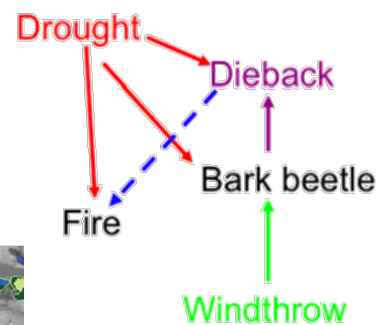
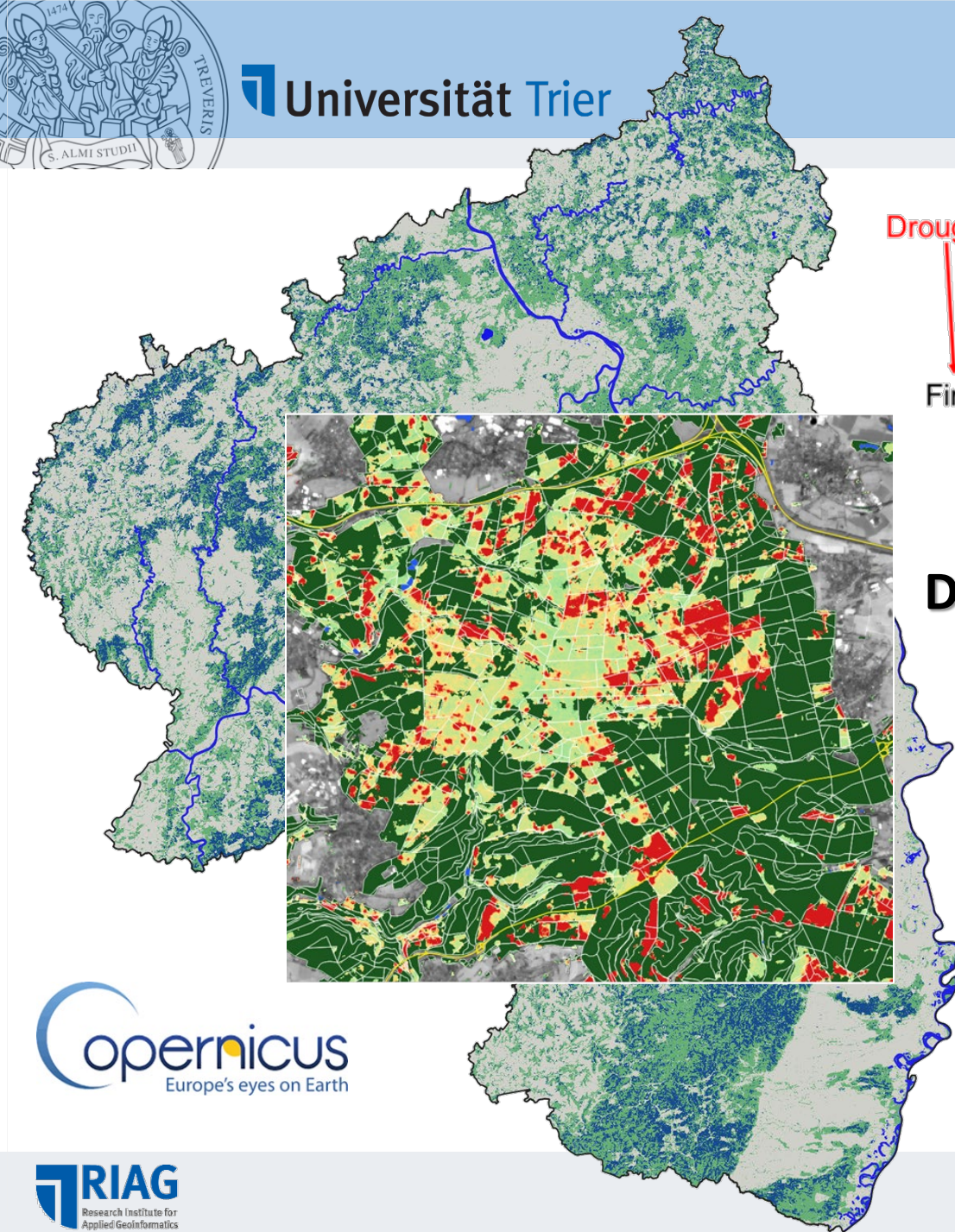


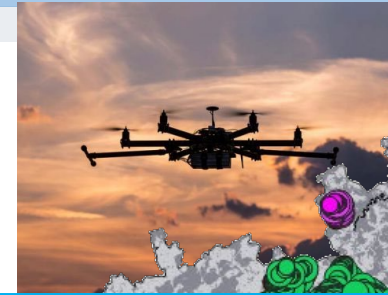


Die Entwicklung einer operativen Sentinel-2-basierten Prozesskette zur landesweiten Bewertung von Vitalitätsverlusten sowie biotischer und abiotischer Waldschäden in Rheinland-Pfalz und Luxembourg

Joachim Hill¹, Henning Buddenbaum¹, Joachim Langshausen², Andreas Hill², Gilles Rock³, Thomas Schneider⁴, David Frantz⁵

- 1) Research Institute für Applied Geoinformatics (RIAG), Universität Trier
- 2) Landesforsten Rheinland-Pfalz, Zentralstelle der Forstverwaltung: Strategische Planung und Serviceleistung, Emmelshausen
- 3) LuxSense Geodata SARL, L-8308 Capellen
- 4) Technische Universität München, Waldinventur und nachhaltige Nutzung, Weihenstephan
- 5) Geoinformatics - Spatial Data Science, Universität Trier

Vitalitätsbewertung und Schadensermittlung von Kalamitäten und Risikostandorten als Grundlage zur Planung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen



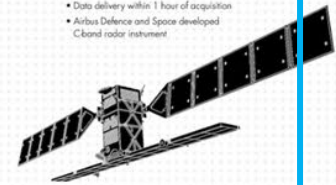
COPERNICUS AND ITS 5 SENTINELS

Observing our planet for a safer world. The European Earth Observation Programme Copernicus provides geo-information products and services based on satellite imagery.

- Known as **GMES** until 2012: Global Monitoring for Environment and Security
- 30** Public and Private missions are also contributing data
- 16** years of development and testing
- Five Sentinel-Missions** at the heart of the space component
- Civil Security.** Allowing early warning and crisis prevention in conflict and disaster areas
- Emergency Management.** Accurate and timely data for emergency plans and rescue for disaster management
- Land Surface Monitoring.** Geographical information on land cover, related variables and urban development
- Marine Environmental Monitoring.** Observations and forecasts on the state of the physical oceans and regional seas
- Climate Change Monitoring.** Helps to understand the reason for climate change, rising sea levels and melting ice caps
- Earth Atmosphere Monitoring.** Daily information on the global atmospheric composition and when Sentinel-4 is in service this will be hourly

SENTINEL-1A/1B

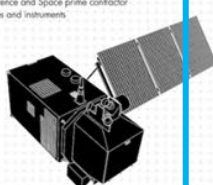
- All-weather, day-and-night radar imaging satellite for land and ocean services
- Able to "see" through clouds and rain
- Data delivery within 1 hour of acquisition
- Airbus Defence and Space developed Ground radar instrument



2014: Sentinel-1A
2015: Sentinel-1B

SENTINEL-2A/2B

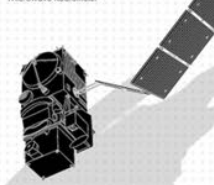
- Medium Res Multispectral optical satellite for observation of land, vegetation and water
- 13 spectral bands with 10, 20 or 60 m resolution and 290km swath width
- Global coverage of the Earth's land surface every 5 days
- Airbus Defence and Space prime contractor for satellites and instruments



2014: Sentinel-2A
2015: Sentinel-2B

SENTINEL-3A/3B

- Measures sea-surface topography with a resolution of 300 m, sea and land surface temperature and colour with a resolution of 1 km
- Measures water vapour, cloud water content and thermal radiation emitted by the Earth
- Determines global sea surface temperatures with an accuracy greater than 0.3 K
- Airbus Defence and Space supplies Microwave Radiometer



2014: Sentinel-3A
2015: Sentinel-3B

SENTINEL-5P

- Global observation of key atmospheric constituents, including ozone, nitrogen dioxide, sulphur dioxide and other environmental pollutants
- Improves climate models and weather forecasts
- Provides data continuously during five-year gap between the retirement of Envisat and the launch of Sentinel-5
- Airbus Defence and Space prime contractor for satellite and TROPOMI instrument



2015: Sentinel-5P

SENTINEL-4

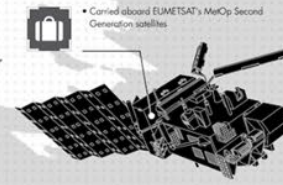
- Provides hourly updates on air quality with data on atmospheric aerosol and trace gas concentrations
- Spatial sampling is 8 km and spectral resolution between 0.12 nm and 0.5 nm
- Airbus Defence and Space prime contractor for spectrometer
- Carried aboard EUMETSAT's Meteosat Third Generation (MTG) satellites



2020: Sentinel-4 with Meteosat-TG

SENTINEL-5

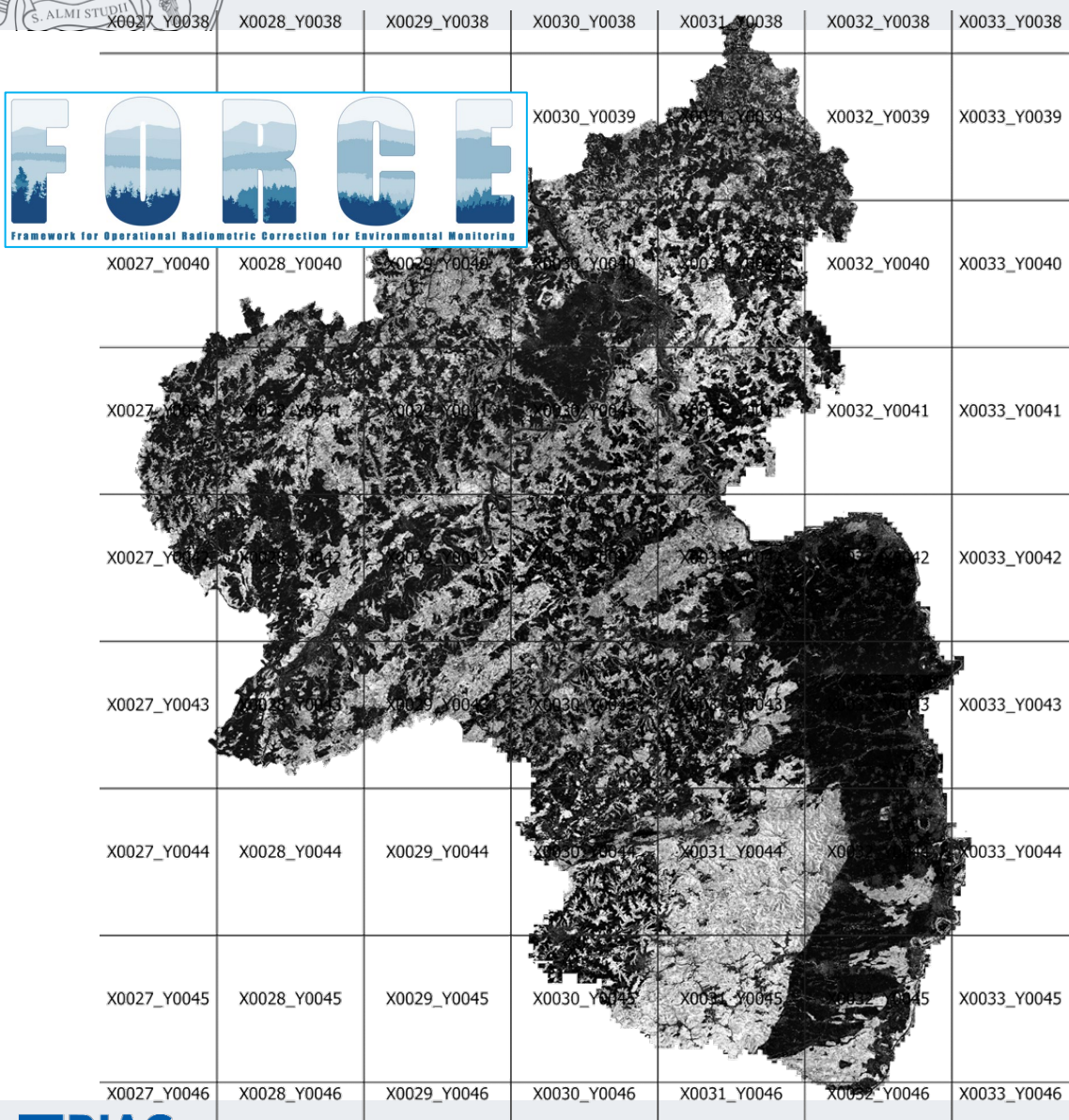
- Measures air quality and solar radiation, monitors stratospheric ozone and the climate
- Global coverage of Earth's atmosphere with an unprecedented spatial resolution
- Airbus Defence and Space prime contractor for instrument
- Carried aboard EUMETSAT's MetOp Second Generation satellites



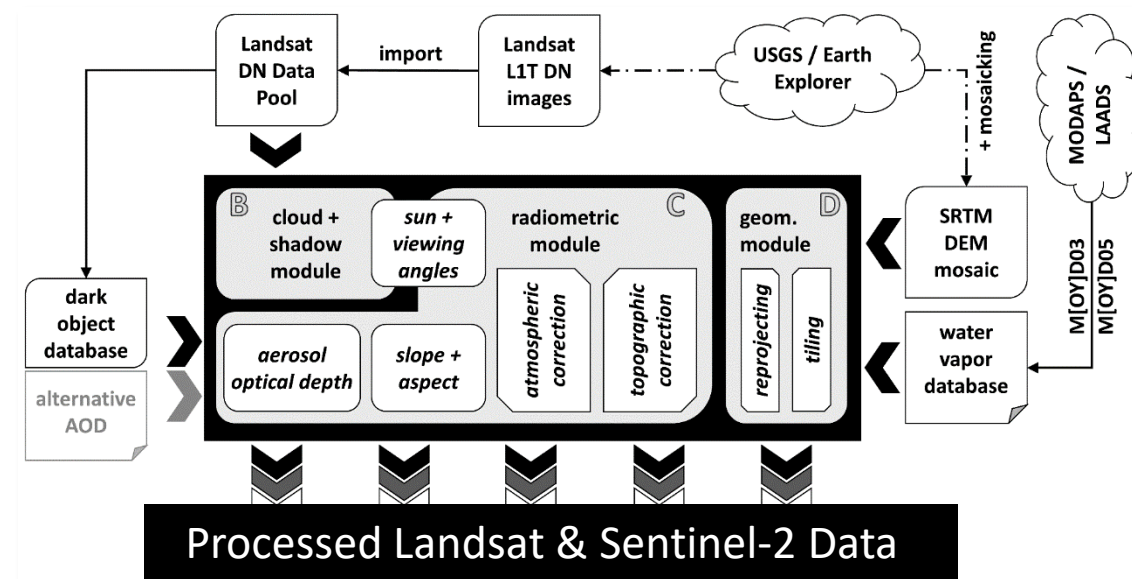
2020: Sentinel-5 with MetOp-SG

Waldfläche RLP
3.400 km² = 840,000 ha

Alternative: Überwachung der Landeswaldfläche
durch Integration kostenfrei verfügbarer
Erdbeobachtungssatelliten



FORCE: Landsat/Sentinel-2 Level 2 Product Generation System – Analysis-Ready Data



P. Rufin, **D. Frantz**, L. Yan, and P. Hostert (2021): Operational Coregistration of the Sentinel-2A/B Image Archive Using Multitemporal Landsat Spectral Averages. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 712-716.

D. Frantz (2019). FORCE—Landsat + Sentinel-2 Analysis Ready Data and Beyond. *Remote Sensing*, 11, 1124.

D. Frantz, E. Haß, A. Uhl, J. Stoffels, and J. Hill (2018). Improvement of the Fmask algorithm for Sentinel-2 images: Separating clouds from bright surfaces based on parallax effects. *Remote Sensing of Environment*, 215, 471-481.

D. Frantz, A. Röder, M. Stellmes, and J. Hill (2016): An Operational Radiometric Landsat Preprocessing Framework for Large-Area Time Series Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (7): 3928-3943.

