Jahr steht eine neue Kampagne an. Was ist geplant?

Bei Swabian MOSES 2.0 wollen wir auch urbane Gebiete einbeziehen. Eventuell werden wir das Untersuchungsgebiet ein wenig verändern. Dann wäre der TERENO-Standort Fendt Teil des Gebiets und wir können zusätzlich zu unseren Messflugzeugen und diversen Instrumenten wie Radiosonden, Cosmic-Ray-Sensoren und Energiebilanzstationen die dortigen Geräte nutzen. Außerdem werden vermutlich mehr Partner dabei sein. Und da es in Baden-Württemberg im Sommer 2021 im Gegensatz zu den vorangegangenen Jahren keine Hitzewelle gab, können wir 2023 unter Umständen auch hierzu weitere Daten sammeln.

► **Messkampagne Swabian MOSES 2021**



© FZ Jülich/Marius Schmidt

Der 38 Meter hohe Messturm am Wüstebach

## ICOS ZERTIFIZIERT MESSTURM AM WÜSTEBACH

Die europäische Forschungsinfrastruktur „Integrated Carbon Observation System“, kurz ICOS, hat den Messturm am TERENO-Standort Wüstebach als „Associate Station“ zertifiziert. Mit der Zertifizierung stellt ICOS sicher, dass Stationen Treibhausgase qualitativ hochwertig und nach gleichen Standards erfassen.

Das ICOS-Netzwerk umfasst 149 Stationen in 14 Ländern. Sie liefern unter anderem Daten zum Austausch von Treibhausgasen zwischen Boden, Pflanzen und Atmosphäre in Europa, insbesondere von CO<sub>2</sub> und Wasserdampf. Sie erfassen darüber hinaus Klimaparameter wie Niederschlag, Strahlung sowie Temperatur von Luft und Boden. Auch die Entwicklung des Pflanzenbestandes wird beobachtet. „Bis Mai 2022 wurden 104 Stationen überprüft und je nach Grad der Standardisierung und Umfang des Messprogramms in eine der drei Klassen C1, C2 sowie ‚assoziert‘ eingestuft. Um die Qualität dauerhaft zu

gewährleisten, werden die Messdaten der Stationen auch nach Vergabe des Zertifikats permanent kontrolliert“, sagt Marius Schmidt, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich und Mitarbeiter im Ökosystemprogramm von ICOS.

Nachdem der 38 Meter hohe Messturm am Waldstandort Wüstebach das anspruchsvolle Kontrollprogramm erfolgreich durchlaufen hat, sind jetzt alle drei ICOS-Standorte des TERENO-Observatoriums „Eifel/Niederrheinische Bucht“ zertifiziert. Der Ackerstandort Selhausen wurde 2019 in die höchstmögliche Klasse C1 eingestuft, der Grünlandstandort Rollesbroich 2021 als „assoziert“. Ebenfalls bereits zertifiziert sind die TERENO-Standorte Fendt (C1), Graswang (assoziert) und Schechenfilz (assoziert) im Observatorium „Alpenvorland“ sowie Hohes Holz (C1) und Großes Bruch (assoziert) im Observatorium „Harz/Mitteldeutsches Tiefland“.

Alle Daten sind über das ICOS-Datenportal frei verfügbar.

► [ICOS-Datenportal](#)

## ZWEITE PHASE GESTARTET

Die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschungsgruppe „Cosmic Sense“ ist in ihre zweite Projektphase gestartet. Die Forschungsgruppe arbeitet daran, die Messung des Wassergehalts im Boden zu verbessern. Dafür setzt sie auf das sogenannte Cosmic-Ray Neutron Sensing (CRNS). In den kommenden drei Jahren wollen die beteiligten Partner – darunter vier der fünf an TERENO beteiligten Helmholtz-Zentren – die Messmethode weiter verbessern und etwa größere Flächen erfassen.

