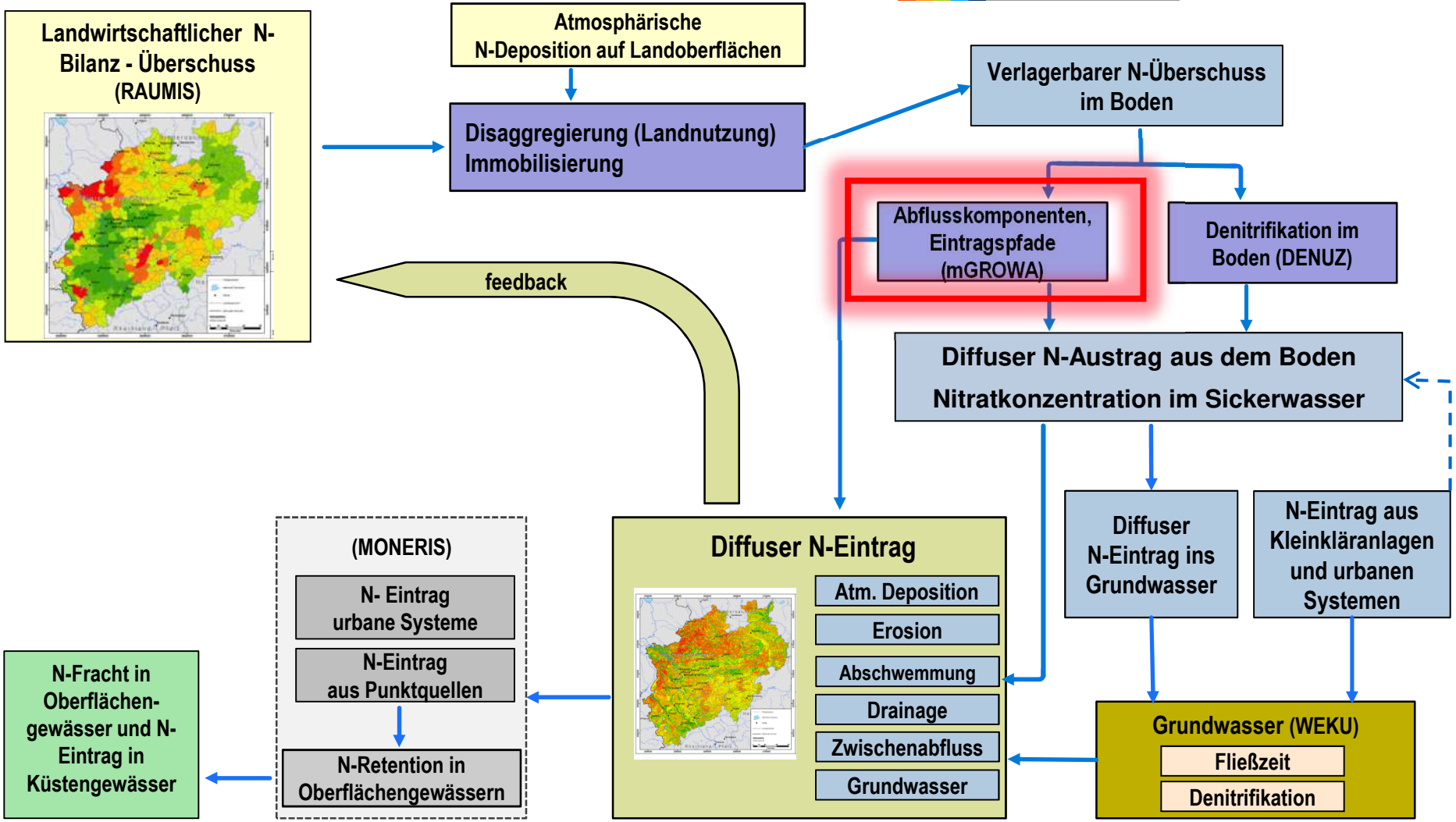
Methodik und Ergebnisse der Modellierung des Wasserhaushalts in NRW (1981-2010) mit mGROWA