Komponenten der Sentinel-2-basierten Prozesskette



Spektral ableitbare, ökophysiologisch sensitive Zustandsvariablen auf Bestandsebene



Differenzielle Bewertungsstrategie



Stratifizierung { Aktuell bestockte Waldfläche und Laub- und Nadelwaldverbreitung



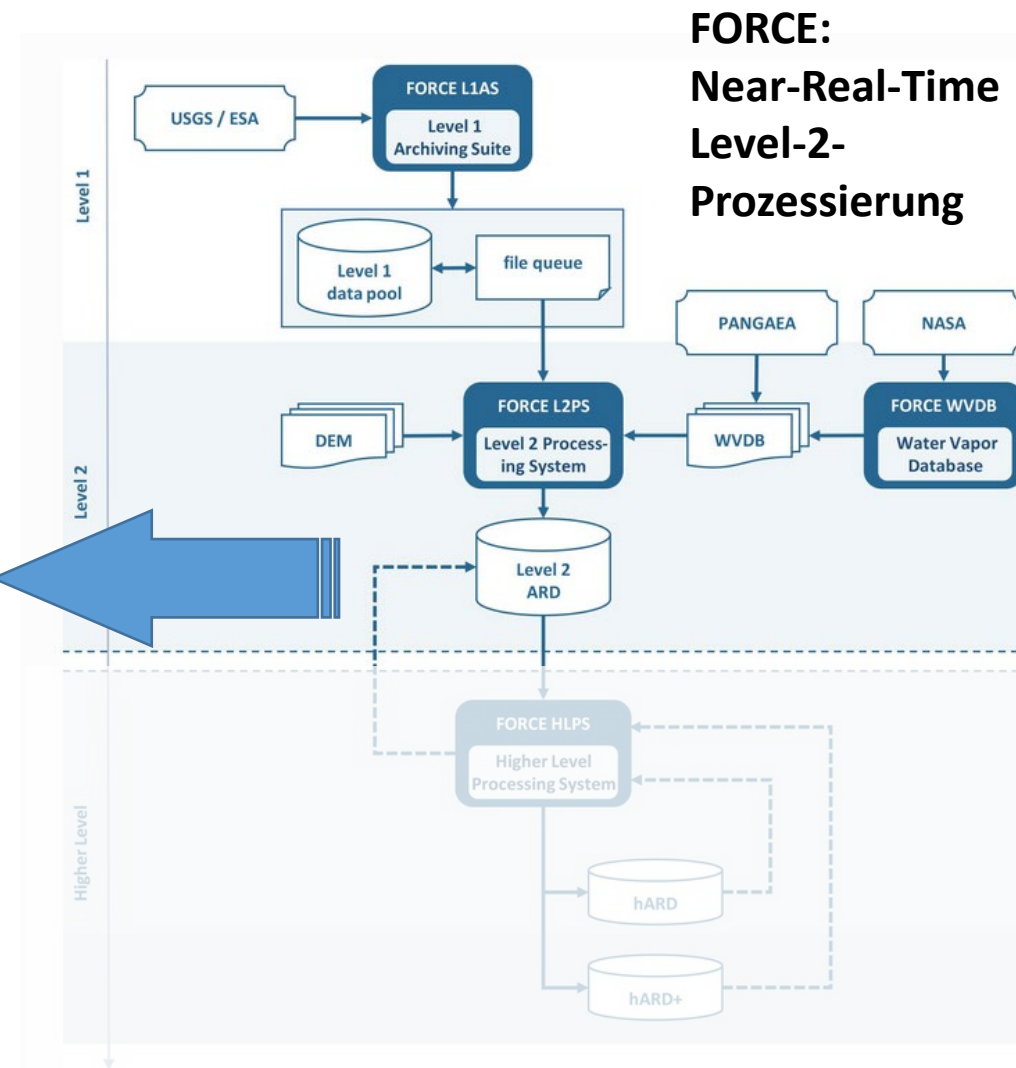
Erstellung radiometrisch optimierter Index-Komposite

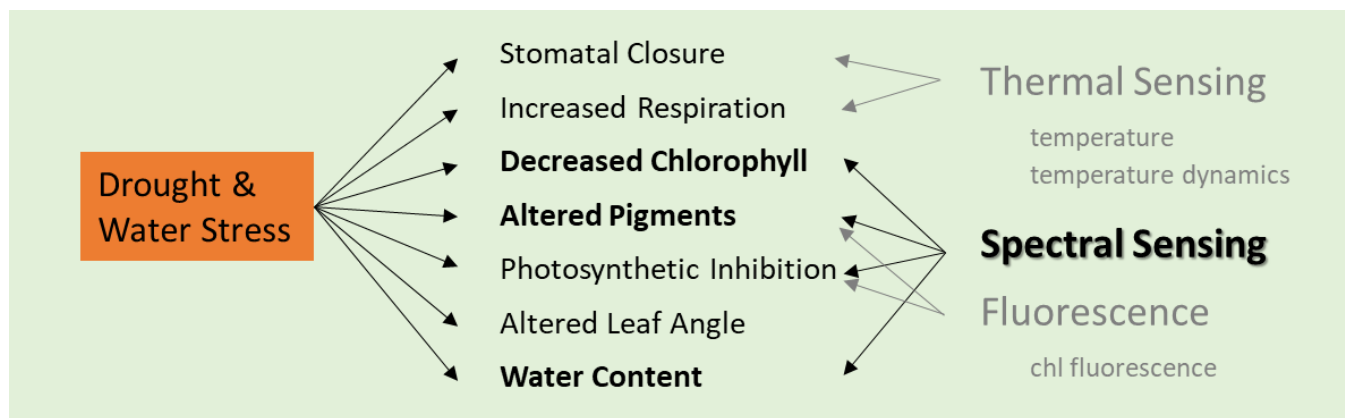


„Combined Vitality Change Index“ (CVCI)

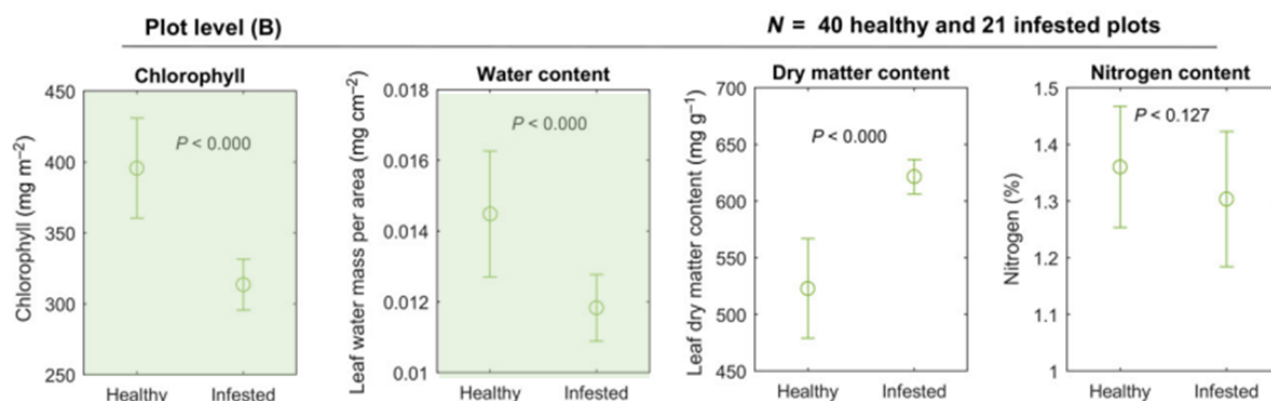


Borkenkäfer-Monitoring RLP, Standortbewertung bei Hitze- und Trockenstress, vorzeitige Laubfärbung LUX, Inventur Buchenzustand RLP





Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications. Oxford University Press.



Abdullah, H., Skidmore, A.K., Darvishzadeh, R., & Heurich, M. (2018). Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 1-20.

Spectral Effects of Insect (Bark Beetle) Infestations

“Chlorophyll degradation and nitrogen deficiency lead to an increase in reflectance spectra in the visible region. Especially reflectance at the green and red-edge wavelengths (centered in 550 nm and 700 nm, respectively) of the VIS region are sensitive to changes in plant chlorophyll content. The red-edge region is also sensitive to detecting changes that are induced in plants by stressors such as dehydration, disease and insect attack, and can, therefore, improve the early detection of plant stress”

Abdullah et al., 2018

Auswahl ökophysiologisch sensitiver Spektralindizes und ihre Berechnung mit Sentinel-2

$$NDVI = \frac{(\rho_{0.835} - \rho_{0.664})}{(\rho_{0.835} + \rho_{0.664})}$$

$$RCHLI = (\rho_{0.782} / \rho_{0.704}) - 1$$

$$NDRE2 = \frac{(\rho_{0.835} - \rho_{0.704})}{(\rho_{0.835} + \rho_{0.704})}$$

$$PSRI = (\rho_{0.664} - \rho_{0.497}) / \rho_{0.740}$$

$$CCI = \frac{(\rho_{(0.497+0.560)/2} - \rho_{0.664})}{(\rho_{(0.497+0.560)/2} + \rho_{0.664})}$$

$$NDII = \frac{(\rho_{1.614} - \rho_{0.865})}{(\rho_{1.614} + \rho_{0.865})}$$

$$MSI = \rho_{1.614} / \rho_{0.865}$$

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). „Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change.“ *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.

Gitelson, A.A., Gritz, Y., & Merzlyak, M.N. (2003). „Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves.“ *Journal of Plant Physiology*, 160, 271-282.

Abdullah, H., A. K. Skidmore, et al. (2018). „Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8.“ *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 1-20.

Merzlyak, M. N., A. A. Gitelson, et al. (1999). "Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening." *Physiologia Plantarum* 106(1): 135-141.

Gamon, John A., et al. (2016). "A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(46): 13087-13092.

Hardisky, M. A., Klemas, V., & Smart, R. M. (1983) "The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77-83.

Hunt, E.R., Rock, B.N. (1989) "Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances." *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-54.



nCHM
SENTINEL-2

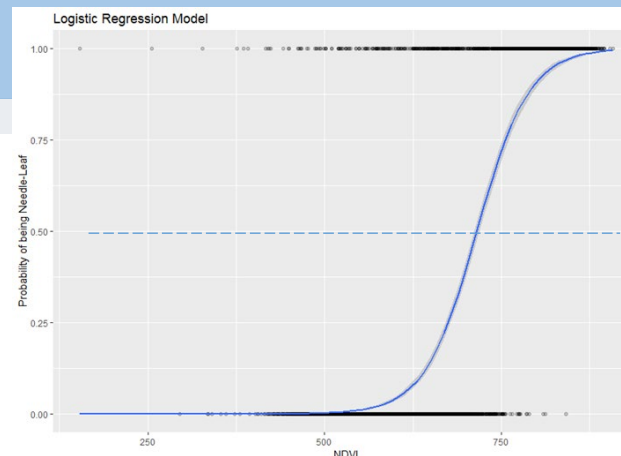
ATKIS

DOP

Bestockte Waldfläche (Stand 2017/18)

Areas Covered by Trees > 3m
Minimum Mapping Unit = 0.1 ha

SENTINEL-2



Laub-/Nadelwald-Klassifikation: Logistische Regression

- Das Logit-Modell kann über die reine Klassifikation hinaus eine Wahrscheinlichkeit dafür prognostizieren, dass ein Pixel einem Waldtyp angehört.
- Die Methodik entspricht dabei weitgehend der der linearen Regression - Hauptunterschied ist, dass bei der linearen Regression die abhängige Variable metrisch ist, während sie beim Logit Modell binär ist (also zwei Ausprägungen hat: Nadelwald: 1 – kein Nadelwald: 0).
- Um die Werte der abhängigen Variablen (hier: VIs zum Zeitpunkt T_0) als Wahrscheinlichkeit zu kodieren, benötigt man eine sogenannte Link-Funktion; bei einer logistischen Regression ist das die Logit-Funktion.