CRNS-Sensoren erfassen die Neutronenstrahlung, die von der Landoberfläche reflektiert wird. Aus der Strahlung lässt sich ableiten, wie viel Wasser in der Landschaft gespeichert ist. In den ersten drei Jahren haben die Partner insbesondere Neutronendetektoren weiterentwickelt, die Interpretation der gemessenen Signale verbessert und mobile Anwendungen getestet: etwa mit CRNS-Sensoren bestückte Geländewagen sowie ein Luftschiff. „Insgesamt hat der Einsatz von CRNS zu erheblichen Fortschritten bei der Erfassung von Bodenfeuchtemustern geführt“, berichtet der Sprecher von „Cosmic Sense“, Prof. Sascha Oswald von der Universität Potsdam.

In der zweiten Phase soll die Methode weiterentwickelt und etwa der Einfluss von Schnee auf Messergebnisse untersucht werden.

„Zudem wollen wir durch eine Kombination aus Fernerkundungs- und Modellierungsdaten, geschickt positionierten CRNS-Sonden und mobilen Messungen, etwa mit Gondelfahrten, die Anwendung auf größere Flächen ausweiten“, so Sascha Oswald. Wie schon in der ersten Phase sollen unter anderem an TERENO-Standorten Messkampagnen durchgeführt werden.



► DFG-Forschungsgruppe „Cosmic Sense“

Neuer Standort von Cosmic Sense: die Alpen

© Sascha Oswald

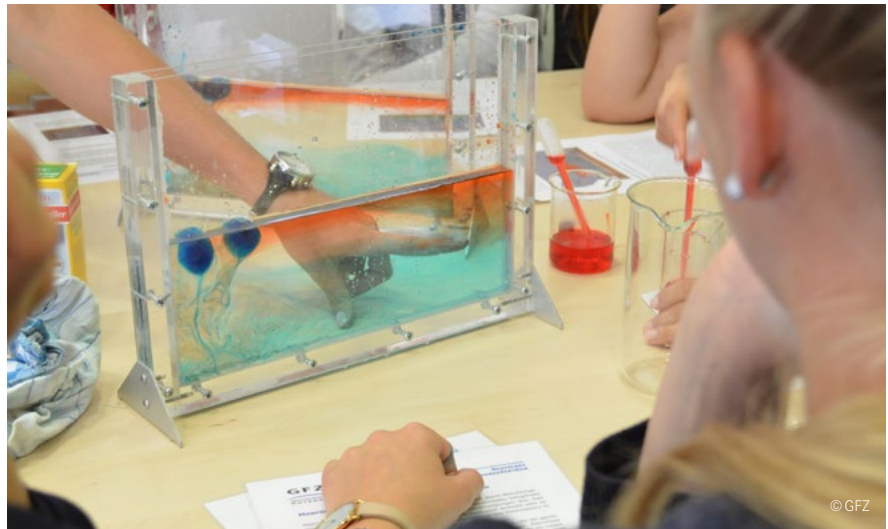
## VON DER SCHULBANK INS LABOR

Die Welt der Wissenschaft entdecken, experimentieren oder gar selbst forschen – in Deutschland gibt es zahlreiche Angebote, um die Jugend für Wissenschaft zu begeistern. Die Palette reicht von Wettbewerben wie „Jugend forscht“ über ein Schnupperstudium an einer Uni bis hin zu Schülerlaboren. Auch die an TERENO beteiligten Helmholtz-Zentren haben regelmäßig Schülerinnen und Schüler zu Gast.

Das Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungszentrum GFZ hat zum Beispiel ein eigenes Schülerlabor, das unter anderem Kurse für Vor- und Grundschulklassen sowie für Klassen der Sekundarstufe I und II anbietet. „Schülerlabore ermöglichen durch deren direkte Anbindung an eine Forschungseinrichtung, neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in die Schulen zu kommunizieren. So können wir beispielsweise eine Umweltbildung auf dem aktuellen Stand der Forschung anbieten“, sagt Manuela Lange, die am GFZ für den Wissenstransfer in die Schulen zuständig ist. Auch die Arbeiten im TERENO-Observatorium „Nordostdeutsches Tiefland“ (TERENO-NO) fließen hier mit ein. „Wir nutzen sie als regionales Beispiel, um wissenschaftliche Arbeitsweisen und Erkenntnisprozesse zu erklären“, so Manuela Lange.