12. Dezember 2019 I Frank Herrmann, Björn Tetzlaff, Frank Wendland

GROWA+NRW2021 Modellsystem: RAUMIS-mGROWA-DENUZ-WEKU

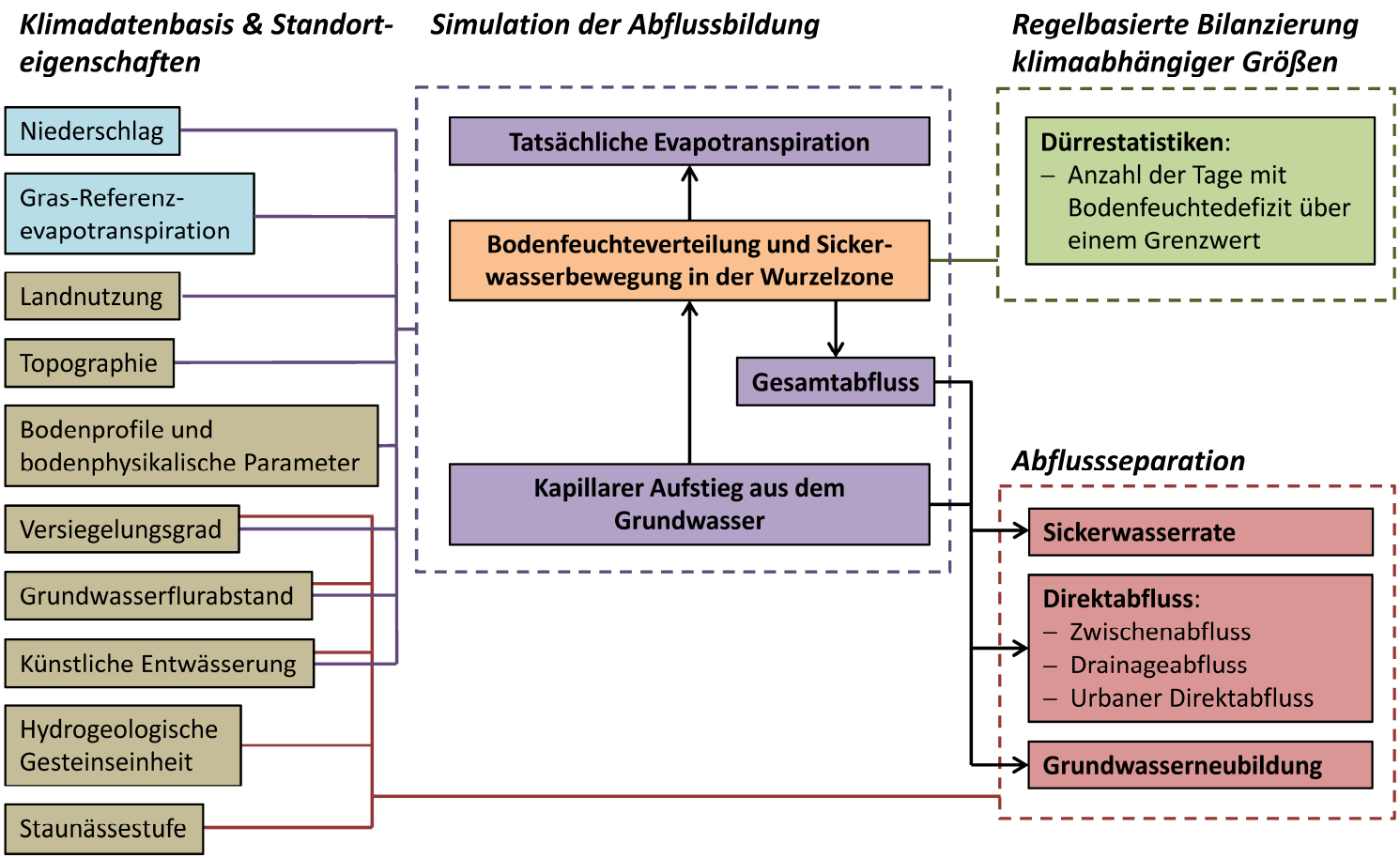


Themen & Gliederung

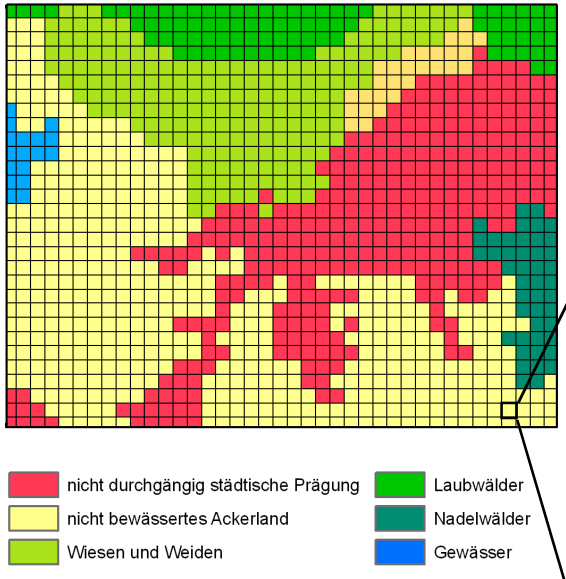
- **mGROWA Modellkonzept**
- **Datengrundlagen im Projekt *GROWA+ NRW 2021***
  - Klimatischer Modellantrieb
  - Landnutzung/Vegetation, Versiegelung, Topographie
  - Bodenkundliche Parameter und Drainagekarte
  - Hydrogeologische Parameter
- **mGROWA-Simulationsergebnisse**
  - Zeitlich hoch aufgelöste Abflussbildung
  - Sickerwasserrate, mittlere jährliche Grundwasserneubildung und Direktabflusskomponenten
  - Trendanalyse 1961 bis zur Gegenwart
- **Evaluierung der mGROWA-Simulationsergebnisse**
- **Differenzen der Grundwasserneubildungskarten 2013 vs. 2018**
- **Zusammenfassung und weitere Nutzung der mGROWA-Ergebnisse**

mGROWA – Modellkonzept

- Rasterbasiertes flächendifferenziertes Wasserhaushaltsmodell.
- Entwickelt am FZ Jülich für **räumlich und zeitlich hochaufgelöste Simulationen** (100 m Raster, Tagesschritte) über lange Perioden (> 30 Jahre) in großen Flussgebieten oder ganzen Ländern.



mGROWA – Grundlegende Gleichungen



Bilanzierung der Wassermengen für jede Zelle auf Basis der Wasserhaushaltsgleichung:

$$p + q_{in} = et_a + q_t + (s_2 - s_1)$$

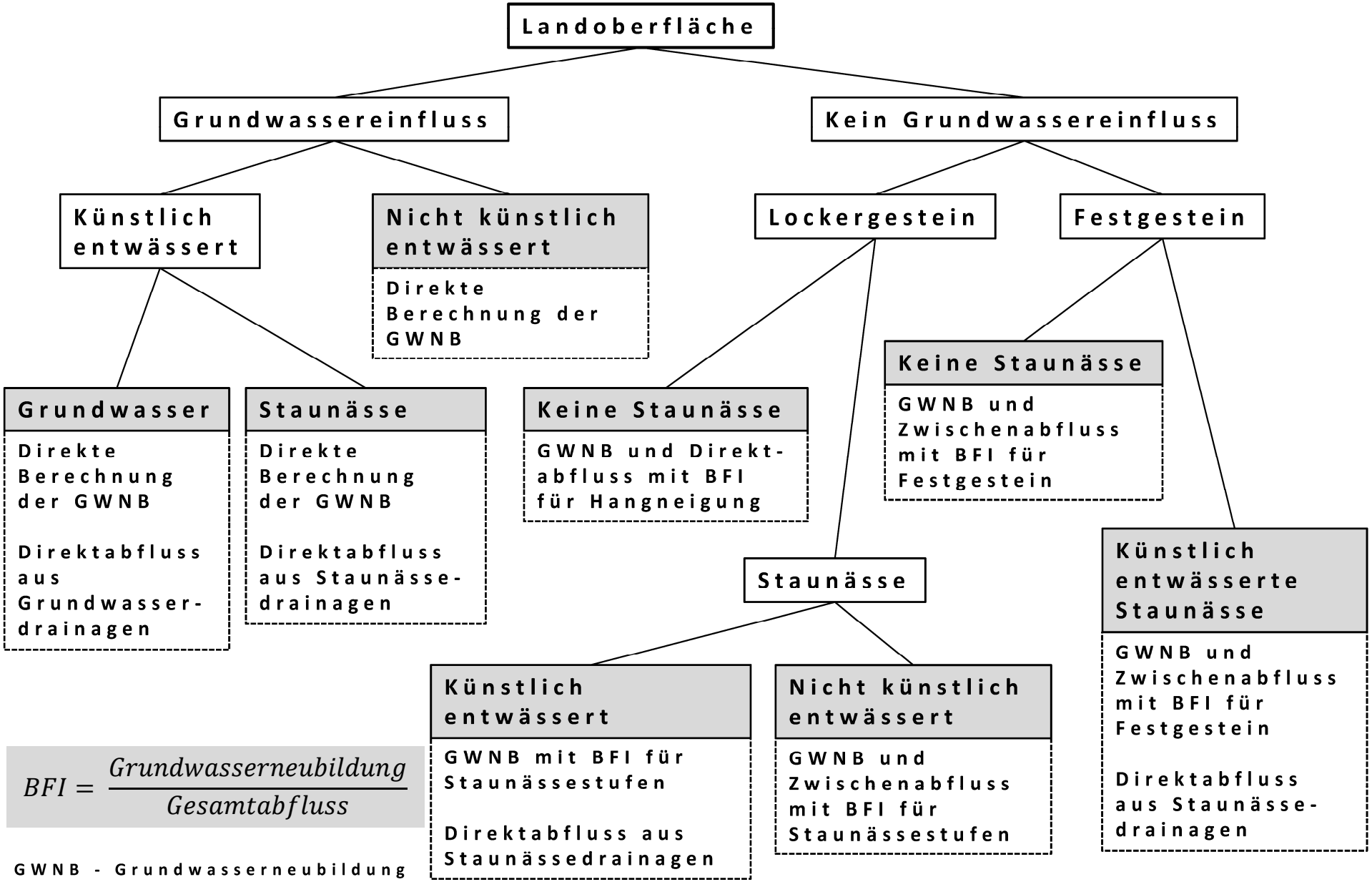
Berechnung der tatsächlichen Verdunstung auf Basis der Penman-Monteith-Gleichung, **standortspezifischer Parameter und standortspezifischer Funktionen**:

$$et_a = et_0 \cdot k_{LN} \cdot f(\beta, \gamma) \cdot \boxed{f(s)}$$

BOWAB auf Standorten mit Vegetation	versiegelt Standorte	… *beliebig erweiterbar*

Die Funktion $f(s)$ ist für verschiedene Standorttypen unterschiedlich definiert.