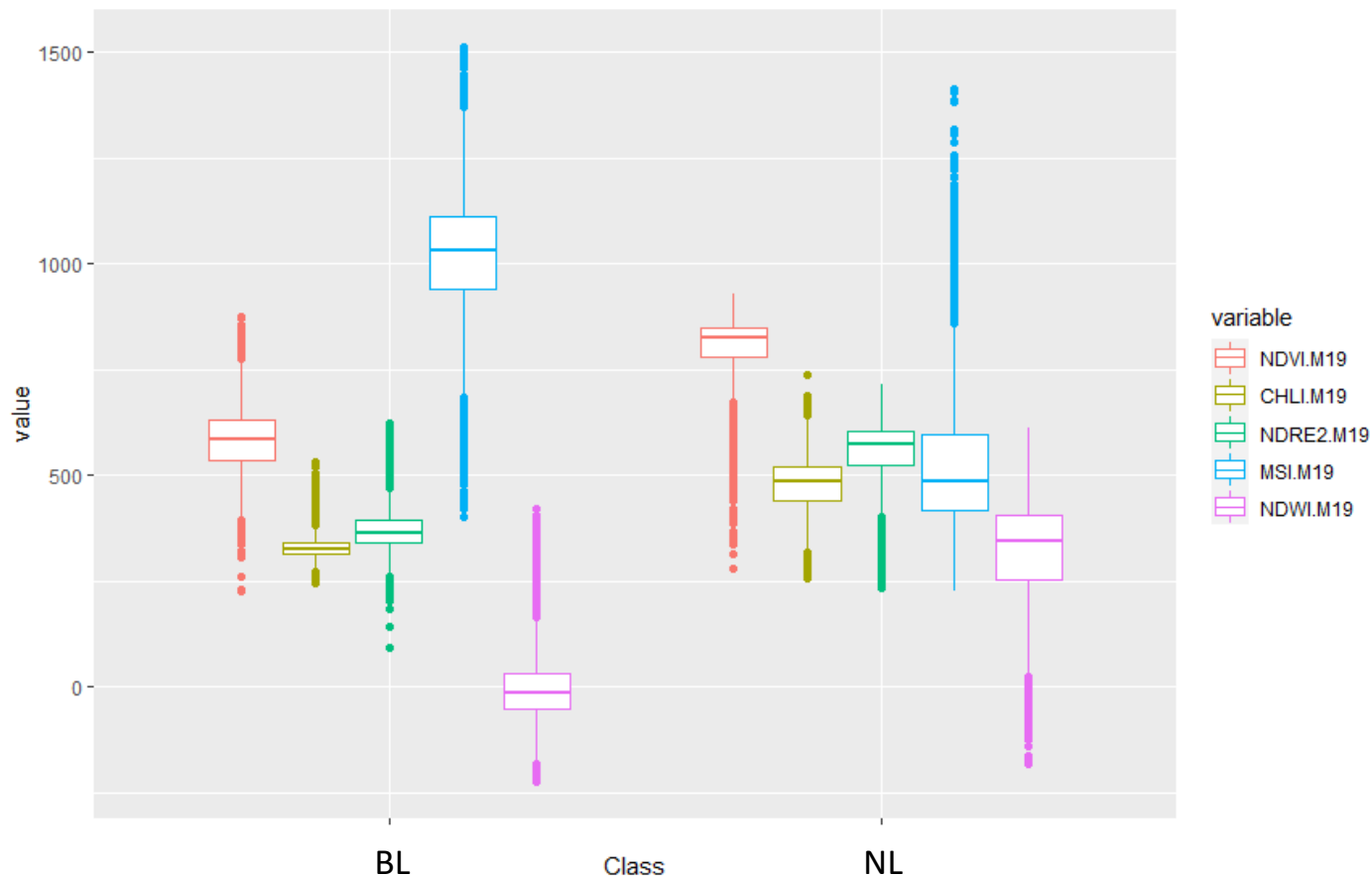
5906 NL samples

16518 BL samples

Total = 22424 samples



Eingangsdaten: 5 VIs März/April 2019

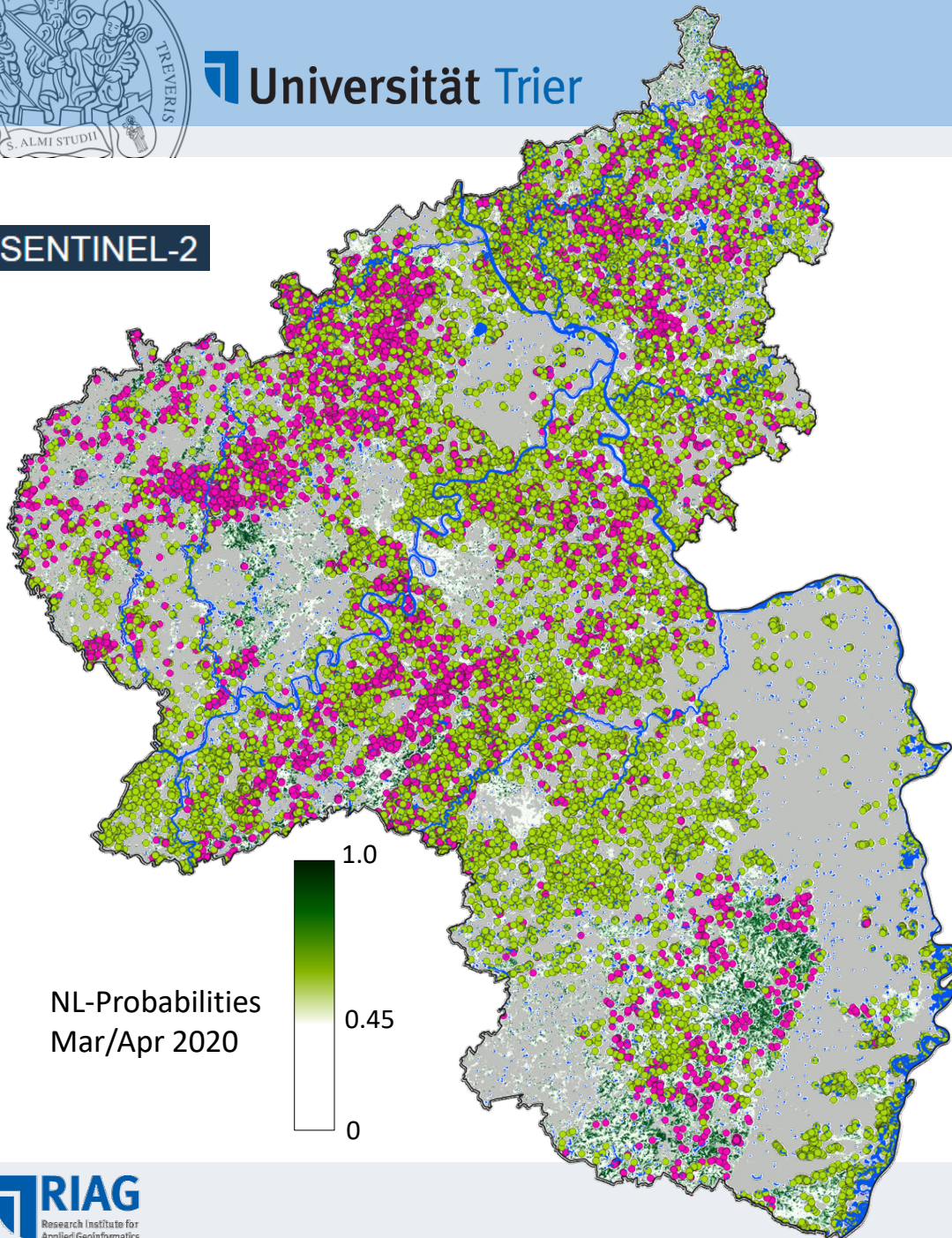


Laub-/Nadelwald-Klassifikation: Logistische Regression

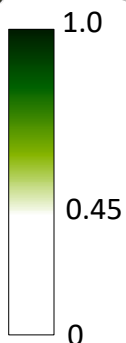
- Das logistische Regressionsmodell zielt darauf ab, mithilfe der logistischen Verteilungsfunktion den Effekt der erklärenden Variablen $x_{i1}, \dots, x_{ik}$ ($i = 1, \dots, n$) auf die Wahrscheinlichkeit für $Y_i = 0$ bzw. $Y_i = 1$ zu bestimmen.
- Die Logit-Funktion

$$\eta = \text{logit}(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right)$$
 transformiert Werte im Bereich von 0 bis 1 in Werte über den gesamten reellen Zahlenbereich $(-\infty, \infty)$.
- Ihre inverse Form gestattet die Umrechnung der Logs in Wahrscheinlichkeiten.

SENTINEL-2



NL-Probabilities
Mar/Apr 2020



Laub-/Nadelwald-Klassifikation: Logistische Regression

```
Call:
glm(formula = Dtrain.data$class ~ NDVI.M19 + CHLI.M19 + MSI.M19,
     family = binomial, data = Dtrain.data)
```

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.2414	-0.2486	-0.1598	0.0068	3.5174

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-8.7683012	1.2277023	-7.142	9.2e-13 ***
NDVI.M19	-0.0175215	0.0014048	-12.473	< 2e-16 ***
CHLI.M19	0.0652445	0.0033715	19.352	< 2e-16 ***
MSI.M19	-0.0060112	0.0005498	-10.934	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

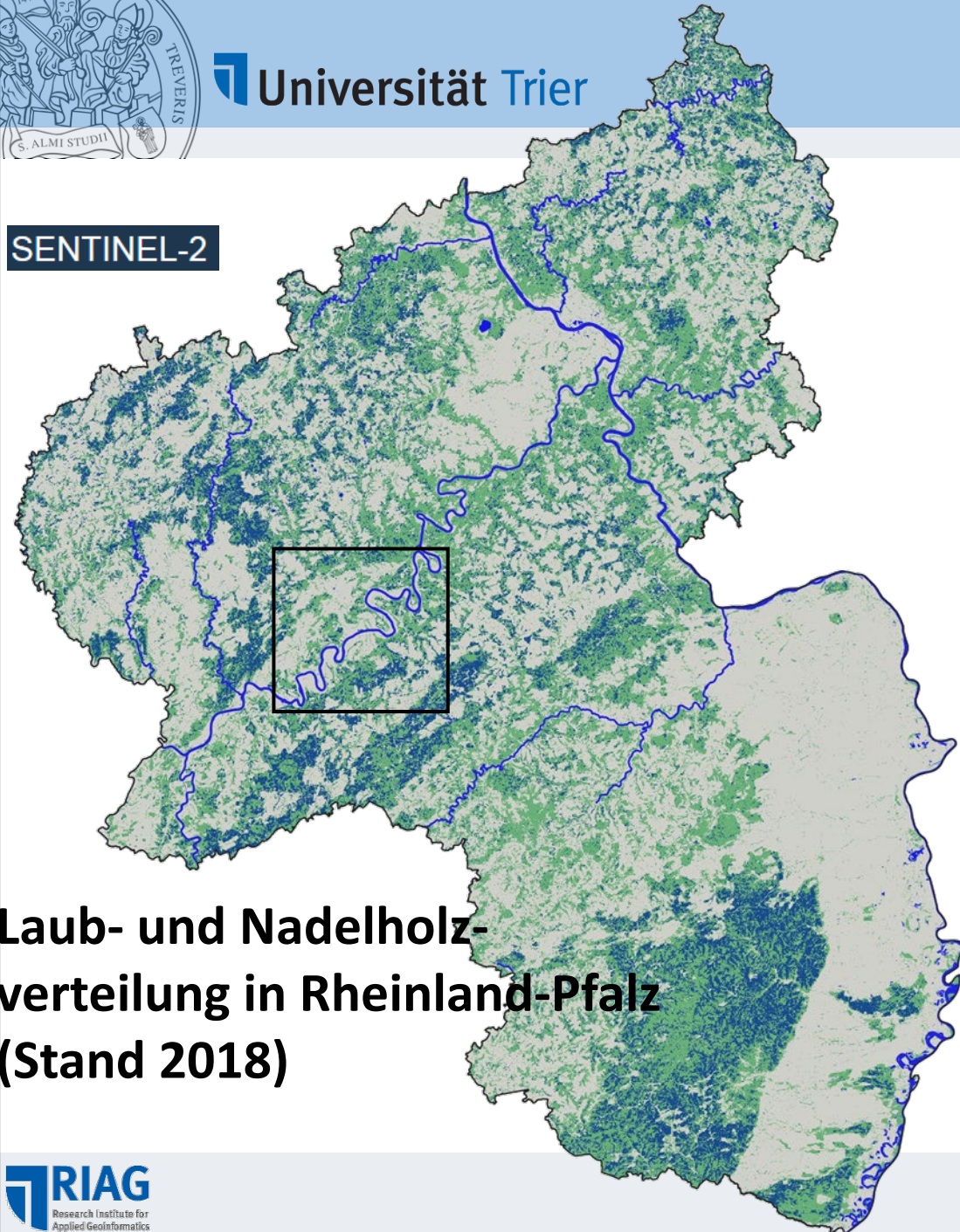
Null deviance: 14494.9 on 12515 degrees of freedom
Residual deviance: 3499.8 on 12512 degrees of freedom
AIC: 3507.8

Number of Fisher scoring iterations: 7

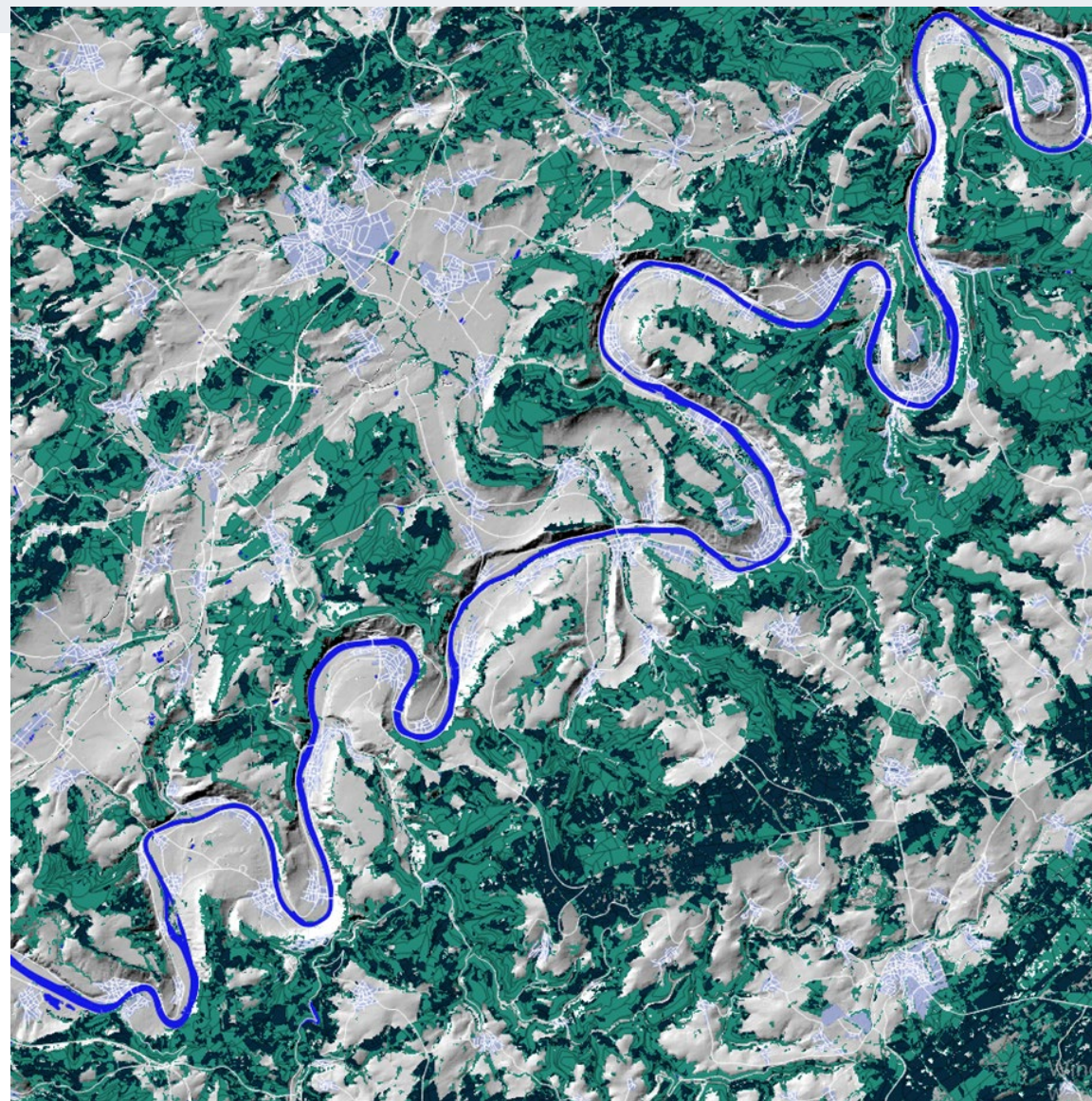
Training Data: n= 12516
Validation Data: n= 8343
Correctly Assigned: 0.958 %