Im Kurs „Das System Klima - dem Klimawandel auf der Spur“ lernen die Schüler:innen etwa die an den TERENO-Standorten übliche Datenerhebung mit verschiedenen Messinstrumenten und Messmethoden sowie deren Analyse kennen. „Unter anderem gehen wir auf die Rolle von Mooren beim Austausch von Treibhausgasen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre ein. Leider können wir das nicht vor Ort im Gelände machen, durch die räumliche Entfernung Potsdams zu den Standorten wäre das mit einem zu großen Zeitaufwand verbunden“, erläutert die Geowissenschaftlerin.

Zusätzlich bekommen Schüler:innen der Sekundarstufe II aus einer Kooperationsschule des GFZ eine Einführung in die Untersuchungsmethoden, mit denen in TERENO-NO Seesedimente als Geoarchive untersucht werden. Sie durchlaufen dabei alle Arbeitsschritte: von der Bohrung im Seeboden vor Ort bis zur Laboruntersuchung und Datenauswertung am GFZ. Dieses Wissen hilft ihnen bei Fach- und Seminararbeiten. Eine Seminararbeit zum Thema „Äußere Einflüsse auf künstliche und natürliche Gewässer“ wurde sogar für den Landeswettbewerb „Jugend forscht“ 2022 eingereicht.



Wichtiger Bestandteil der Kurse am GFZ-Schülerlabor: praktische Übungen, etwa zum Einfluss der Temperatur auf Meeresströmungen

### Ein unüblicher Weg

Sogar selbst forschen können Schülerinnen des Münchner Mädchen-Gymnasiums Max-Josef-Stift dank der Kooperation mit dem Campus Alpin des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Seit 2012 führen das KIT-Institut für Meteorologie und Klimaforschung (KIT/IMK-IFU) in Garmisch-Partenkirchen und das Gymnasium gemeinsame Projekte durch. Teilnehmerinnen des Wissenschaftspropädeutischen Seminars im Fach Biologie lernen dabei wissenschaftliche Messmethoden und Datenauswertung zur Quantifizierung von Treibhausgasen kennen. Davon profitieren Bildung und Forschung: Die Schülerinnen verstehen, welche Rolle Ökosysteme im Klimageschehen spielen, ob sie Senken oder Quellen von Treibhausgasen sind und welche Abhängigkeiten dahinterstecken. Die Wissenschaft erhält sauber erhobene Daten.

„Am Anfang der Zusammenarbeit hatten wir uns bewusst für einen eher unüblichen Weg entschieden. Zwei Fragen waren ausschlaggebend: Können Schule-Forschungskooperations-Projekte wissenschaftlich valide Daten liefern? Und wie müssen solche Projekte strukturiert sein, um erfolgreich zu sein?“, erinnert sich Dr. Ralf Kiese vom KIT/IMK-IFU. Daraus entwickelte sich eine Art schulbasiertes Citizen Science, bei dem die Schülerinnen mithilfe einer im TERENO-Observatorium „Voralpenland“ etablierten Methode selbstständig Treibhausgase messen.

▶ GFZ-Schülerlabor

### Messen und analysieren

Nach einer Einweisung durch die Forscher:innen führen die Schülerinnen während der Vegetationsperiode monatelang selbstständig manuelle Kammermessungen auf verschiedenen landwirtschaftlich genutzten Böden im Umland der Schule durch. Bei den Messungen müssen die Schülerinnen innerhalb von 45 Minuten in Abständen von 15 Minuten Proben der in der Messkammer eingeschlossenen Luft nehmen. Das Labor des KIT/IMK-IFU analysiert anschließend die CO<sub>2</sub>-, Methan- und Lachgas-Konzentrationen der Proben. Danach prüfen die Schülerinnen mithilfe der Tabellenkalkulation Excel die Qualität der Daten und berechnen die Flussraten für die Treibhausgase. Zum Abschluss stellen sie den Wissenschaftler:innen die Ergebnisse ihrer Seminararbeiten bei einer Präsentation am KIT IMK-IFU vor und lernen bei einer Führung weitere Themen und Messmethoden der Klimaforschung kennen.

„Die in dieser Schule-Wissenschaft-Kooperation erhobenen Daten zum Treibhausgasaustausch von landwirtschaftlichen Ökosystemen sind absolut valide. Derzeit werden die mehrjährigen Zeitreihen im Rahmen einer Publikation zusammengestellt“, berichtet Ralf Kiese.