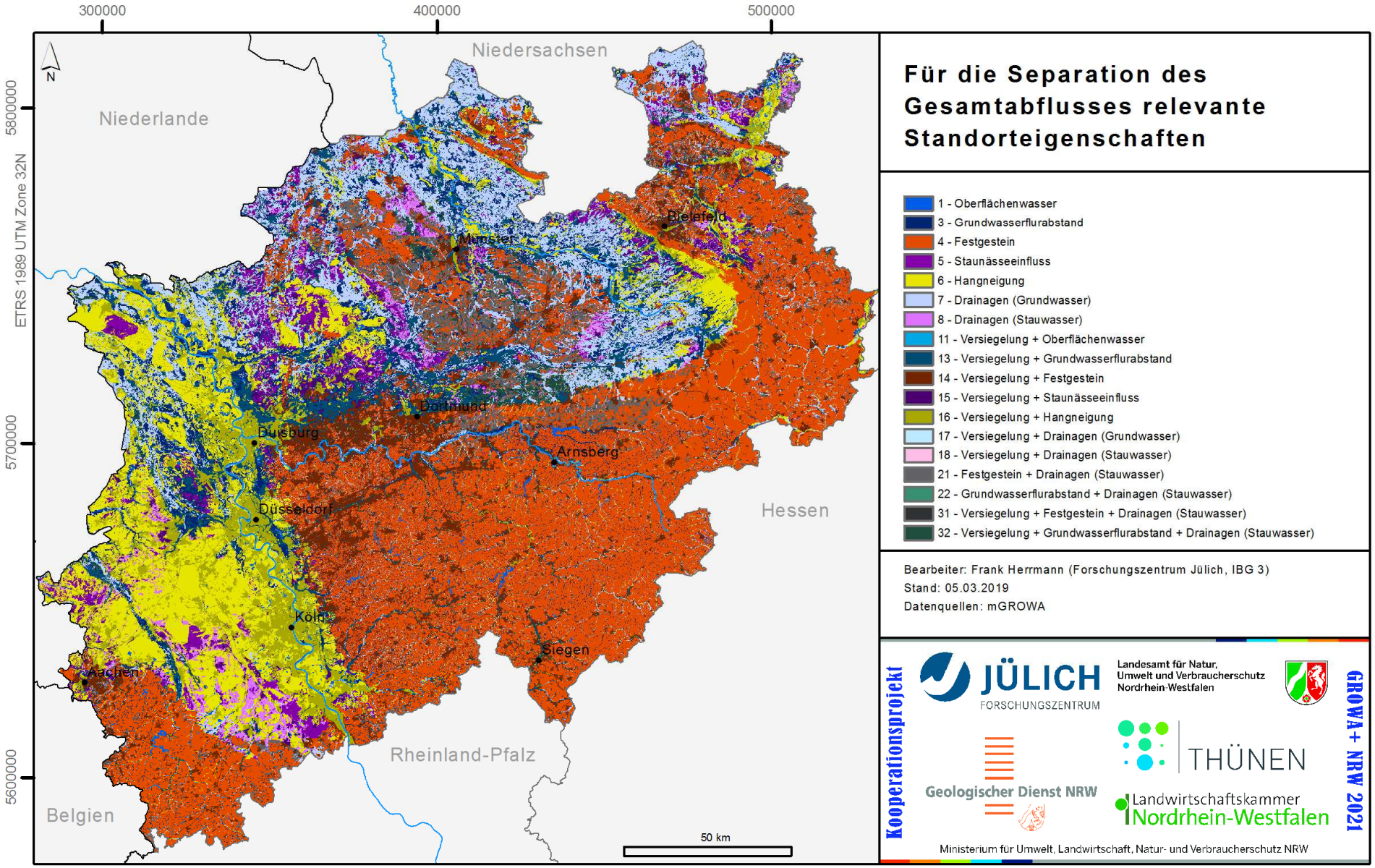
mGROWA – Separation des Gesamtabflusses in Grundwasserneubildung und Direktabflusskomponenten



$$BFI = \frac{Grundwasserneubildung}{Gesamtabfluss}$$

GWNB - Grundwasserneubildung

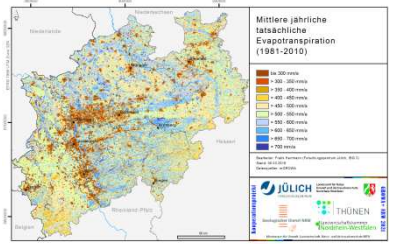
Für die Separation des Gesamtabflusses relevante Standorteigenschaften



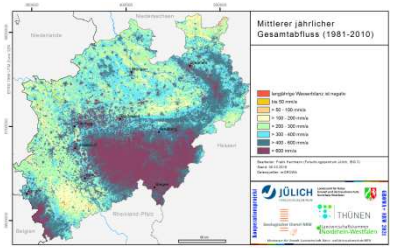
mGROWA – neues Modellsetup für NRW

- **Abdeckung**: gesamte Landesfläche Nordrhein-Westfalen
- **Rasterauflösung:** 100 m → 3.409.661 Zellen je 1 ha groß
- **Geodätisches Referenzsystem**: ETRS89/UTM
- **Zeitliche Auflösung:** Tagesschritte aggregiert auf Monatsschritte
- **Simulationszeitraum**: 01.11.1960 bis 28.02.2018
- **Hydrologische 30-Jahres-Periode für wasserwirtschaftliche Planung:** 1981-2010

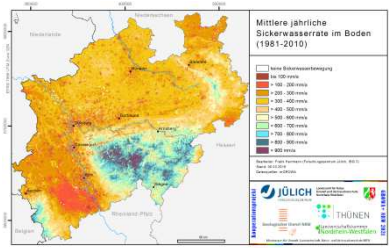
Tatsächliche Evapotranspiration



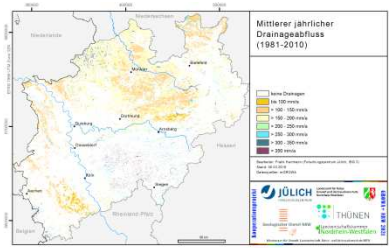
Gesamtabfluss



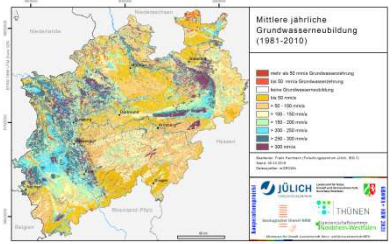
Sickerwasserrate



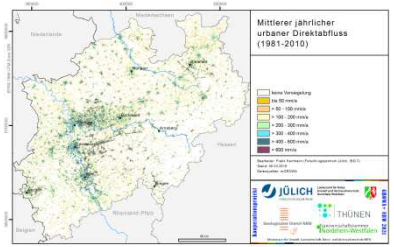
Drainageabfluss



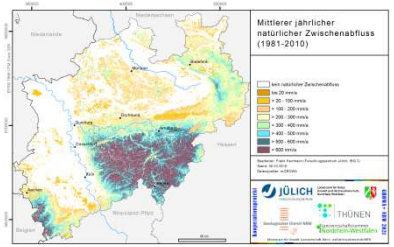
Grundwasserneubildung



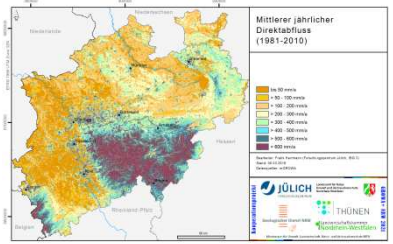
Urbaner Direktabfluss



Zwischenabfluss



Direktabfluss



mGROWA – Übersicht Datengrundlagen

Datengrundlagen	Datenquellen
Klimadaten – Niederschlag – Potentielle Verdunstung über Gras	– Climate Data Center (CDC) Deutscher Wetterdienst (DWD) ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/
Landnutzung – Landnutzungstypen – Vegetationstypen	– ATKIS Basis-DLM Landesvermessung Nordrhein-Westfalen – InVeKoS Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2014/2016)
Topographie – Geländeneigung, Geländeexposition	– Digitales Höhenmodell DHM 10 Landesvermessung Nordrhein-Westfalen
Oberflächenversiegelung – Rasterbasierte Versiegelungsgrade	– High Resolution Layer: Imperviousness Degree (IMD),2012 reference year, 20m x 20m European Environment Agency
Bodenparameter – Bodentypen, Bodenarten, etc. – Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität, etc. – Grundwasserflurabstand, Staunässestufen	– Bodenkarte 1:50.000 (BK 50) Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
Hydrogeologische Gesteinseinheiten	– HK100, HK50, HK25 Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
Karte der künstlich entwässerten landwirtschaftlichen Flächen	– Forschungszentrum Jülich GmbH, B. Tetzlaff