SENTINEL-2

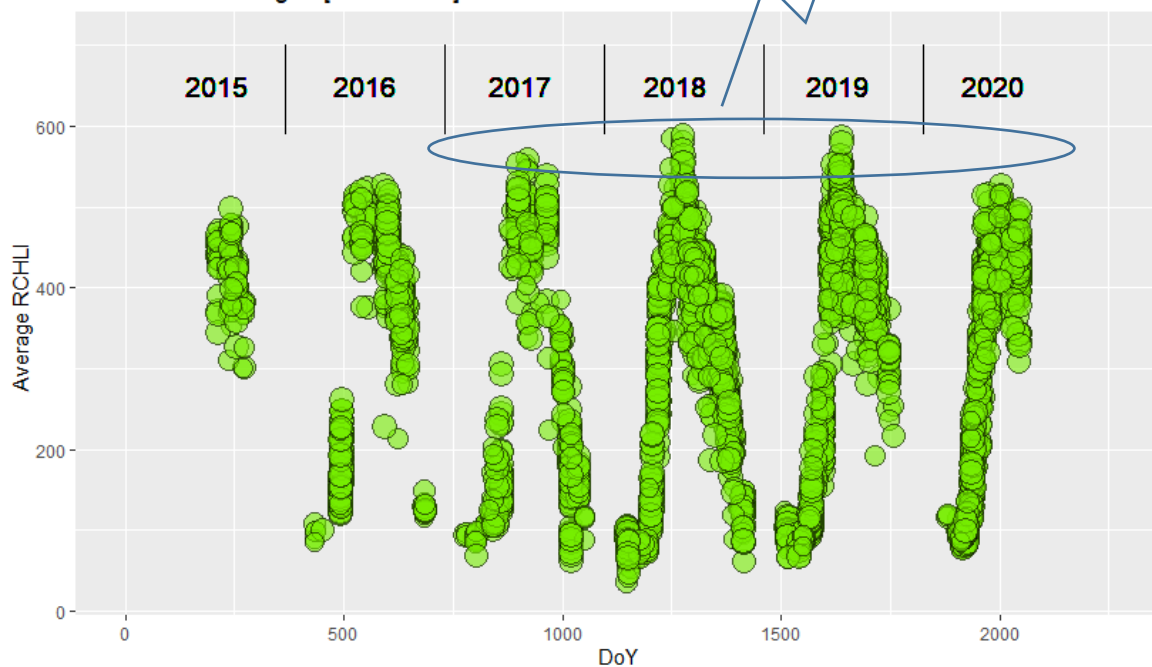


**Laub- und Nadelholz-
verteilung in Rheinland-Pfalz
(Stand 2018)**

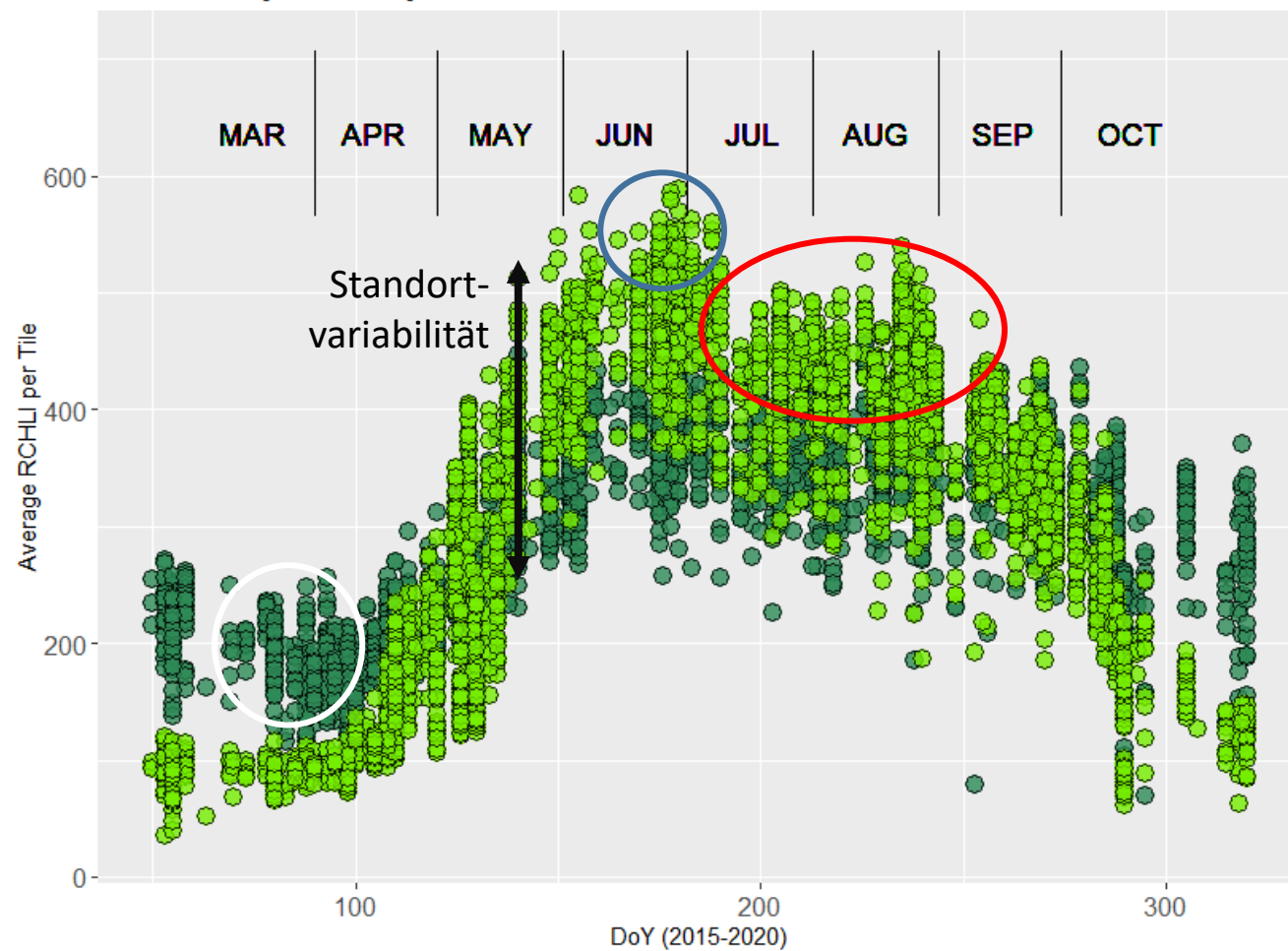


Rekonstruktion
frühsummerliches
Optimum

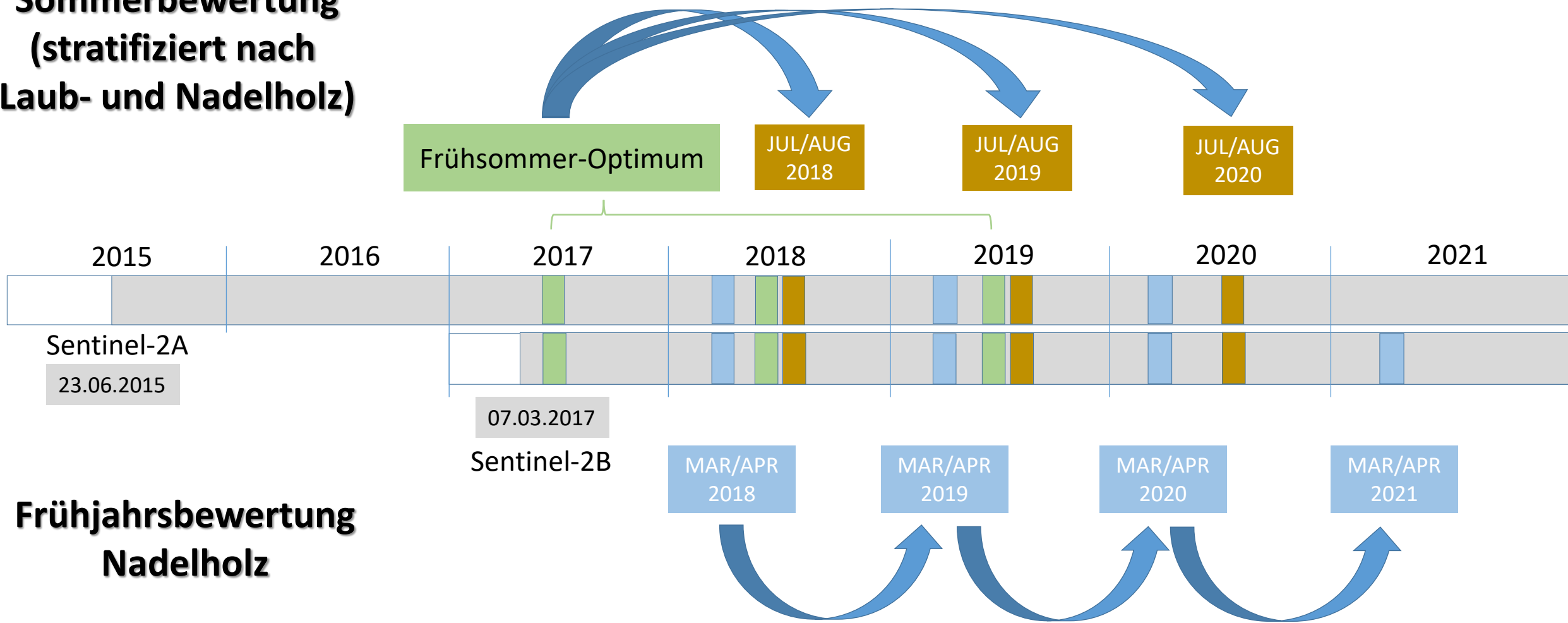
RCHLI Tile-Averages [2015-2020] Broadleaf



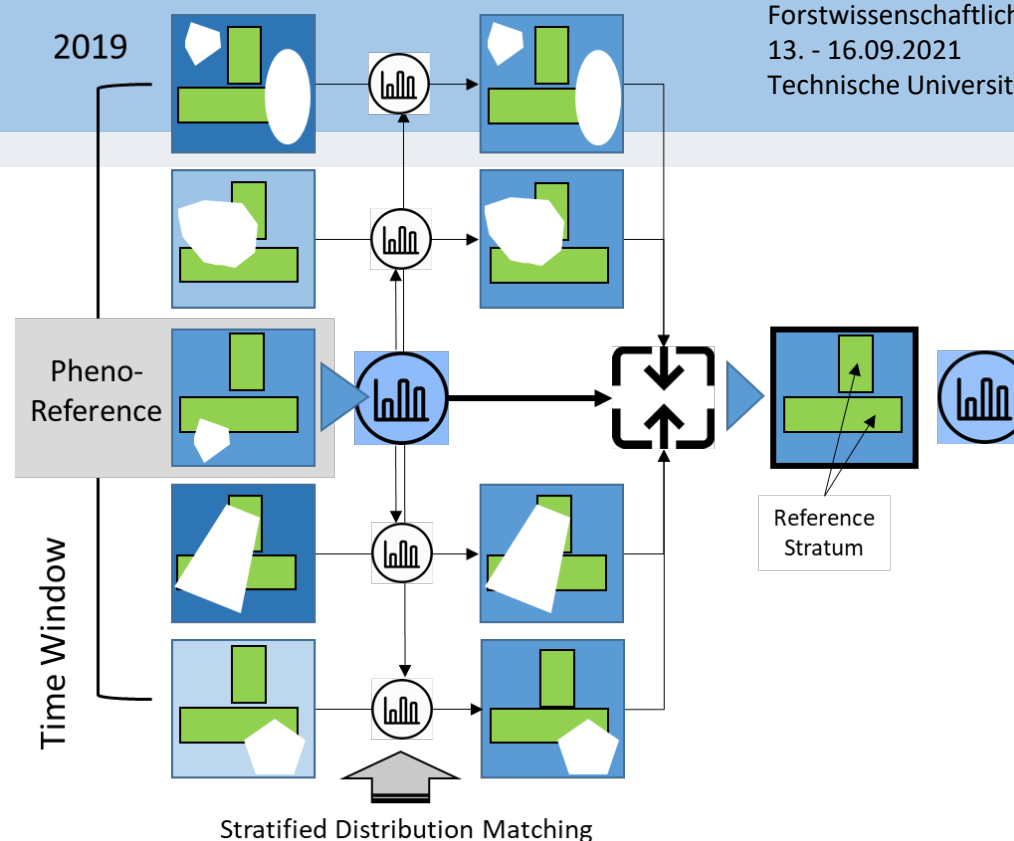
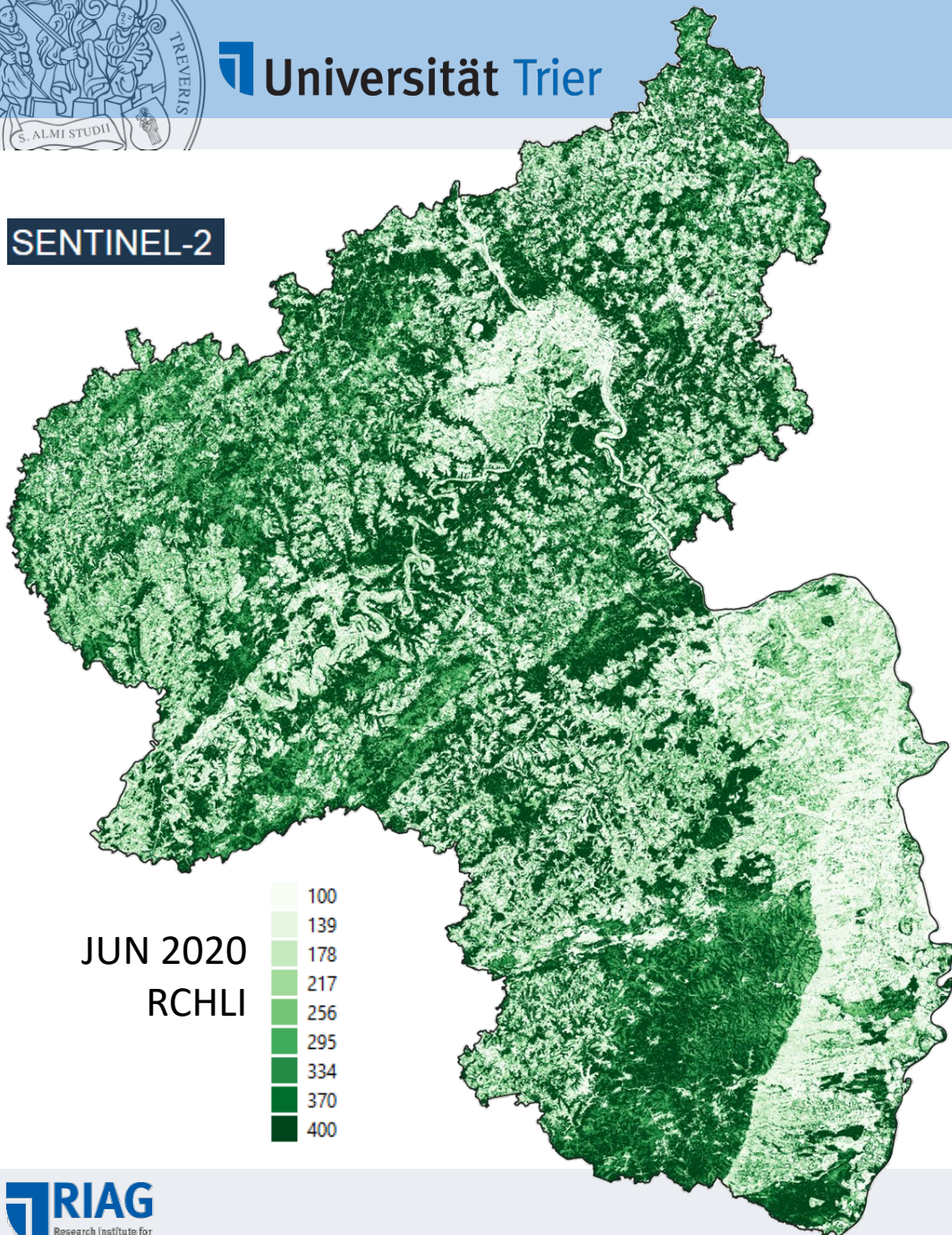
RLP: RCHLI [2015-2020] Broadleaf & Needleleaf Forest



Sommerbewertung (stratifiziert nach Laub- und Nadelholz)



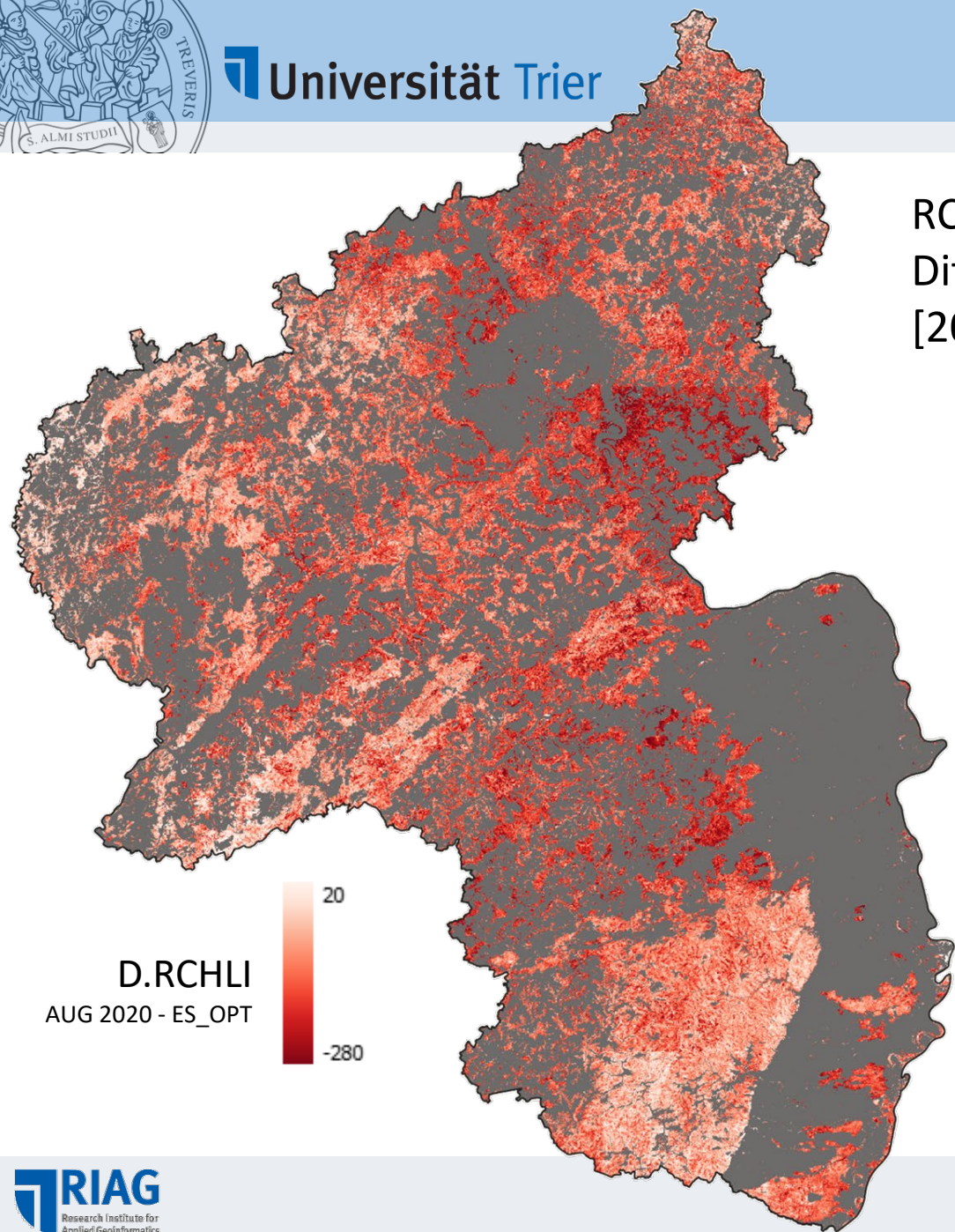
SENTINEL-2



Nutzung der Stratifizierungsebenen

- Aktuelle Waldfläche
- Laub- und Nadelwaldflächen

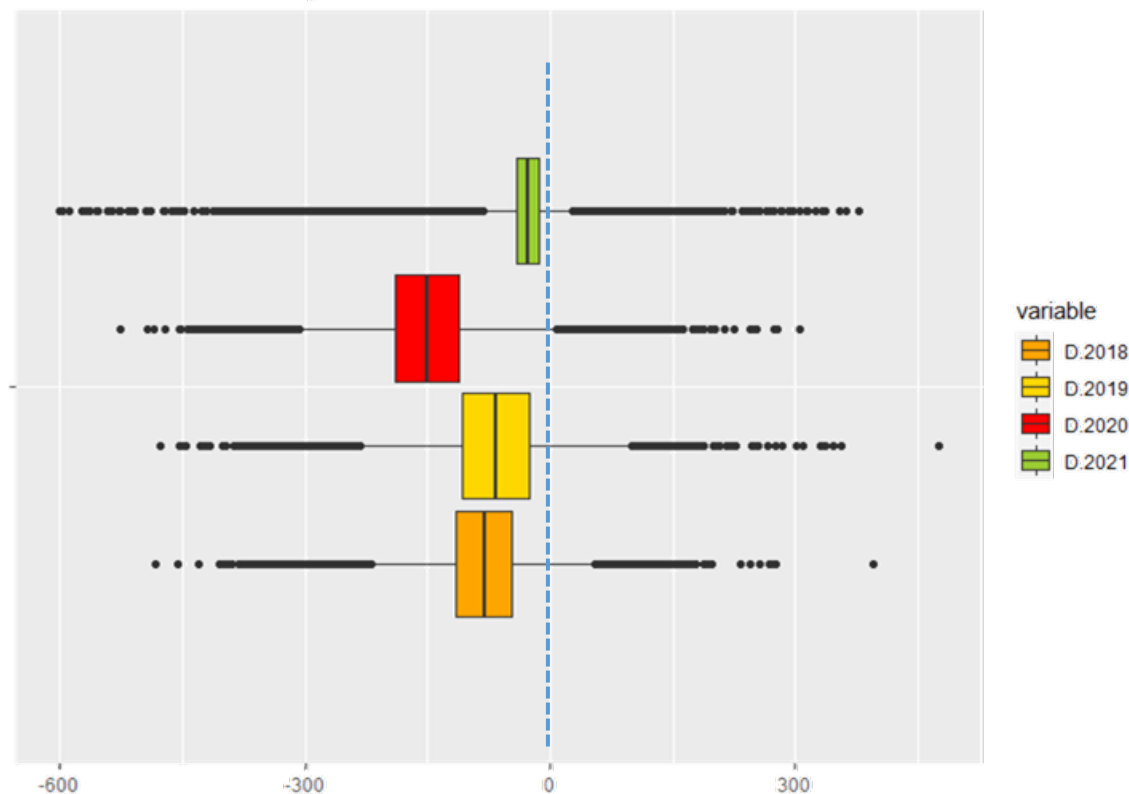
zur **Berechnung wolkenfreier und radiometrisch optimierter Komposite** von ökophysiologisch sensiblen Spektralindizes