▶ Schule-Forschungs-Kooperation  
Max-Josef-Stift/Karlsruher Institut  
für Technologie, Institut für  
Meteorologie und Klimaforschung

## COSMOS-EUROPE: LANGZEITDATEN ZUR BODENFEUCHTE VERÖFFENTLICHT

In den letzten zehn Jahren gab es in Europa die schwersten Dürreperioden seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Um solche Veränderungen zu erfassen und Vorhersagen zu treffen, wird eine Sammlung aus harmonisierten Langzeitdatensätzen für den gesamten Kontinent benötigt. Die Basis dafür hat nun COSMOS-Europa veröffentlicht, ein europäisches Netzwerk zur Erfassung der Bodenfeuchte mithilfe von Cosmic-Ray-Neutron-Sensoren (CRNS). Die TERENO-Standorte sind Teil des Netzwerks.

„Solche Datensätze sind von besonderer Bedeutung für die Analyse extremer Klimaereignisse auf kontinentaler Ebene. Die COSMOS-Europa-Daten zeigen zum Beispiel, dass die Bodenfeuchte seit 2018 das ganze Jahr über niedriger ist, was auf einen langfristigen Abwärtstrend der Bodenfeuchte hinweist“, sagt der Erstautor der Studie, Dr. Heye Bogena vom Forschungszentrum

Jülich. In den Datensatz flossen Messungen von 66 CRNS ein, die von 24 Institutionen betrieben werden und über die wichtigsten Klimazonen in Europa verteilt sind. Alleine 26 Sensoren stehen in den TERENO-Observatorien.

„Die Datenverarbeitung erfolgte nach harmonisierten Protokollen und mit modernsten Methoden, um konsistente und vergleichbare Bodenfeuchteprodukte zu erzeugen“, erläutert Heye Bogena. Er und seine Kolleg:innen erhoffen sich von den Daten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten

für die Umweltforschung – zum Beispiel die Validierung von Fernerkundungsdaten, Trendanalysen oder Datenassimilation in Modellen. Allerdings ist bisher nur der zentrale Teil Europas besonders gut durch COSMOS-Europa abgedeckt, während es in den Randgebieten Europas noch große Lücken gibt. Das Netzwerk möchte daher Länder mit nur wenigen oder gar keinen CRNS-Stationen motivieren, zusätzliche Stationen aufzubauen. Außerdem soll gemeinsam mit kontinentalen Netzwerken in den USA, Australien und Indien ein globales COSMOS-Netz entstehen.

**Heye Bogena et al. (2022).** *COSMOS-Europe: a European network of cosmic-ray neutron soil moisture sensors.* *Earth System Science Data, Band 14, Seiten 1125–1151.*

▶ [DOI: 10.5194/essd-14-1125-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-1125-2022)

**Dataset of COSMOS-Europe**

▶ [DOI: 10.34731/x9s3-kr48](https://doi.org/10.34731/x9s3-kr48)

## STÄDTE NACHHALTIGER UND WIDERSTANDSFÄHIGER MACHEN

Städte und städtische Gebiete gelten als besonders anfällig für Umweltveränderungen und zerstörerische Naturereignisse. Die neue Helmholtz-Initiative Resilient Urban Spaces möchte die Risiken für Städte mindern und sie anpassungs- und widerstandsfähiger machen. TERENO unterstützt die Initiative.

„Wenn wir uns mit Klimawandel, Umweltveränderungen und deren Folgen für das System Erde beschäftigen, müssen wir auch städtische Gebiete berücksichtigen“, sagt Prof. Bernd Hansjürgens vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Denn knapp über die Hälfte der Menschen auf unserem Planeten leben heute in Städten. Bis 2030 sollen es laut Schätzungen der Vereinten Nationen sogar zwei Drittel sein.

„Dabei müssen wir Städte sowohl als Verursacher als auch als Opfer betrachten“, so der Umweltökonom. Einerseits sind Städte für etwa 80 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs und für über 70 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, andererseits wirken sich etwa extreme Wetterereignisse besonders stark auf Städte aus. Bei Hitzewellen ist es zum Beispiel in Städten noch heißer als in der Umgebung. Der Hitzestau in den Häuserschluchten hat mehrere Ursachen: etwa die dichte Bebauung, wärmespeichernde Oberflächen aus Beton, Glas oder Metall sowie die Versiegelung der Böden.