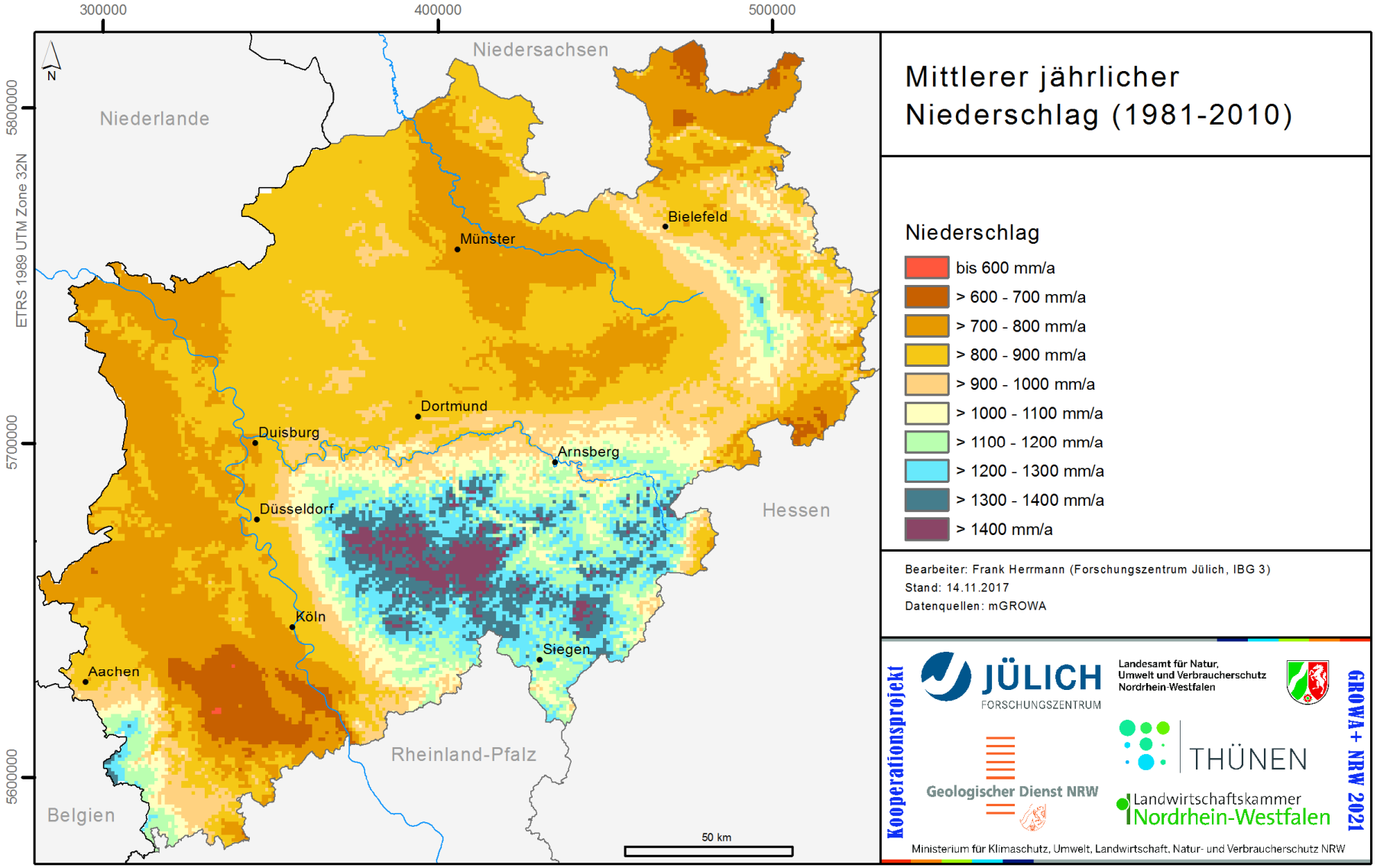
Klimadatenraster des DWD

- **Quelle**: Climate Data Center (CDC) des DWD ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/
- **Rasterauflösung:** 1000 m Raster des DWD wurde direkt übertragen auf das 100 m Modellraster
- **Zeitliche Auflösung:** Monatsschritte
- **Verfügbarkeit**:
  - 1881 bis Gegenwart – Monatliche Raster der Summe des Niederschlags
  - 1991 bis Gegenwart – Monatliche Raster der Summe der potentiellen Evapotranspiration über Gras berechnet mit dem Modell AMBAV (Kernpunkt ist die Penman-Monteith-Gleichung)
  - 1991 bis Gegenwart – Tägliche Raster der Summe der potentiellen Evapotranspiration über Gras berechnet mit dem Modell AMBAV (Kernpunkt ist die Penman-Monteith-Gleichung)

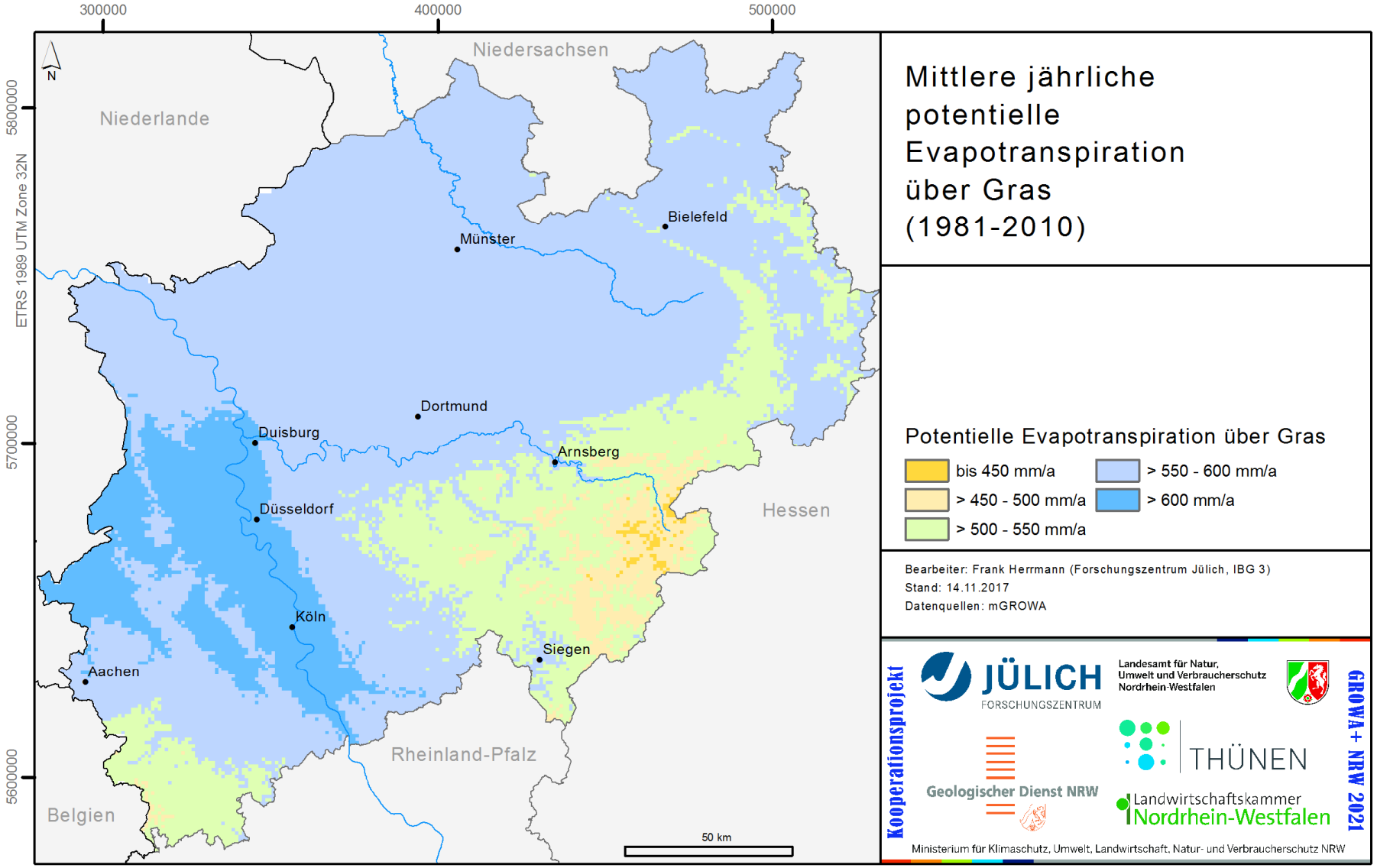
- **Quelle**: 2010 durch DWD bereitgestellt
- **Rasterauflösung:** 1000 m Raster des DWD wurde auf das 100 m Modellraster interpoliert
- **Zeitliche Auflösung:** Monatsschritte
- **Verfügbarkeit**:
  - 1961 bis 2005 – Monatliche Raster der Summe der **potentiellen Evapotranspiration über Gras** berechnet mit der FAO-Penman-Monteith-Gleichung

→ Zusammensetzen der Periode 1981-2010 aus monatlichen Raster der Summe der **potentiellen Evapotranspiration über Gras**, die mit 2 leicht unterschiedlichen Methoden berechnet wurden.