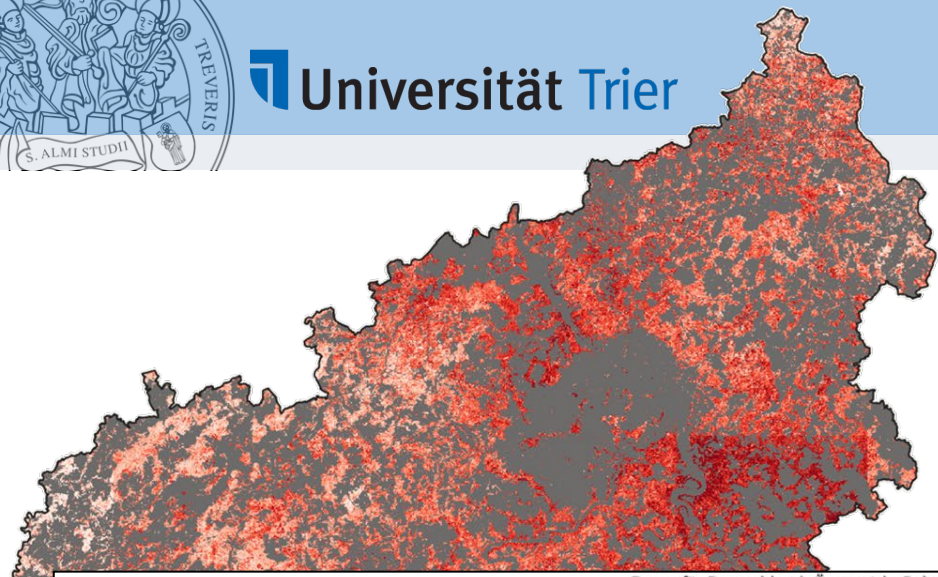


RCHLI

Differenz für Rheinland-Pfalz zwischen „Frühsommer-Optimum“ [2017&2018&2019] und AUG2018, AUG2019, AUG2020 & AUG2021

RCHLI: Frühsommer-Optimum - AUG2018/AUG2019/AUG2020/AUG2021

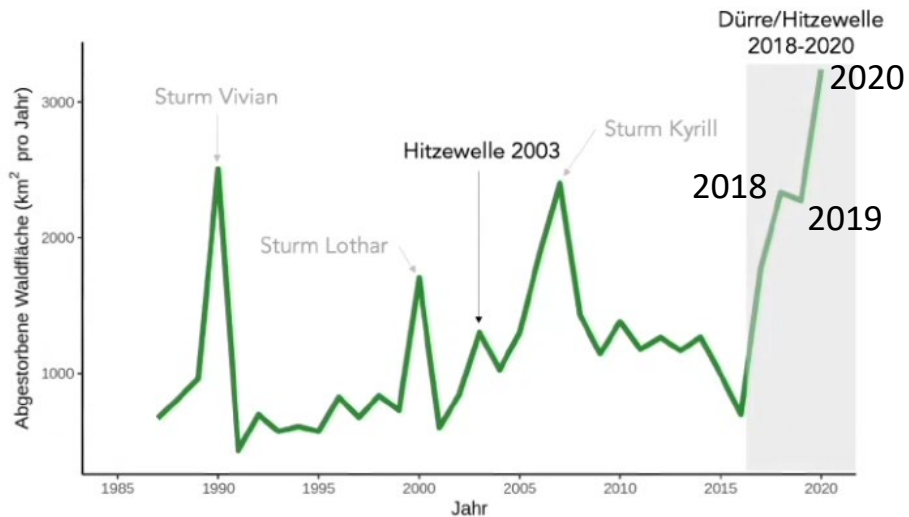




RCHLI

Differenz für Rheinland-Pfalz zwischen „Frühsommer-Optimum“
[2017&2018&2019] und AUG2018, AUG2019, AUG2020 & AUG2021

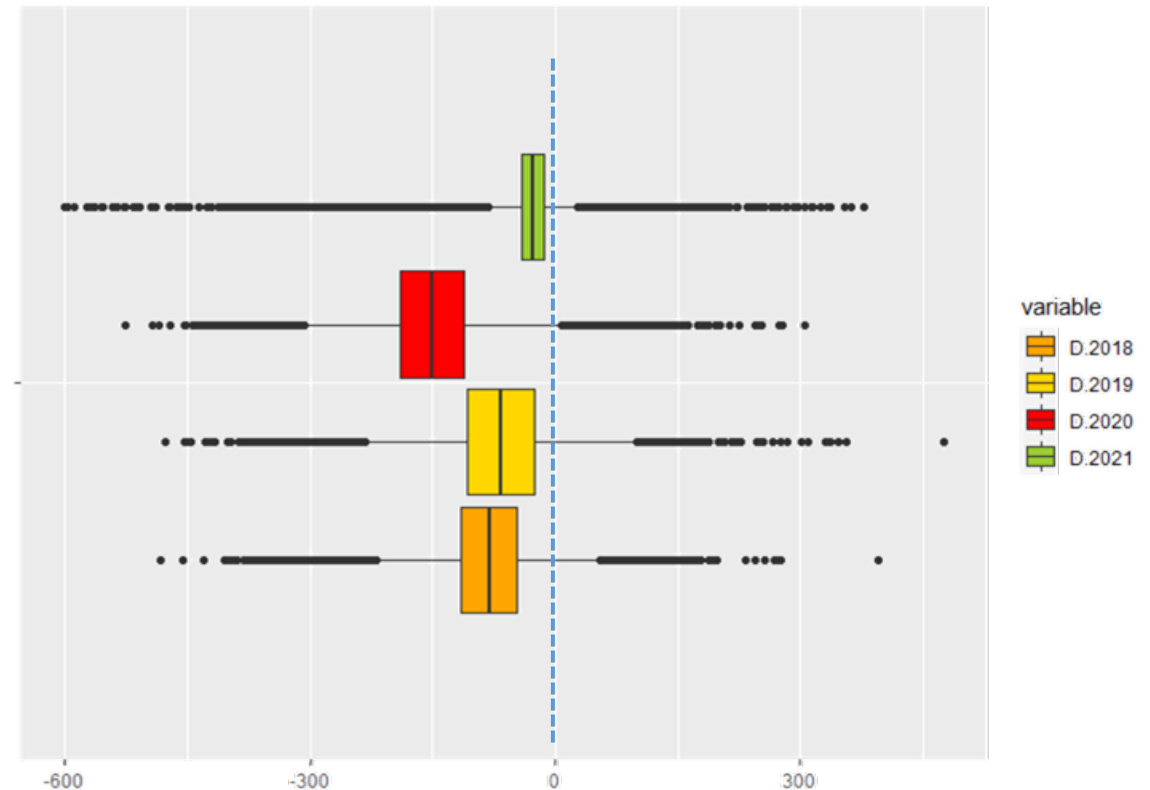
Daten für Deutschland, Österreich, Polen, Schweiz, Slowakei und Tschechien



Senf et al. (2018) Nature Communications | Senf & Seidl (2020) Nature Sustainability | Senf et al. (2021) One Earth | Senf & Seidl (2021) Biogeosciences

9

RCHLI: Frühsommer-Optimum - AUG2018/AUG2019/AUG2020/AUG2021



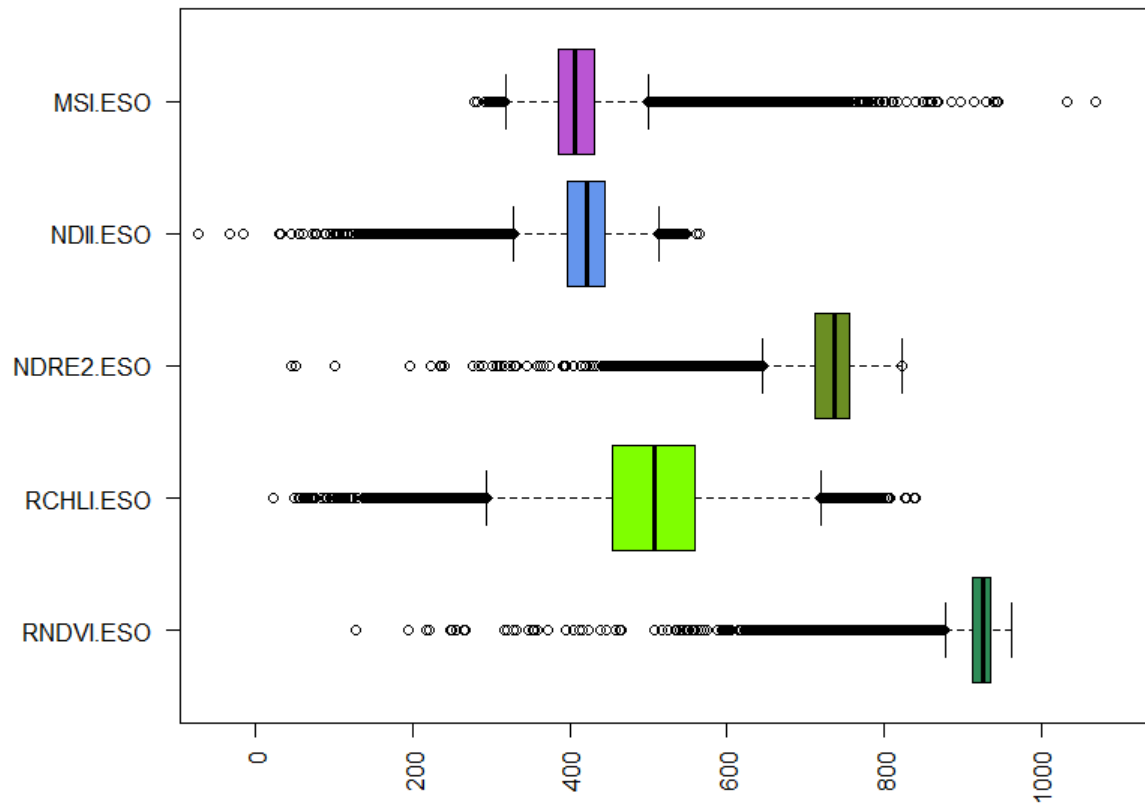
Comparing IDX-distributions, e.g. between ESOPT and AUG2020

- Independent groups (subjects in one group do not provide information about subjects in other groups): ?
- Dependent groups (subjects in one group *do* provide information about subjects in other groups. The **groups contain either the same set of subjects** or different subjects that the analysts have paired meaningfully). Studies that use dependent samples estimate within-subject effects. Here, stress is assessed by sampling pre- and post-stress scores from the same group of locations. These effects are the differences between paired subjects, such as the subjects' mean change.

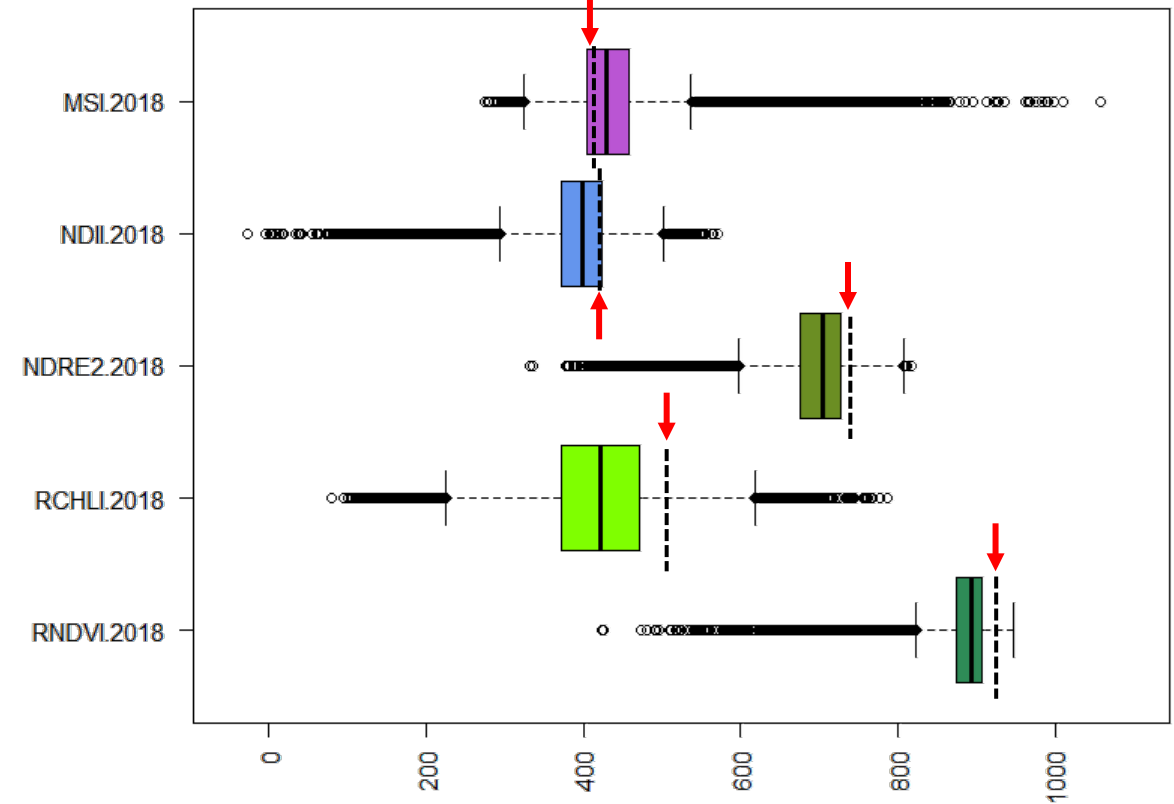
ID	D. RCHLI2018	D. RCHLI2019	D. RCHLI2020	D. RCHLI2021
1	-37.5	-82.0	-13.5	-22.5
2	-65.5	-126.0	-51.0	-38.5
3	-81.5	-150.5	-69.0	-28.5
4	-73.0	-86.0	-46.5	-40.5
5	-72.0	-95.5	-8.0	-26.5
6	-63.0	-39.0	-32.5	-167.5

- For dependent groups, the **focus is on the differences between measurements for each subject**. Consequently, if you can meaningfully subtract values in a row, that's a sure sign of dependency. For example, each row represents one individual in the paired dataset, so assessing the difference between values makes sense.
 - The primary advantage of dependent samples is that **you measure the same subjects across different conditions**, which allows them to be their own controls. They have the same unique mix of participant variables during all measurements, removing them as sources of variation.
1. Difference distributions have different means: stress impact is different in overall strength -> shift of means
 2. Difference distributions are not symmetric: stress impact affects different area proportions -> asymmetry