Forscher:innen von acht Helmholtz-Zentren wollen Wege aufzeigen, wie Städte nachhaltiger und widerstandsfähiger werden und wie Menschen trotz Klimaveränderungen unter guten und gesunden Umweltbedingungen in Städten leben können. Dazu bauen sie derzeit die Helmholtz-Initiative Resilient Urban Spaces auf. „Wie bei der Umweltbeobachtung in den TERENO-Observatorien benötigen wir Messnetze, um den Zustand zu erfassen – vom Grundwasser über Luftqualität und Wechselwirkungen zwischen städtischer Struktur und Atmosphäre, bis hin zu Ressourcen- und Materialströmen“, erläutert Bernd Hansjürgens, der die Initiative gemeinsam mit Prof. Fabrice Cotton vom Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungszentrum GFZ und Prof. Hans-Peter Schmid vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) koordiniert. Die Forscher:innen wollen etwa auch die Nahrungsmittelversorgung und die Stadt-Umland-Beziehungen untersuchen.

„Für viele Themen gibt es bereits Ansätze bei den beteiligten Helmholtz-Zentren. Wir wollen diese zusammenführen“, so der UFZ-Wissenschaftler. Dabei hat die Initiative nicht nur deutsche Städte im Visier, sondern zum Beispiel auch Istanbul, Daressalam oder Santiago de Chile.



Santiago de Chile drohen zunehmende Hitze und Trockenheit.





Hügel und Äcker prägen das Einzugsgebiet der Quillow

## AGROSCAPELAB QUILLOW MIT NEUER WEBSEITE

Das Einzugsgebiet des Quillow in der Uckermark gehört zu den trockensten Regionen in Deutschland. Rund 560 Liter Niederschlag pro Quadratmeter fallen dort im Jahr. Der Durchschnitt lag 2021 bundesweit bei 805 Litern. Das rund 170 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet ist Teil des TERENO-Observatoriums „Nordostdeutsches Tiefland“. Schwerpunkt der Forschung in dem Gebiet ist das vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) koordinierte Landschaftslabor AgroScapeLabQuillow (ASLQ). Im ASLQ werden langfristige systematische und kontinuierliche Messungen sowie Prozessstudien zu Landschaftsprozessen und Landschaftsexperimente durchgeführt. Die Landschaft dort ist geprägt von sanften Hügeln und einer Vielzahl kleiner Standgewässer, den Söllen. Rund zwei Drittel der Fläche werden landwirtschaftlich genutzt. Der intensive Ackerbau hat in den letzten Jahrhunderten zu einer starken Bodenerosion geführt. Eine neue Website gibt umfassend Auskunft über die Arbeiten im ASLQ.

▶ [AgroScapeLabQuillow \(in Englisch\)](#)

## WASSERABFLUSS: AUF DER SUCHE NACH WIEDERKEHRENDEN MUSTERN

Der Prozess bleibt immer gleich: Es regnet, das Wasser versickert, es fließt ab und gelangt in Gewässer, verdunstet anschließend, bildet Wolken und fällt irgendwann wieder als Niederschlag auf die Erde. Aber läuft jeder einzelne Schritt stets nach demselben Muster ab? Wenn etwa in einer Region wiederholt dieselbe Menge Regen auf den Boden prasselt, fließt das Wasser immer gleich ab? Das wollen österreichische Forscher:innen von der Universität für Bodenkultur Wien in Zusammenarbeit mit TERENO im Projekt REPEAT herausfinden. Der österreichische Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) unterstützt das Vorhaben.

„Konkret untersuchen wir den sogenannten Niederschlag-Abfluss-Prozess, also wie Niederschläge durch ein Einzugsgebiet eines Gewässers transportiert werden und schließlich zu Wasserabfluss führen“, erläutert Projektleiter Dr. Michael Stockinger. Bekannt ist, dass mehrere Faktoren diesen Prozess beeinflussen – vor allem topologische und geologische Bedingungen, Landnutzung sowie Einflüsse des Menschen. Das Problem: „Es ist nicht genau klar, wie diese Faktoren den Prozess beeinflussen. Das liegt unter anderem daran, dass der Wasserfluss im Boden unsichtbar ist und sich derzeit nicht in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung messen lässt, um genau zu sagen, wie Abfluss durch Niederschlag entsteht“, sagt der Wiener Forscher.