Mittlerer jährlicher Niederschlag (1981-2010)

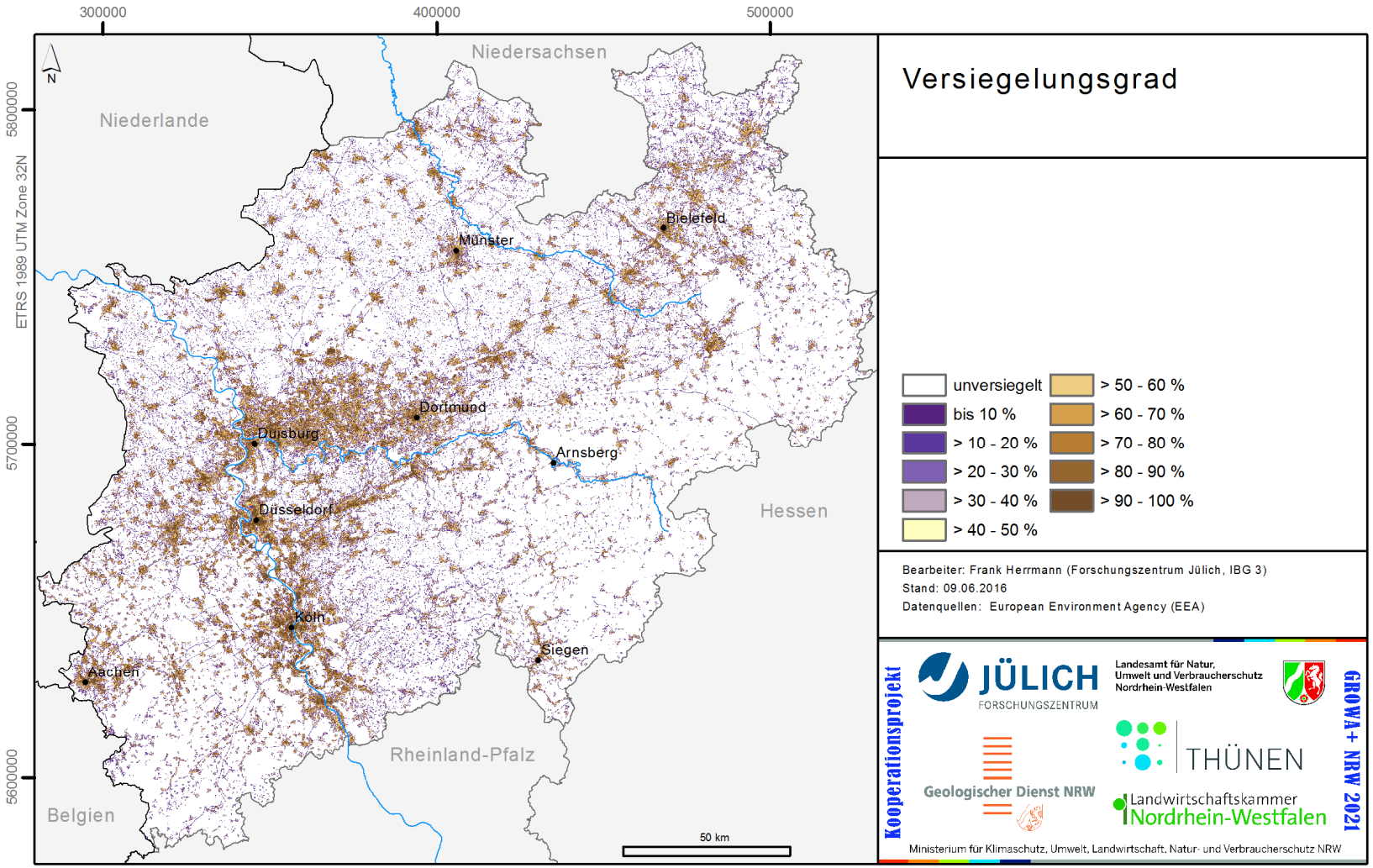


Mittlere jährliche potentielle Evapotranspiration über Gras (1981-2010)



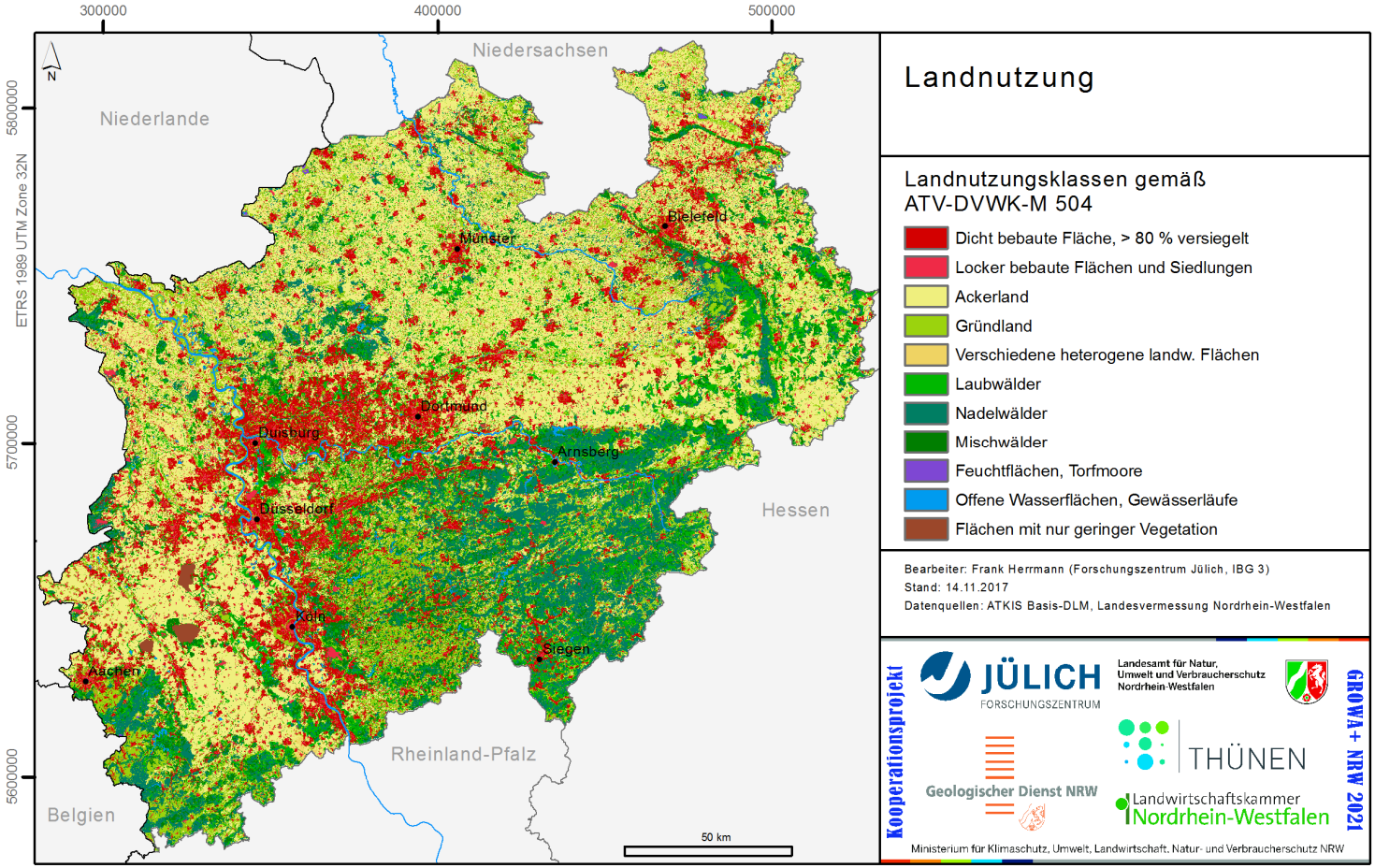
Rasterbasierte Versiegelungsgrade

- Versiegelte Oberflächen können maximal 1 mm Niederschlagswasser pro Tag speichern und verdunsten. Überschüssiges Wasser fließt ab.