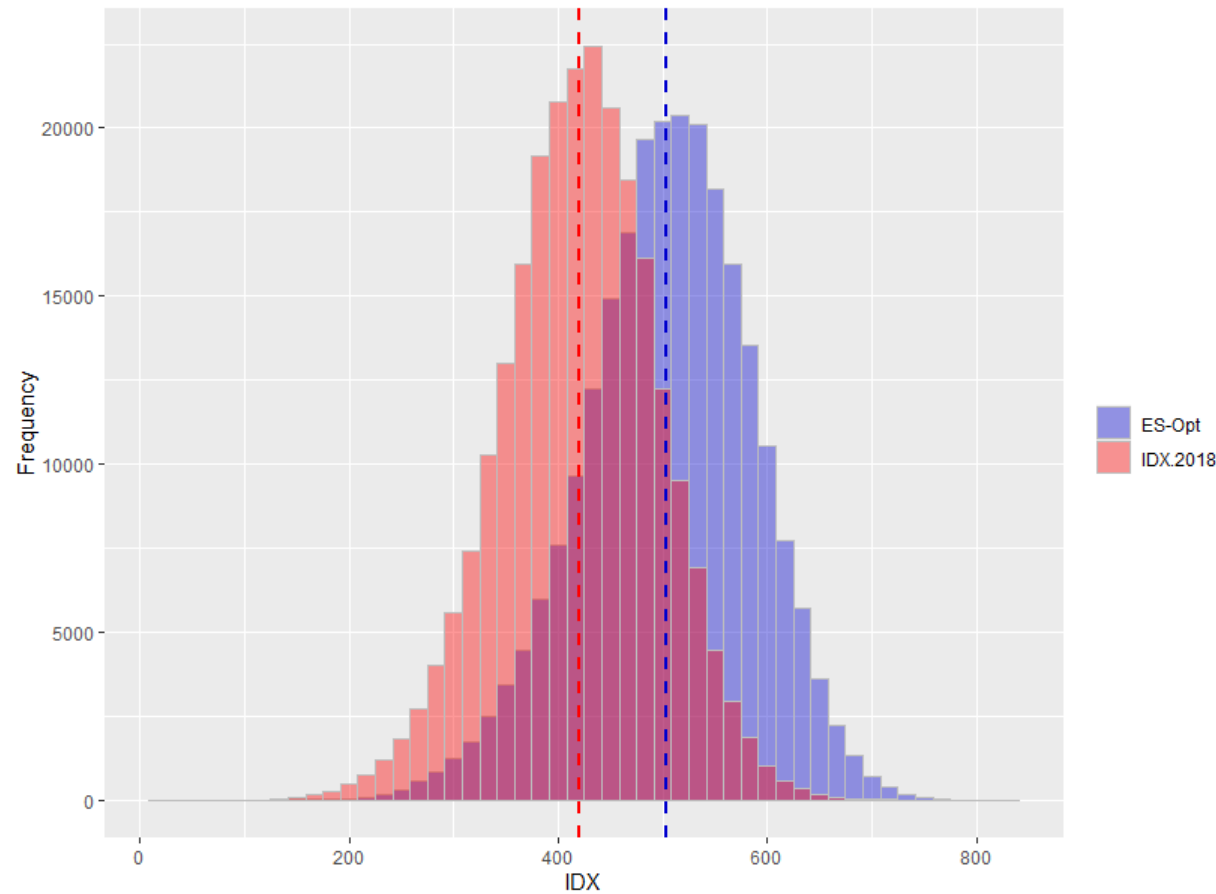
Broadleaf Trees: ESO (2016-2018)



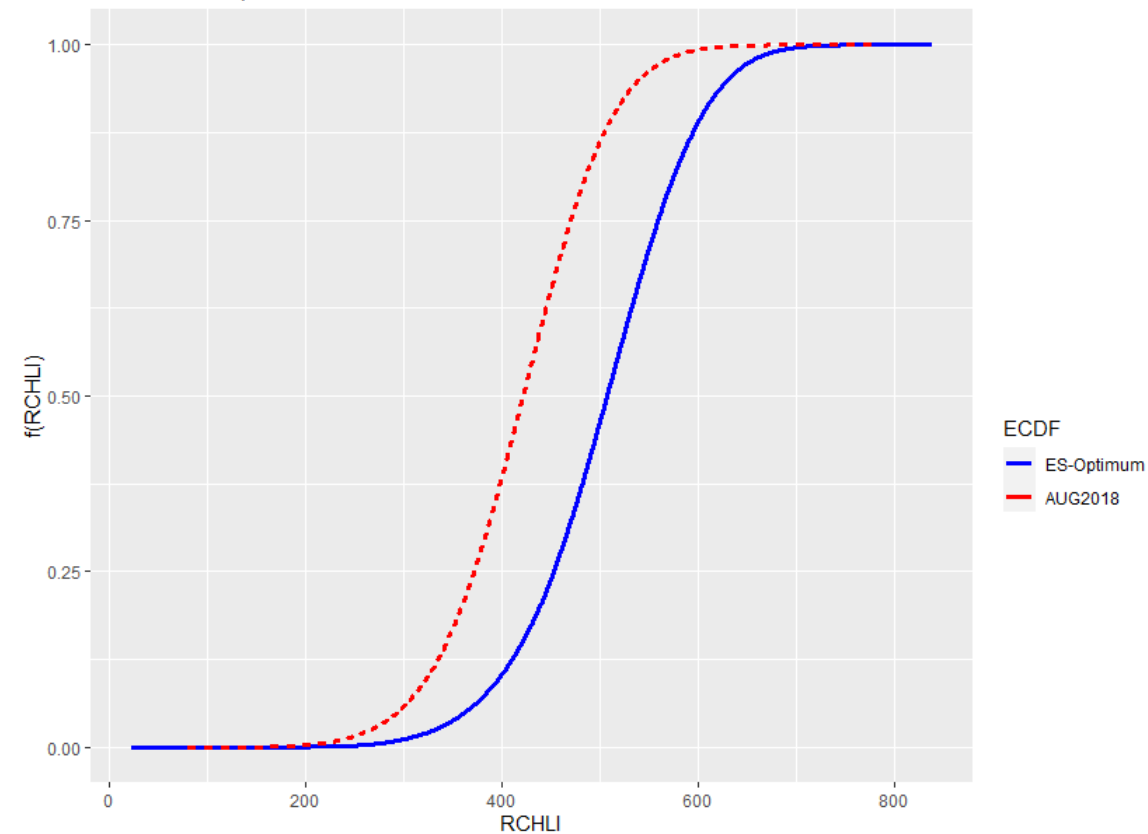
Broadleaf Trees: IDX 2018



Broadleaf RCHLI: Early-Summer-Optimum vs AUG2018



RCHLI: ES-Optimum vs. AUG 2018



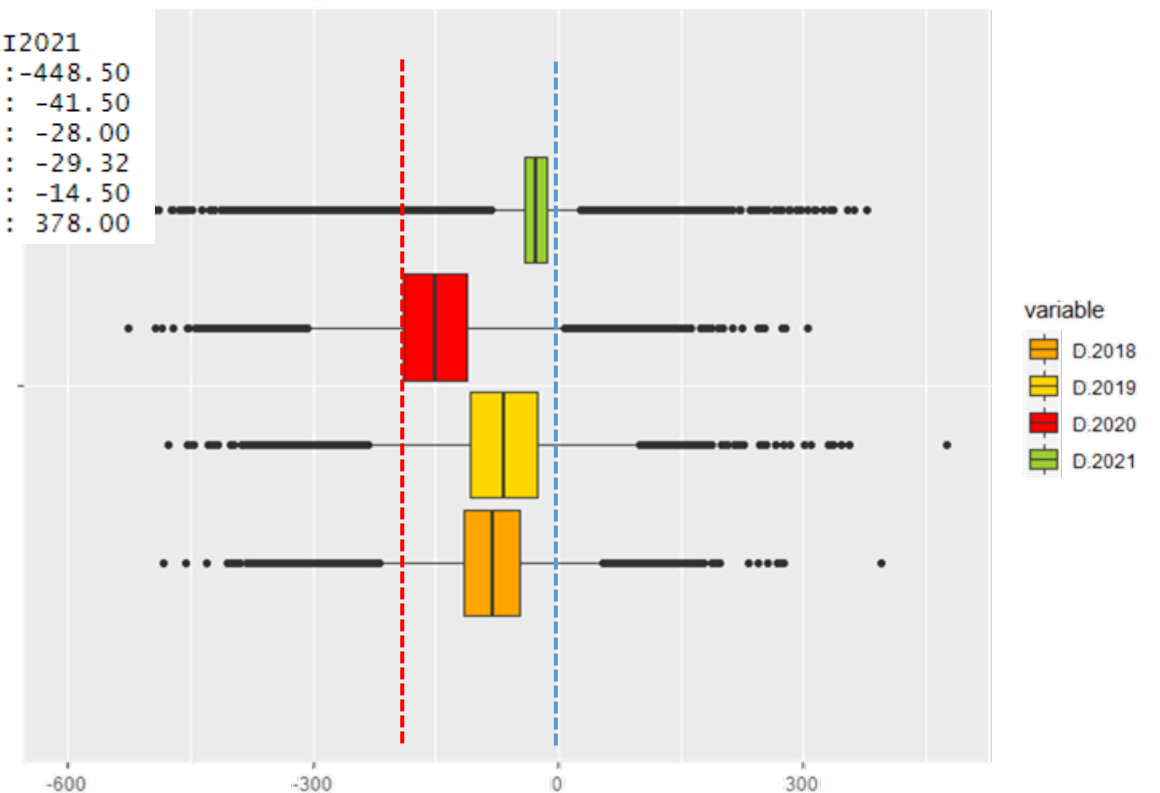
RCHLI

Referenzwert zur Bewertung der Stressintensität für die Jahre
AUG2018, AUG2019, AUG2020 & AUG2021

```
> summary(D.IDX)
```

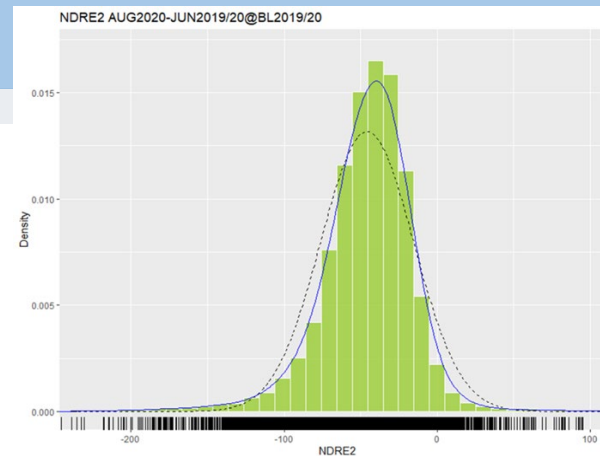
ID	D. RCHLI2018	D. RCHLI2019	D. RCHLI2020	D. RCHLI2021
Min. : 1	Min. : -482.50	Min. : -476.50	Min. : -526.0	Min. : -448.50
1st Qu.: 61932	1st Qu.: -116.00	1st Qu.: -108.50	1st Qu.: -189.5	1st Qu.: -41.50
Median : 123770	Median : -81.00	Median : -66.50	Median : -151.0	Median : -28.00
Mean : 122897	Mean : -83.38	Mean : -68.12	Mean : -150.1	Mean : -29.32
3rd Qu.: 183694	3rd Qu.: -48.00	3rd Qu.: -25.50	3rd Qu.: -111.0	3rd Qu.: -14.50
Max. : 243455	Max. : 395.50	Max. : 474.50	Max. : 304.5	Max. : 378.00

RCHLI: Frühsommer-Optimum - AUG2018/AUG2019/AUG2020/AUG2021

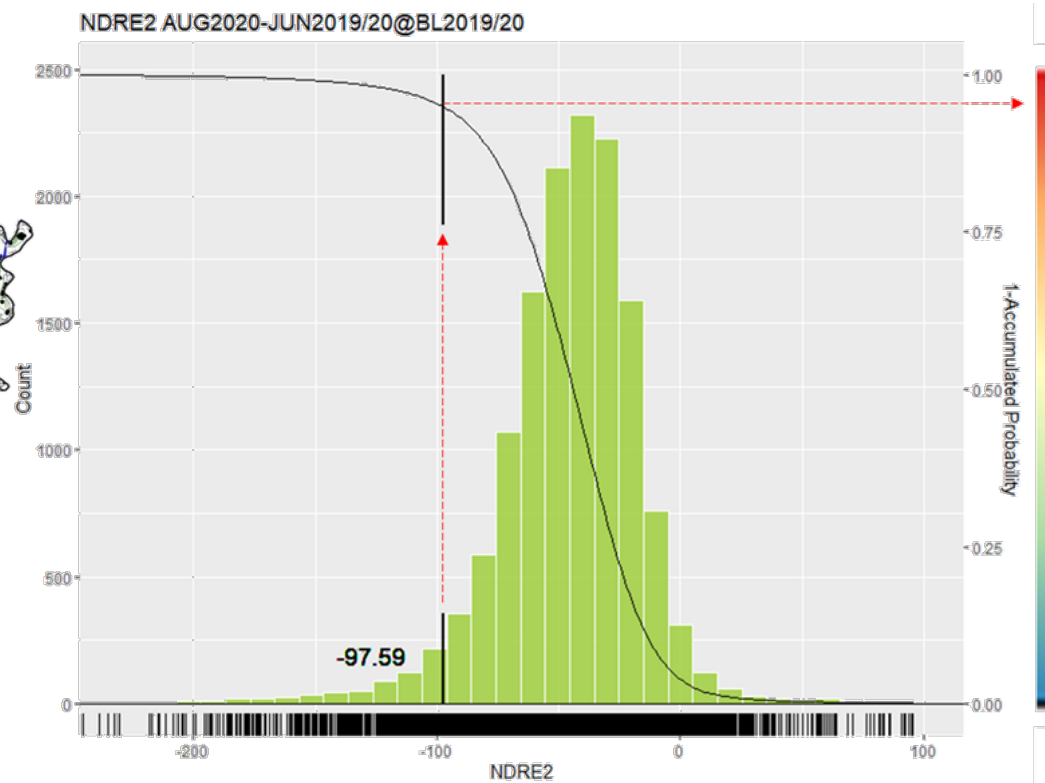


A: 1st Quartile der stärksten Stressausprägung (nur retrospektiv)
B: Mittelwert der Referenzverteilung

Geschichtete
Zufallsstichprobe (n=13915)
innerhalb der aktuell (2020)
mit Laubholz bestockten
Waldfläche Luxembourgs



Verteilung der geschätzten Differenzwerte
des Chlorophyll-Index „NDRE2“ zwischen
August 2020 und dem Referenzkomposit
(Juni 2019/20)



Nutzung der inversen
Summenkurve der
geschätzten „D.NDRE2“-
Häufigkeitsverteilung zur
Ausweisung der
Wahrscheinlichkeit für
das Vorliegen einer
überdurchschnittlich
stark ausgeprägten
Anomalie der
Chlorophyll –
Konzentration

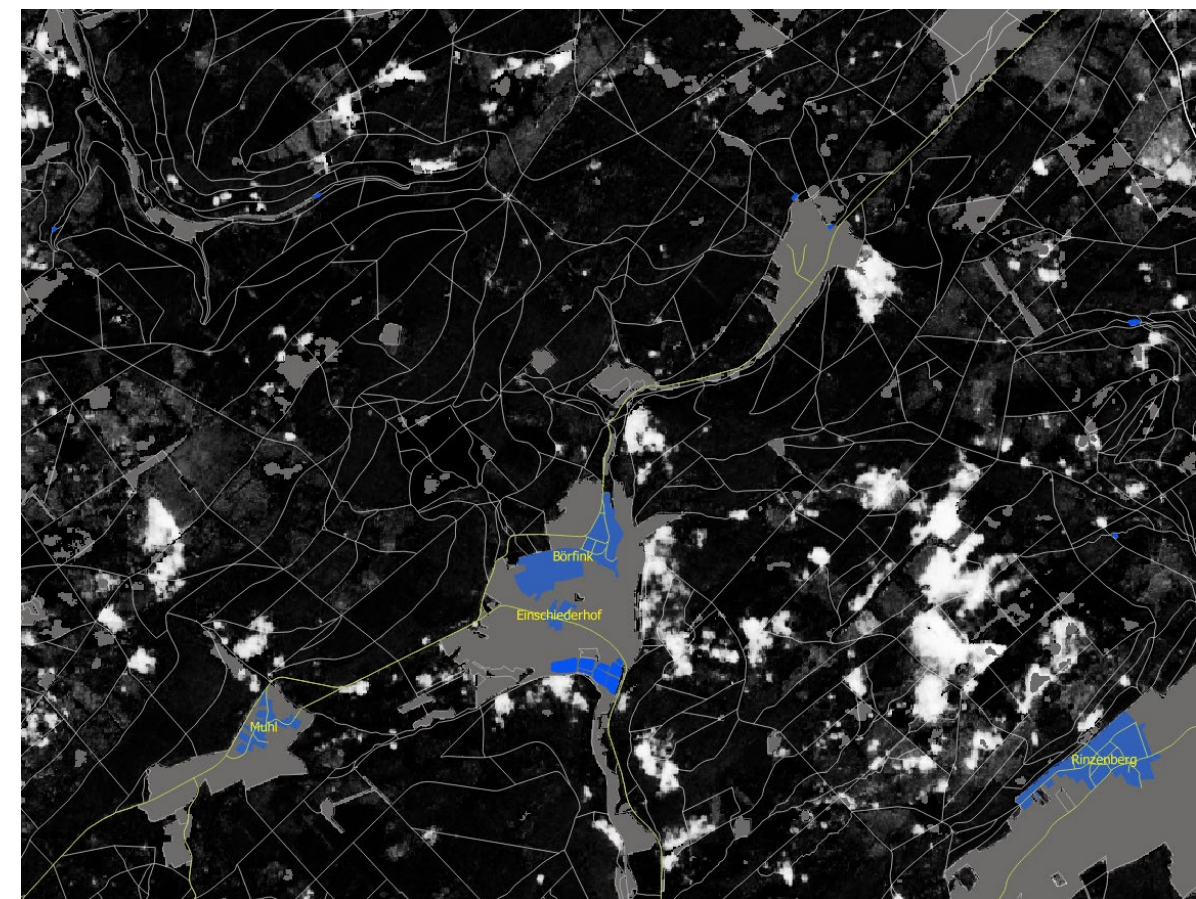
Combined Vitality Change Index (CVCI)

Sind Ereignisse $E_1, E_2, \dots, E_n$ unabhängig und schließen sich nicht gegenseitig aus, gilt für das kombinierte Ereignis

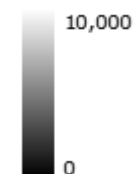
$$p\{E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n\} = \prod_{i=1}^n P(E_i) = p(E_1) \cdot p(E_2) \cdot \dots \cdot p(E_n)$$

Obwohl aufgrund von Teilkorrelationen zwischen den einzelnen Differenzindikatoren eine vollständige Unabhängigkeit nicht gegeben ist, kann entsprechend der **jeweiligen Bewertungsziele** eine spezifische Kombination der Anomalie-Indikatoren sinnvoll sein.