### TERENO-Daten als Basis

Helfen sollen die umfangreichen Daten von zwei TERENO-Standorten, dem Waldstandort Wüstebach und dem Grünlandstandort Rollesbroich. Die Forscher:innen wollen die TERENO-Daten mit künstlich generierten Daten kombinieren. „Zunächst wollen wir über eine Analyse der Daten herausfinden, wie ähnliche Niederschlagsmuster definiert werden können. Wissen wir, was alles zu so einem Muster gehört, können wir nach wiederkehrenden Mustern in hydrologischen Daten suchen“, erläutert Adriane Hövel, Doktorandin im REPEAT-Projekt.

Eine wesentliche Komponente ist die Zeit, die ein Wasserteilchen auf seinem Weg durch ein Einzugsgebiet verbringt. Die Fließzeit ist gleichzeitig eine wichtige Größe für die Bewertung der Wasserqualität. „Sie verrät uns etwas über die Verteilung von gelösten Stoffen, dazu zählen auch Schadstoffe. Denn die meisten gelösten Stoffe werden hauptsächlich durch Wasser transportiert“, so Hatice Türk, ebenfalls Doktorandin im REPEAT-Projekt.

Deshalb wollen die Forscher:innen stabile Wasserisotope als Tracer verwenden. Isotope sind spezielle Arten von Atomen. Die Daten fließen in ein hydrologisches Modell ein. „Auf diese Weise wollen wir den tatsächlichen Wasserfluss im Boden erforschen und mehr über die Faktoren erfahren, die den Niederschlag-Abfluss-Prozess



Messstation am TERENO-Standort Wüstebach

beeinflussen. Unsere Ergebnisse sollen am Ende helfen, bessere Wasserbewirtschaftungsstrategien zu entwickeln“, fasst Michael Stockinger zusammen.

## EFFIZIENT BEWÄSSERN



© Hellenic Agricultural Organisation / Anna Chatzi

Die Zahl der Menschen auf unserem Planeten wächst kontinuierlich. Das gilt nicht für unsere Ressourcen. Wasser zum Beispiel wird infolge des Klimawandels in den nächsten Jahrzehnten sogar knapper. „Um alle Menschen zu ernähren, müssen wir künftig mehr Nahrungsmittel mit weniger Ressourcen produzieren“, sagt Dr. Cosimo Brogi, Postdoktorand am Forschungszentrum Jülich. Sein Interesse am Thema Wasserknappheit und Landwirtschaft entwickelte sich während seiner Promotion, für die er am TERENO-Agrarstandort Selhausen forschte. Nun möchte der Umweltingenieur Landwirte dabei unterstützen, die potenzielle

Wasserknappheit zumindest teilweise durch sogenannte Präzisionsbewässerung auszugleichen.

Hierbei erhält jeder einzelne Bereich eines Standorts genau so viel Wasser, wie benötigt wird. Dazu muss man möglichst exakt wissen, wie trocken jeder Bereich ist. Brogi setzt hierfür innovative Cosmic-Ray-Neutronensensoren (CRNS) ein. Zusammen mit seinem Jülicher Kollegen Dr. Heye Bogena testet er im EU-Projekt „Agricultural Interoperability and Analysis Systems“ (ATLAS), ob das in der Praxis funktioniert. Die Erkenntnisse sollen helfen, kommerzielle Produkte zu entwickeln, die auf die Bedürfnisse der Landwirte zugeschnitten sind.

Als Erstes haben die Forscher zwei Sensoren in einer Apfelplantage bei Agia in Griechenland installiert, in der Nähe eines Standortes des europäischen CRNS-Netzwerks COSMOS-Europe (siehe Seite 8). „Unsere ersten Ergebnisse sind sehr ermutigend, aber es sind noch einige Herausforderungen zu meistern“, berichtet Brogi. Zum Beispiel müssen die Daten nahezu in Echtzeit an die Plattform geliefert werden, die den Landwirten hilft, Bewässerungszeitpunkt und -menge zu steuern. Und bislang wurde kaum untersucht, ob CRNS sich auch für Gebiete eignet, bei denen die Bodenfeuchte bereits innerhalb eines kleinen Bereichs erheblich schwankt.