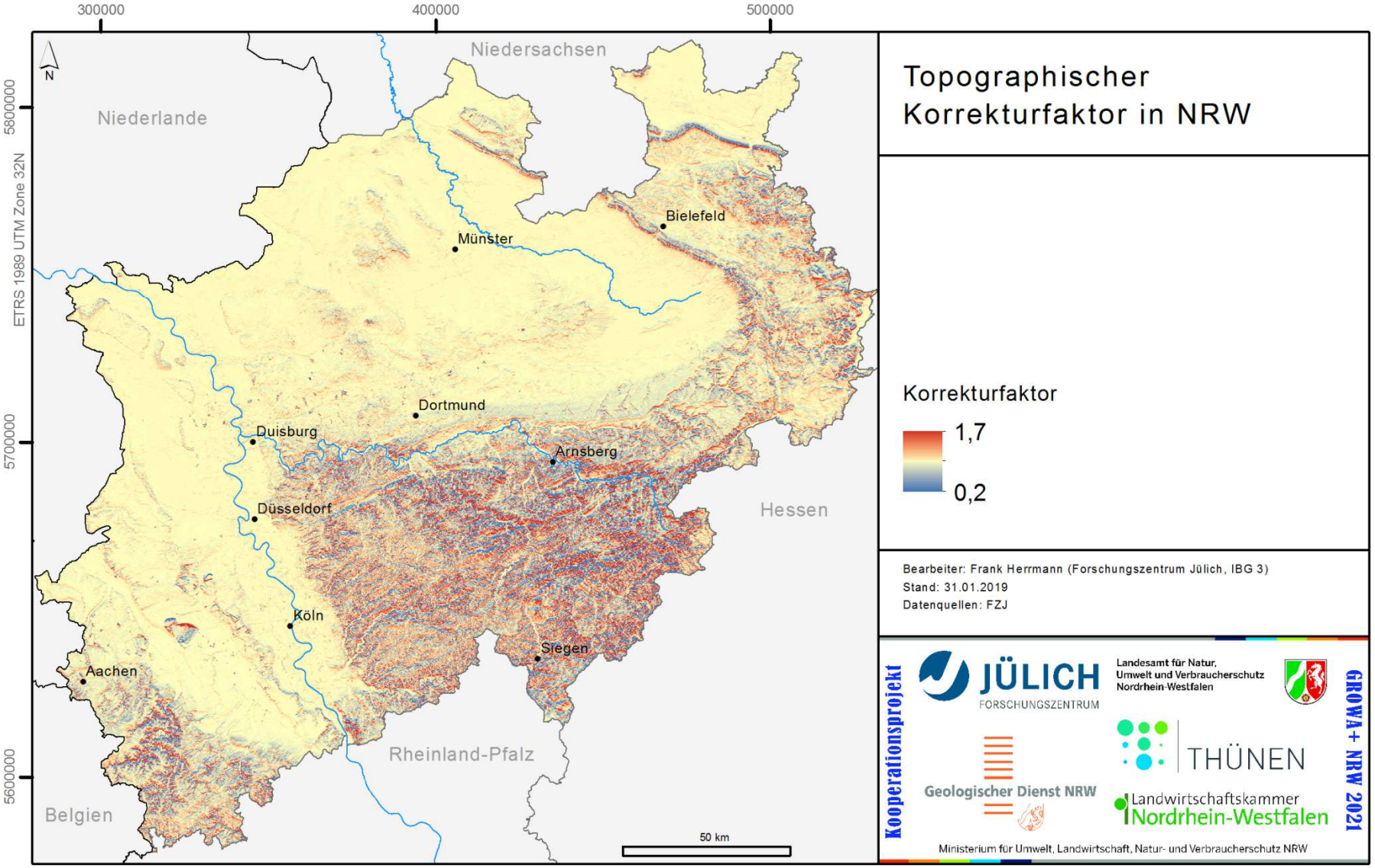


Parametrisierung des DLM für mGROWA-Simulationen

- Aus den Objektarten sowie Vegetations- und Oberflächenmerkmalen des DLM wurden insgesamt 66 Landnutzungs-ID (luid) für die mGROWA-Simulationen zusammengestellt.
- Aus der InVeKoS Datenbank wurde die Verteilung von Acker- und Grünland aktualisiert.

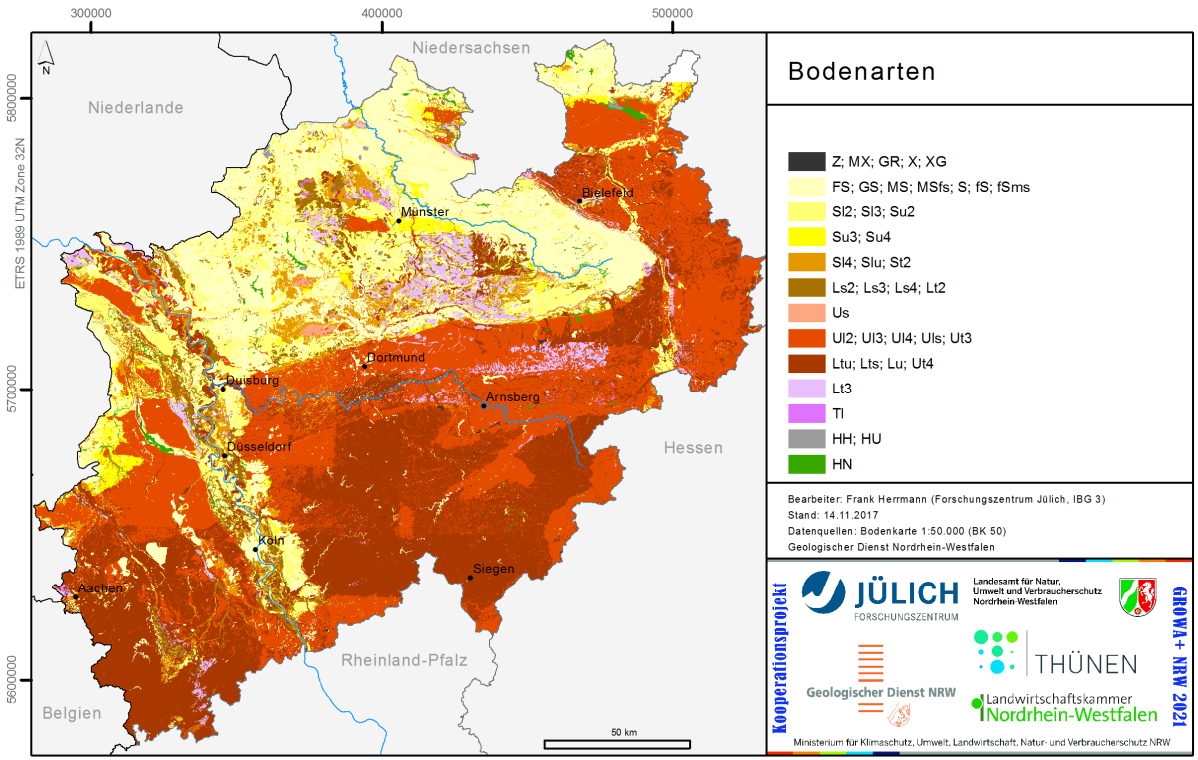


Topographischer Korrekturfaktor in NRW

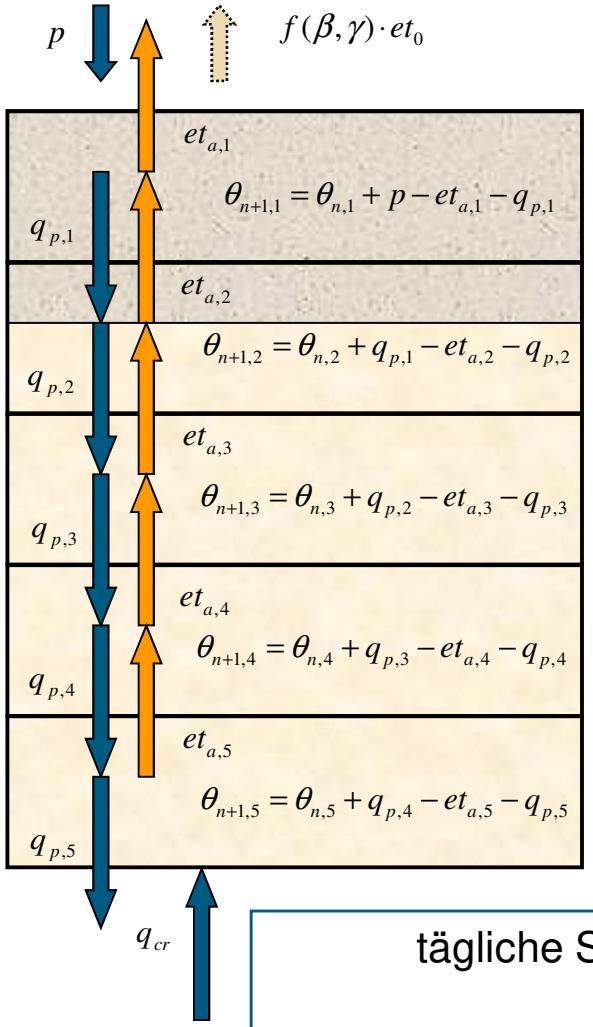


Bodenkarte BK 50 – Bodenarten

- **Von den Bodenarten abhängige Parameter zur Charakterisierung des Bodenwasserspeichers und der Bodenfeuchtedynamik**:
  - Feldkapazität, pflanzennutzbare Feldkapazität, Lagerungsdichte
  - Tabellierte kapillare Aufstiegshöhen und -raten
  - van-Genuchten-Parameter
  - Zulässige Sickerwasserbewegung auf präferenziellen Fließwegen vor Erreichen der Feldkapazität