- Laubfärbung -> $CVCI.x_m$ (NDVI, RCHLI, NDRE2, PSIR, ...)
- Trocknis -> $CVCI.x_m$ (NDII, MSI, ...)
- Kombinierte Effekte -> $CVCI.x_m$ (NDVI, RCHLI, NDRE2, NDII, MSI, ...)



CVCI.3m
(combined
pScore)



MAR2020-MAR2021

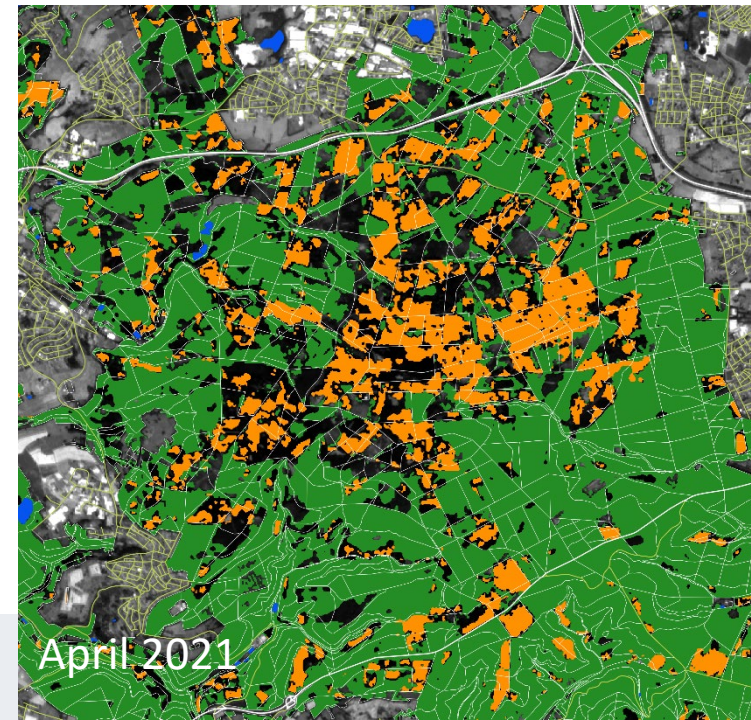
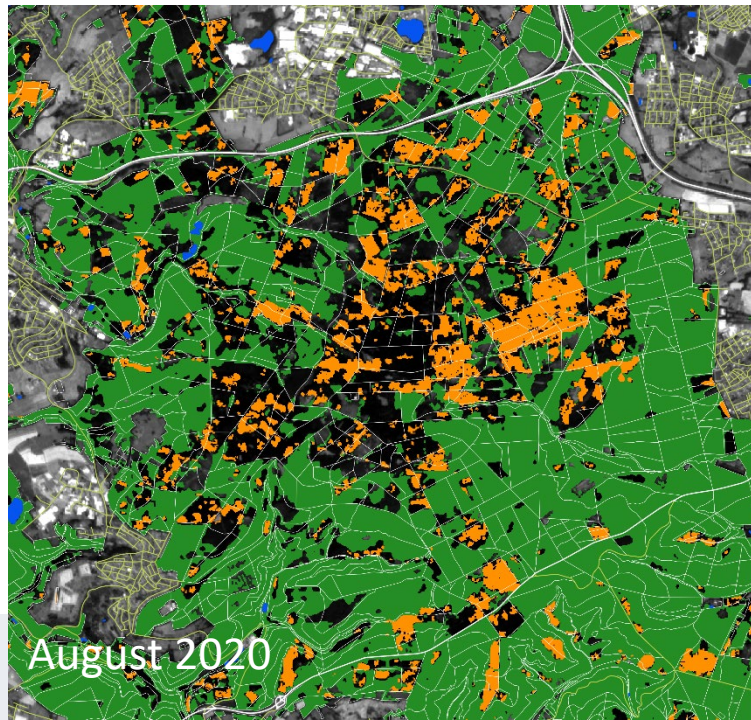
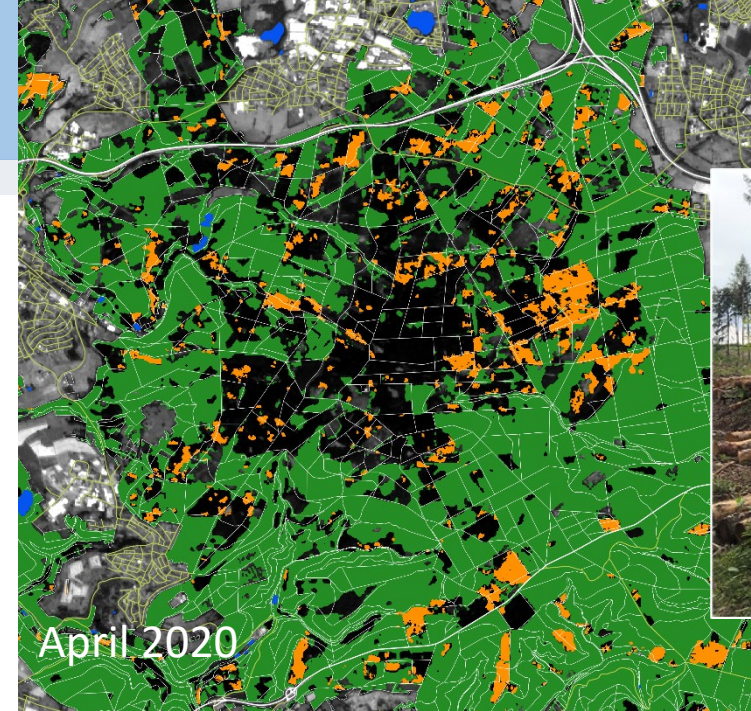
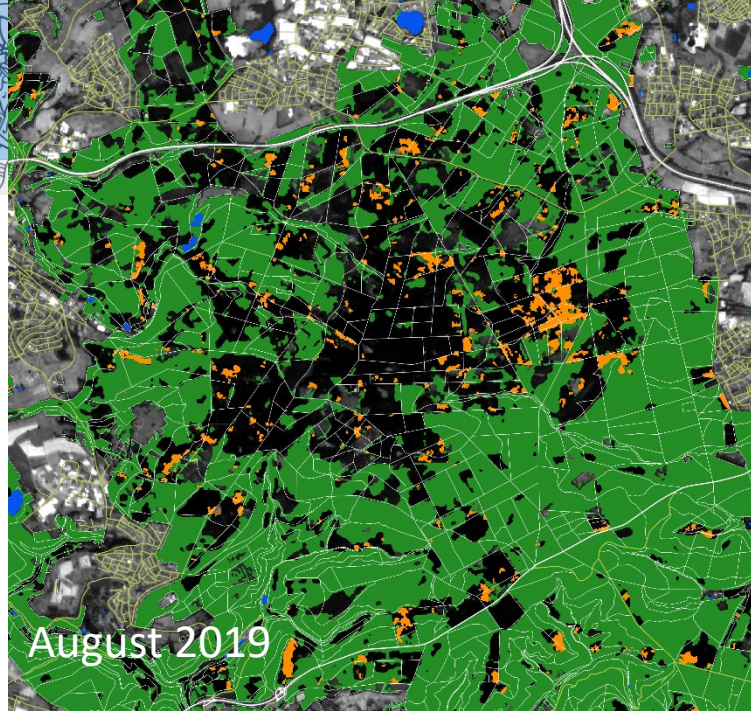
$$CVCI.3_m = p(NDVI) \cdot p(RCHLI) \cdot p(NDRE2)$$

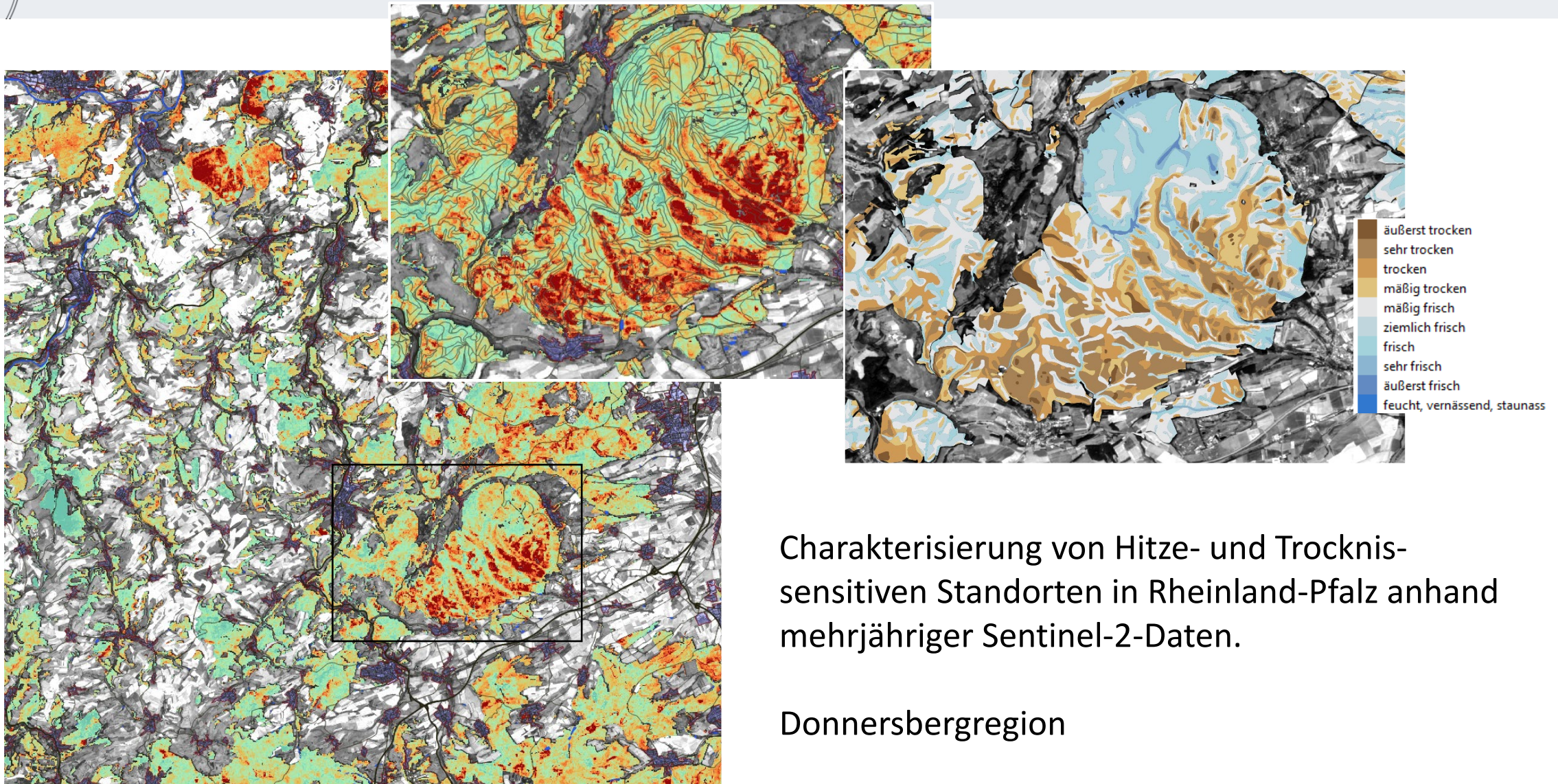
FA Neuhäusel



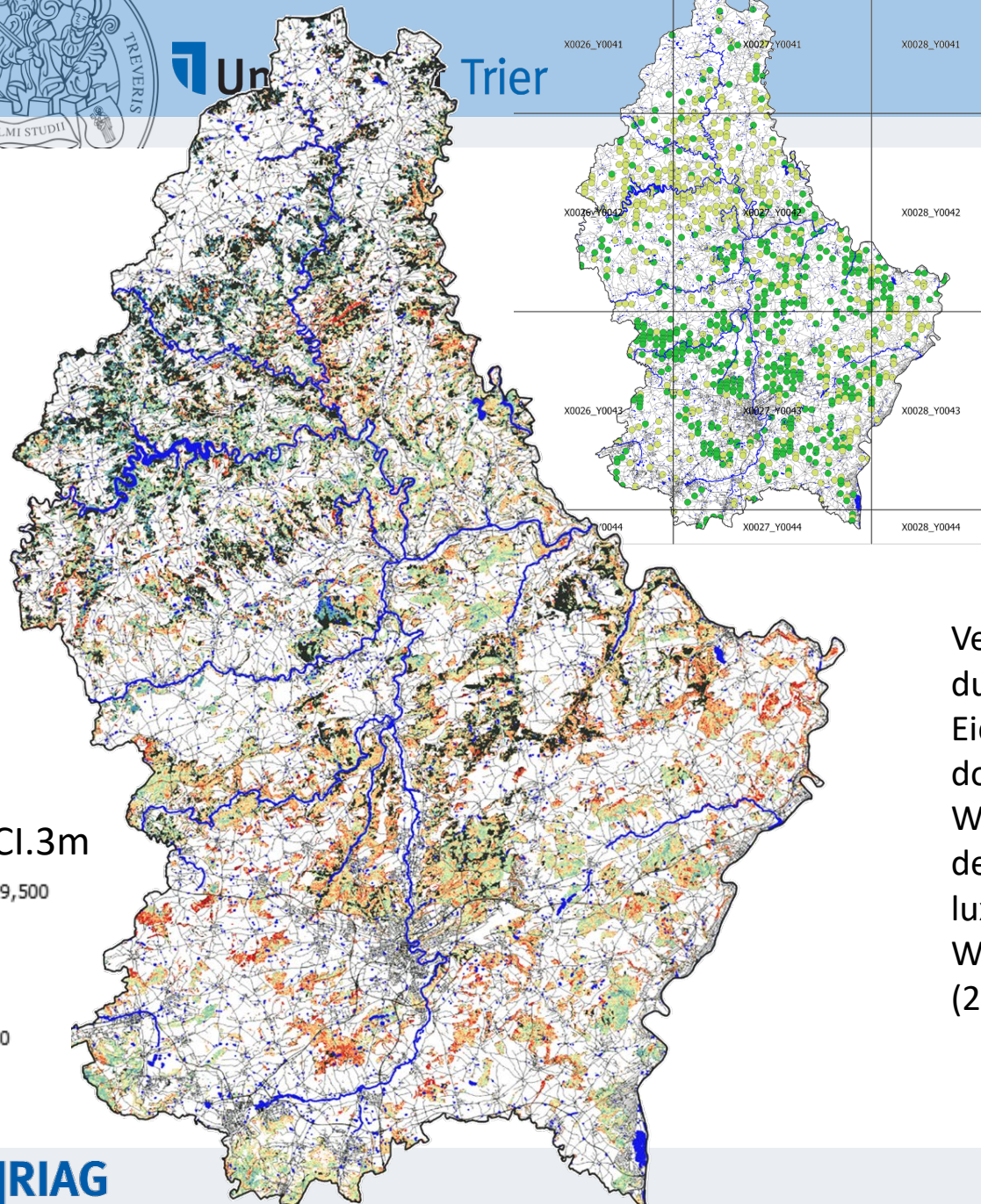
Flächenerfassung der Borkenkäferkalamität in Rheinland-Pfalz (seit März/April 2018)

Time	Total (ha)	Increase (ha)
APR 2019	3,740	3,740
AUG 2019	8,880	5,140
APR 2020	11,850	2,970
AUG 2020	15,070	3,220
APR 2021	17,600	2,530