## TERENO-WORKSHOP „FROM MEASUREMENTS TO MODELLING“

8. bis 9. November 2022 in Garmisch-Partenkirchen

Der 8. TERENO-Workshop, den das Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU) ausrichtet, beschäftigt sich mit dem Thema „From Measurements to Modelling“. In Fachvorträgen und Workshops präsentieren Forscher:innen ihre Arbeiten zur Integration von Messungen aus TERENO-Observatorien und von anderen Standorten in die Anwendung von hydrologischen, biogeochemischen und Biodiversitäts-Modellen. Themen sind die Anwendung von prozessbasierten Modellen und Applikationen der Künstlichen Intelligenz auf unterschiedlicher Skala (Standort, Einzugsgebiet, regional, national) sowie die Umsetzung von Mess- und Simulationsergebnissen in Entscheidungshilfe-Werkzeuge und Produkte für Stakeholder.

Veranstaltungsort:  
**Dorint-Hotel,  
Garmisch-Partenkirchen**

Am 10. November besteht für Interessierte die Möglichkeit, an einer Exkursion zu Messstandorten des TERENO-Observatoriums „Alpenvorland“ teilzunehmen.

Anmeldung und Kontakt:  
Dr. Ralf Kiese  
Institut für Meteorologie und  
Klimaforschung (IMK-IFU)  
Karlsruher Institut für Technologie  
Tel.: 0 88 21/1 83-1 53

► E-Mail: [ralf.kiese@kit.edu](mailto:ralf.kiese@kit.edu)

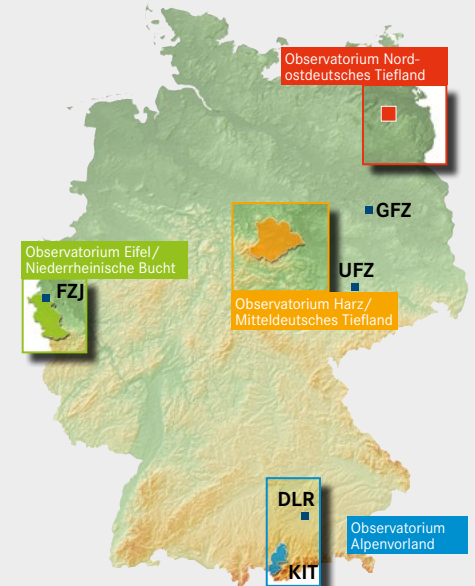
## KONTAKT | KOORDINATION

**Dr. Heye Bogena**  
Institut Agrosphäre (IBG-3)  
Forschungszentrum Jülich  
Tel.: 0 24 61/61-67 52  
E-Mail: [h.bogena@fz-juelich.de](mailto:h.bogena@fz-juelich.de)

**Dr. Ralf Kiese**  
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU)  
Karlsruher Institut für Technologie  
Tel.: 0 88 21/1 83-1 53  
E-Mail: [ralf.kiese@kit.edu](mailto:ralf.kiese@kit.edu)

**Dr. Markus Schwab**  
Deutsches GeoForschungszentrum GFZ  
Tel.: 03 31/2 88 1388  
E-Mail: [markus.schwab@gfz-potsdam.de](mailto:markus.schwab@gfz-potsdam.de)

**Dr. Steffen Zacharias**  
Department Monitoring- und Erkundungstechnologien  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ  
Tel.: 03 41/2 35-13 81  
E-Mail: [steffen.zacharias@ufz.de](mailto:steffen.zacharias@ufz.de)



**FZJ** Forschungszentrum Jülich  
(Koordination)

**DLR** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

**KIT** Karlsruher Institut für Technologie

**UFZ** Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

**GFZ** Helmholtz-Zentrum Potsdam –  
Deutsches GeoForschungszentrum

## IMPRESSUM

**Herausgeber:** TERENO  
**Redaktion:** Christian Hohlfeld  
**Text:** Janosch Deeg, Christian Hohlfeld  
**Grafik und Layout:** Bosse und Meinhard  
Wissenschaftskommunikation