Bodenparameter zur Parametrisierung des Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmoduls



$$et_{a,1}=\left(p-\left(p-et_{\max}\right)\cdot S_1(\theta)\right)\cdot A_1$$

$$q_{p,1}=\begin{cases}0 & \text{für } \theta_1\le FK_1\\ \theta_1-FK_1 & \text{sonst}\end{cases}$$

$$et_{a,2}=et_{\max}\cdot S_2(\theta)\cdot A_2$$

$$q_{p,2}=\begin{cases}0 & \text{für } \theta_2\le FK_2\\ \theta_2-FK_2 & \text{sonst}\end{cases}$$

$$et_{a,3}=et_{\max}\cdot S_3(\theta)\cdot A_3$$

$$q_{p,3}=\begin{cases}0 & \text{für } \theta_3\le FK_3\\ \theta_3-FK_3 & \text{sonst}\end{cases}$$

$$et_{a,4}=et_{\max}\cdot S_4(\theta)\cdot A_4$$

$$q_{p,4}=\begin{cases}0 & \text{für } \theta_4\le FK_4\\ \theta_4-FK_4 & \text{sonst}\end{cases}$$

$$et_{a,5}=et_{\max}\cdot S_5(\theta)\cdot A_5$$

$$q_{p,5}=\begin{cases}0 & \text{für } \theta_5\le FK_5\\ \theta_5-FK_5 & \text{sonst}\end{cases}$$

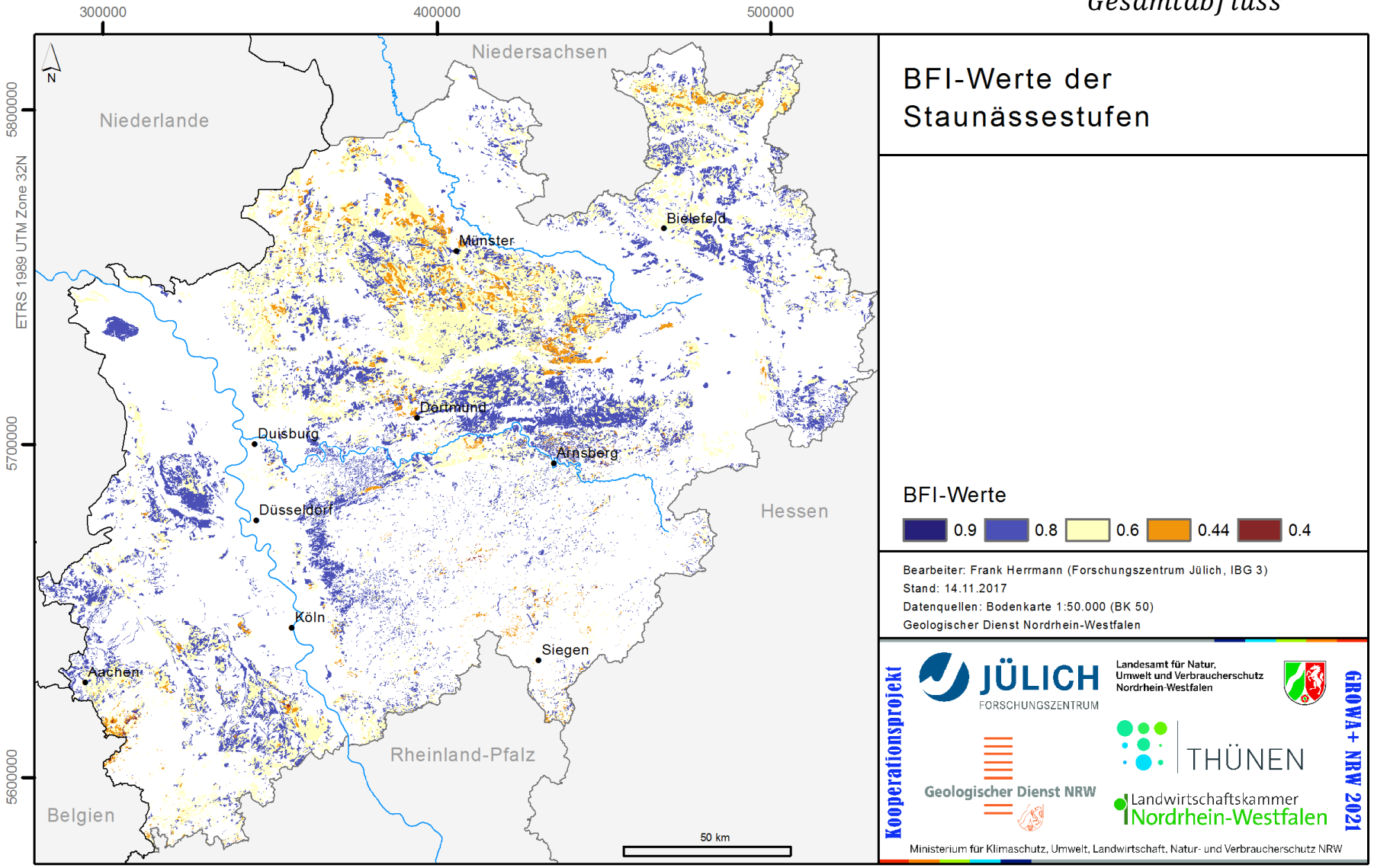
tägliche Sickerwasserrate
=
Gesamtabfluss von dieser Zelle

- Automatisierte Gliederung aller Rasterzellen mit Vegetation in beliebig viele Schichten (derzeit 5 Schichten je 3 dm mächtig).
- Automatisierte Parametrisierung der Modellschichten auf Basis kartierter Bodenprofile (Berechnung nFK, FK, LD, …)

1. Bestimmung von p und et_0
2. Bestimmung der kapillaren Aufstiegsrate in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt
3. Berechnung der tatsächlichen Verdunstung in Abhängigkeit von Bodenfeuchte und Ausschöpfungstiefe.
4. Berechnung der Sickerwasserraten zwischen den Schichten und aus der Wurzelzone (einfaches Überlaufmodell)
5. Neuberechnung des Wassergehaltes pro Schicht