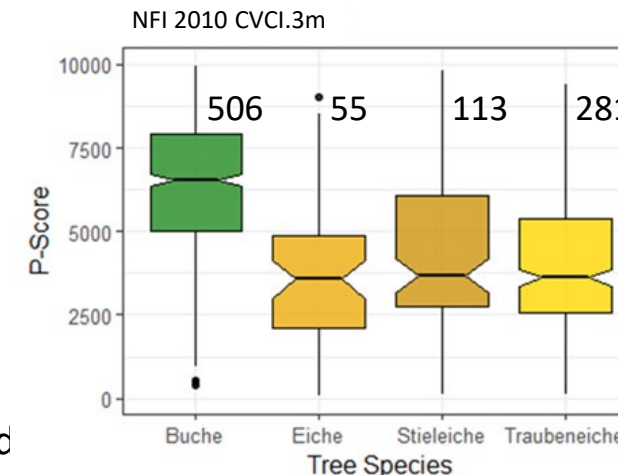




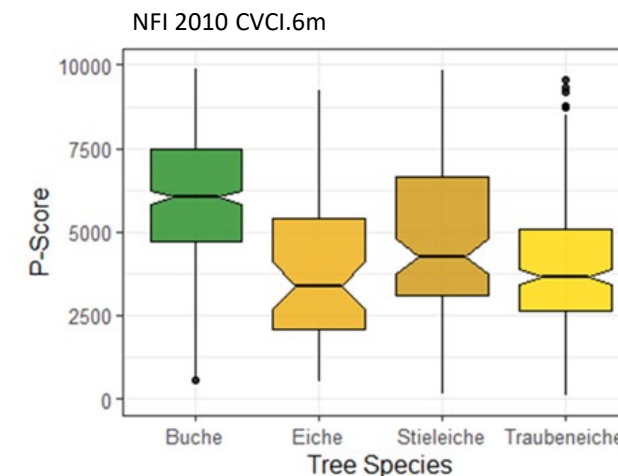
Untersuchungen zur vorzeitigen Laubfärbung von Buchen in Luxembourg (AUG2020)



Vergleich von
durch Buchen und
Eichen
dominierten
Waldstandorten
der
luxemburgischen
Waldinventur
(2010)

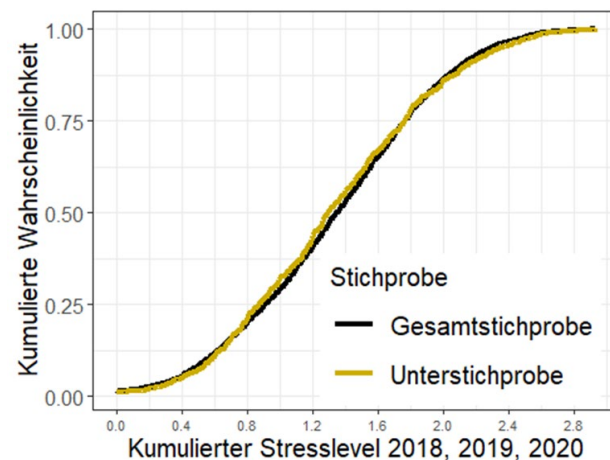
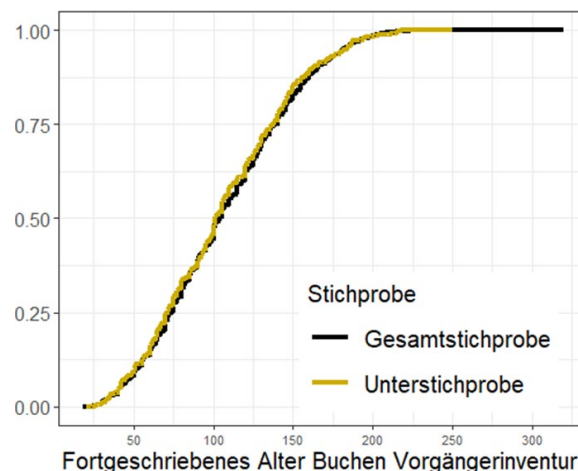
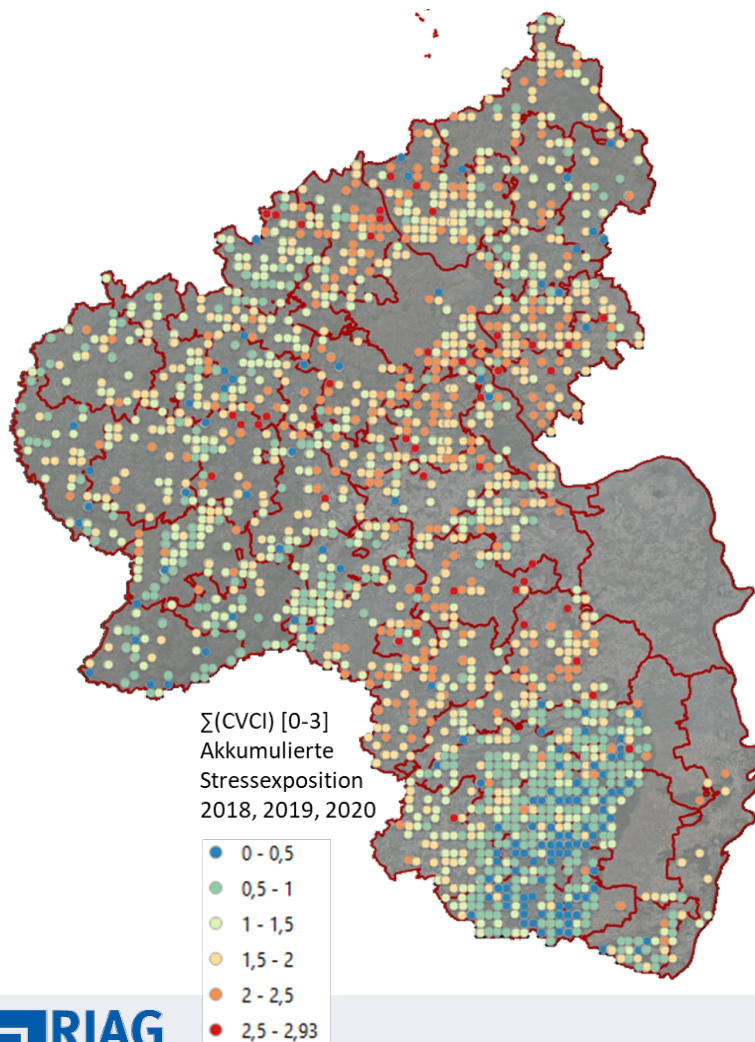


RCHLI, NDRE2, PSRI



NDVI, RCHLI, NDRE2,
PSRI, NDII, MSI

Stichprobenerhebung zur Erfassung des Austriebszustandes der Rotbuche in den Wäldern von Rheinland-Pfalz



Anhand einer repräsentativen Unterstichprobe der BWI von **880** Traktecken mittels Balanciertem Sampling (*Balanced Sampling*).

- **Räumliche Verteilung** der Stichprobenpunkte bleibt in Unterstichprobe erhalten (*Spatially Balanced Sampling*, Grafström and Lisc (2019))
- **Buchen-Altersstruktur** bleibt in Unterstichprobe erhalten
- **Stresssituation** der Buchen in den Trockenjahren 2018-2020 repräsentativ vertreten

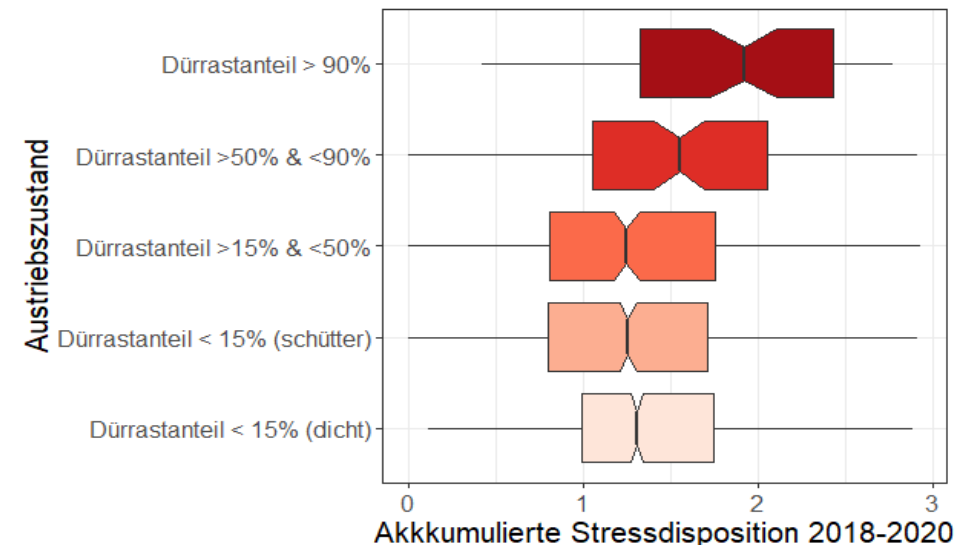
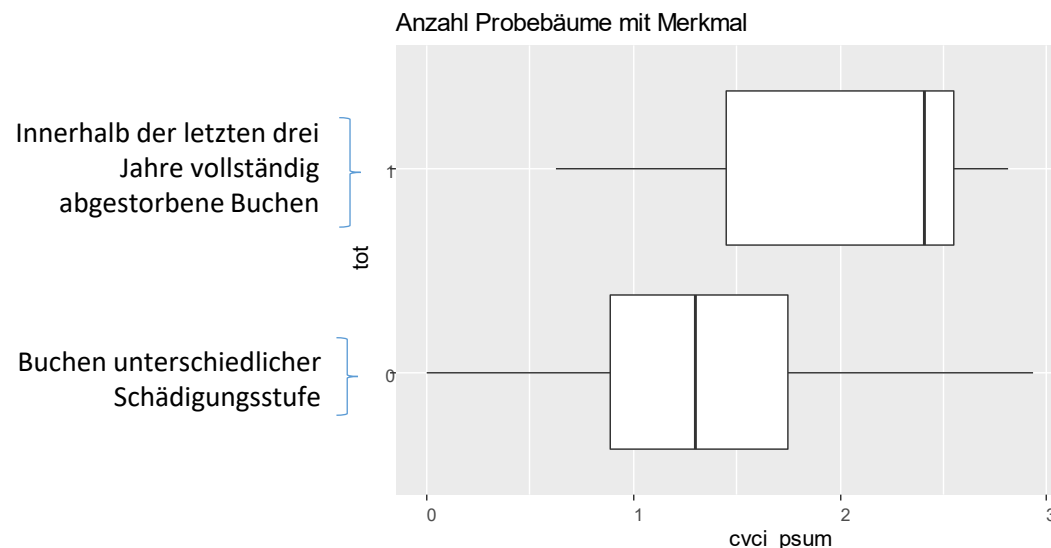
Vorinformation über **Trocken-/ Hitzestress-Disposition** aus **Sentinel-2-Satellitendaten (CVCI)**

- Ableitung von Anomalien des Chlorophyll- und Vegetationswasser-gehalt mittels des für August 2018, 2019, 2020 aus S2-Daten ermittelten CVCI
- Bewertung der Gesamt-Stressexposition anhand der Summe der drei CVCI-Werte aus August 2018, 2019 und 2020

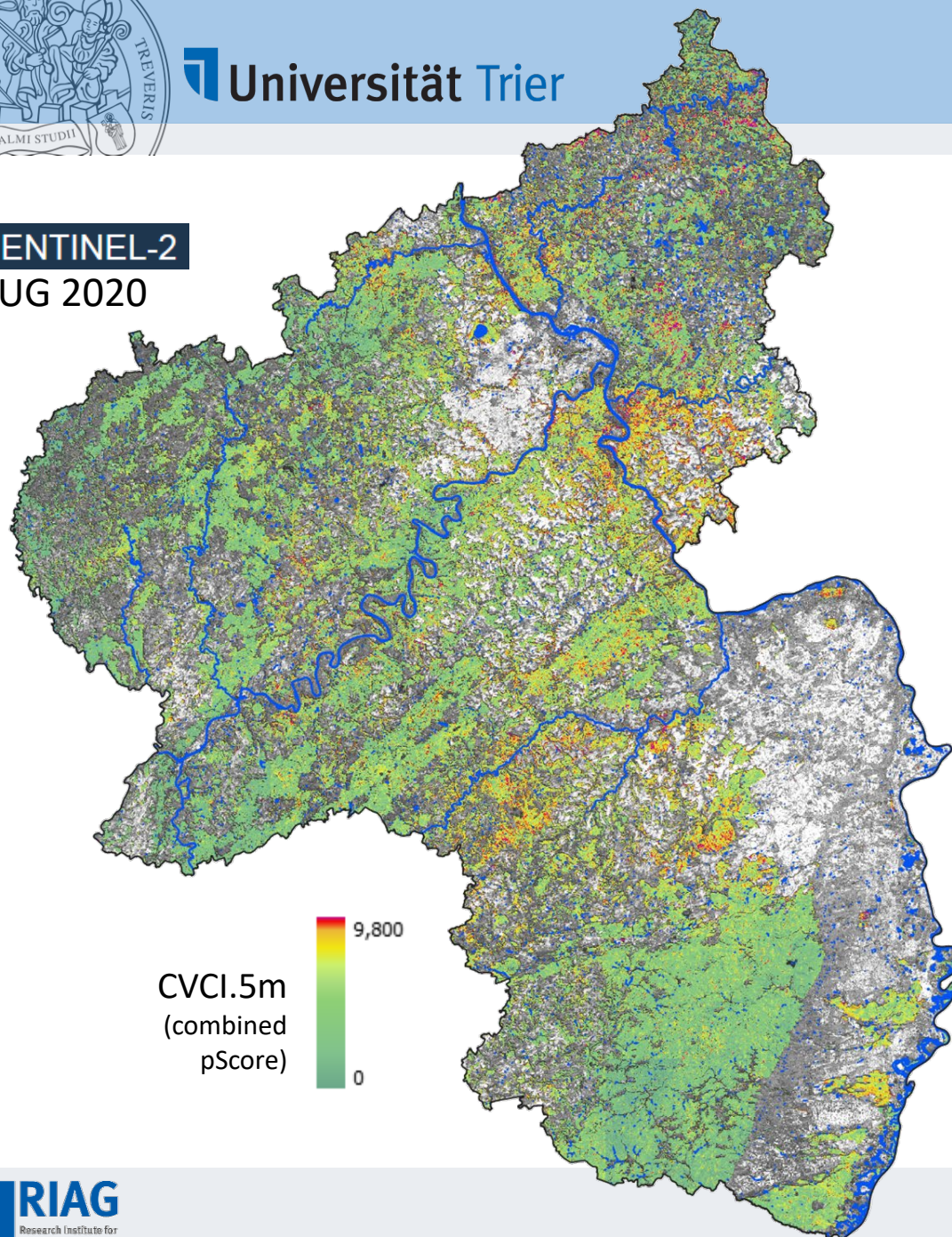
Stichprobenerhebung zur Erfassung des Austriebszustandes der Rotbuche in den Wäldern von Rheinland-Pfalz



- Landesweit insgesamt 2960 per Winkelzählprobe (Zählfaktor 4) ausgewählte Buchen durch Stichprobe erfasst
- 13 baumspezifische Attribute
 - Bruthöhendurchmesser, Buche innerhalb der letzten 3 Jahre abgestorben (ja/nein), **Austriebszustand (5 Stufen anhand Dürrast-Anteil)**, Schicht, Dichtstand, Kraftsche Klasse, Einsehbarkeit der Krone, Stammschäden (Rückeschäden, Schältschäden, Pilzkonsolen, Käferbefall)
- 8 standortspezifische Attribute
 - Durchforstung innerhalb der letzten 3 Jahre (ja/nein), Schädigung von Buchen-Naturverjüngung [% Schädigung], Staunässestufe, nWSK ~ Bodenart, Lagerungsdichte, Durchwurzelung, Skelettgehalt, Exposition



SENTINEL-2
AUG 2020



Resumé

- Es konnten für RLP bisher drei Vitalitätsbewertungen zur Sommerphase (2018, 2019, 2020) und vier zum Frühjahrszeitpunkt (2018, 2019, 2020, 2021) erstellt werden; dazu kommt eine Bewertung der Sommersituation 2020 in LUX
- Voraussetzung ist die durch S2-A/B erheblich gesteigerte Datenverfügbarkeit
- Die Vitalitätsbewertungen werden in unterschiedlichen Anwendungsszenarien (Kalamitätsmonitoring, Standortbewertung, vorzeitige Laubfärbungsdynamik, Inventur des Buchenzustands) genutzt
- Optimierte Inwertsetzung durch Integration von terrestrischen Waldinventuren und statistischen Auswertekonzepten