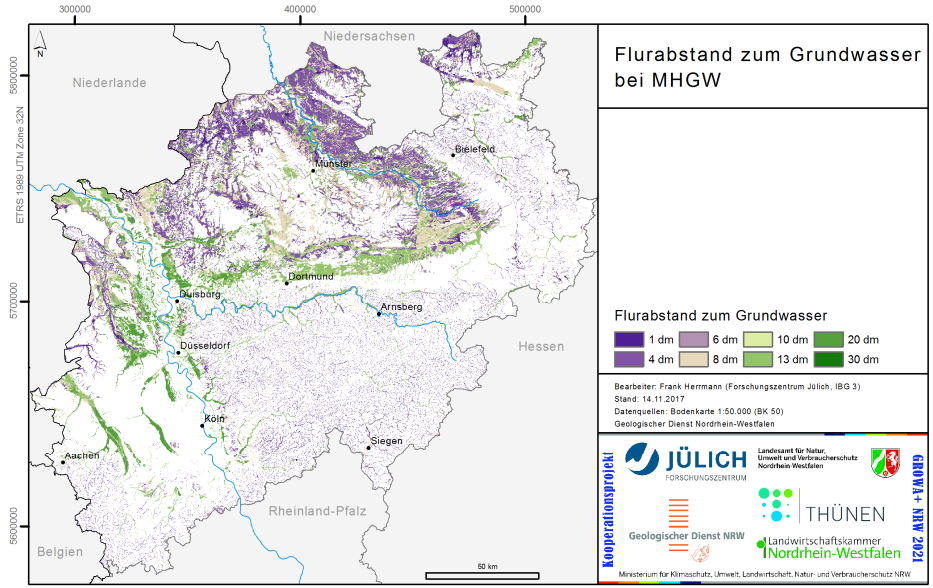
BFI-Werte der Staunässestufen der BK50

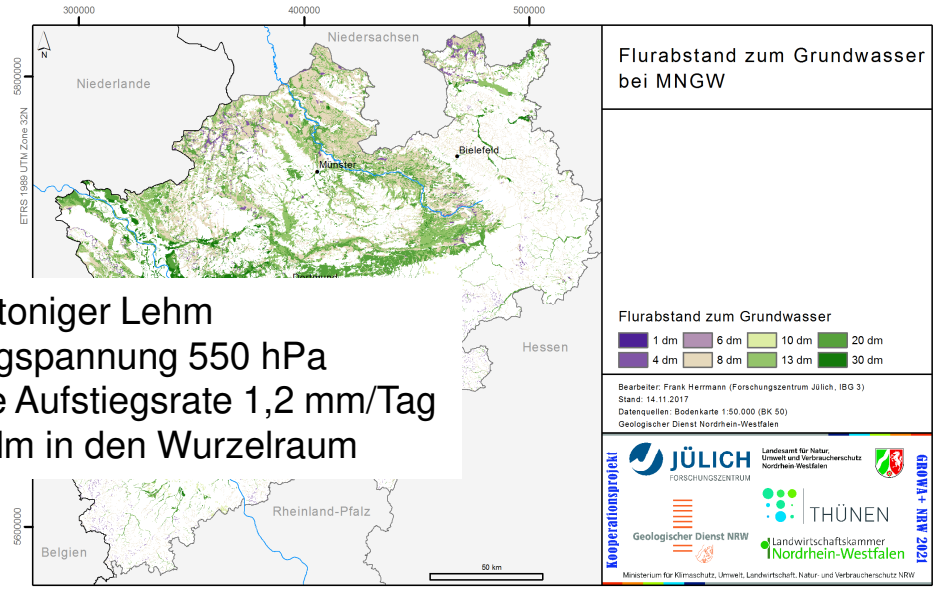
$$BFI = \frac{Grundwasserneubildung}{Gesamtabfluss}$$

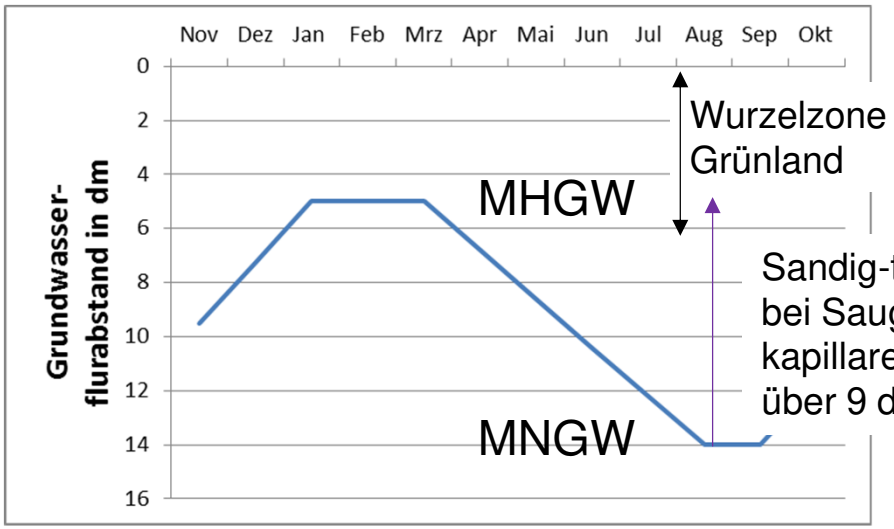


Grundwasserflurabstand im Jahresgang

- **Datengrundlage**:
  - Grundnässestufen der Bodenkarte 1:50.000 (BK 50)
  - In Zonen mit Sümpfungseinfluss aus Grundwassergleichenplänen
- Interpolation des Jahresganges zwischen dem mittleren Hochstand (MHGW) und dem mittleren Niedrigstand (MNGW) des Grundwassers

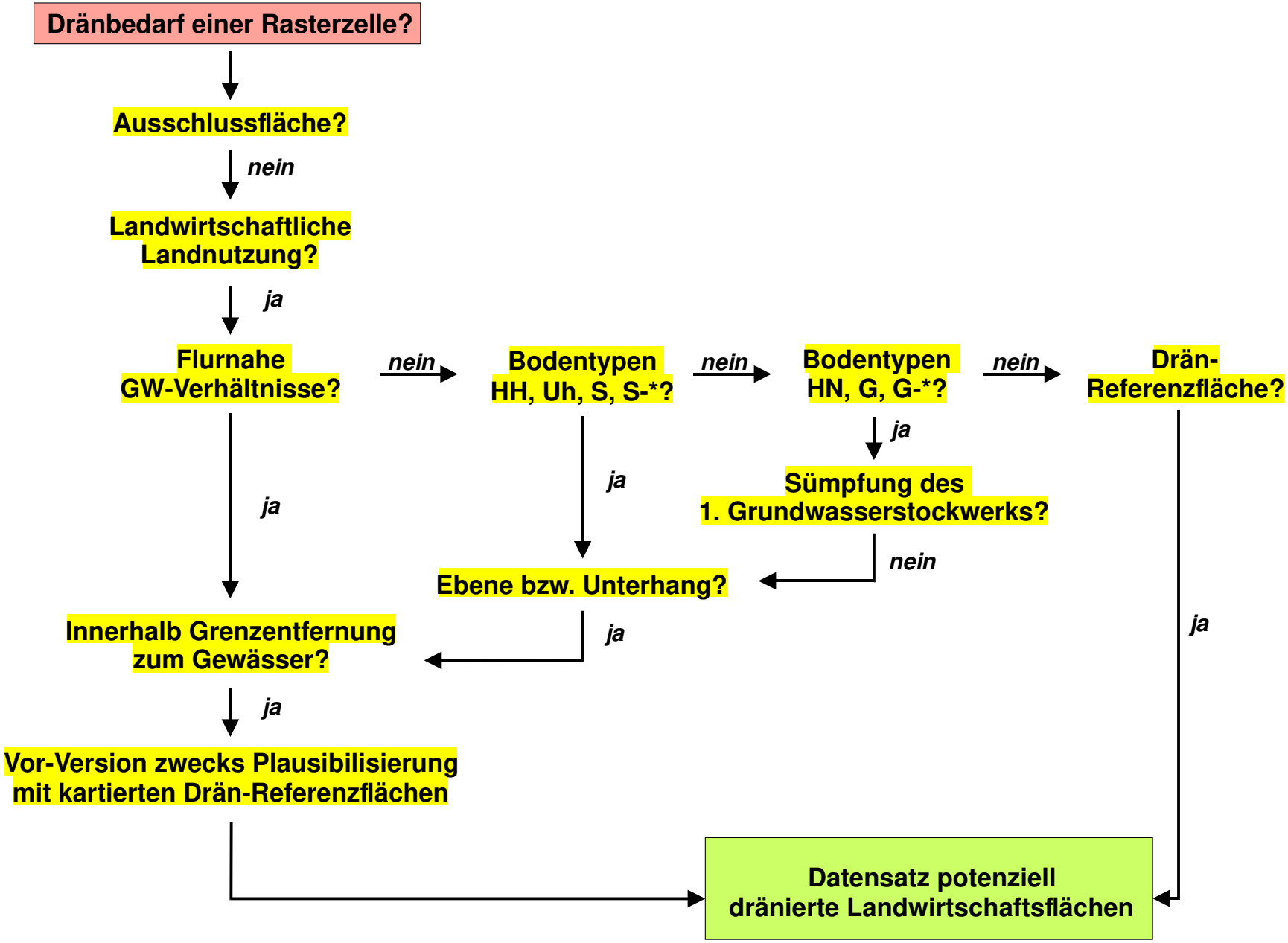




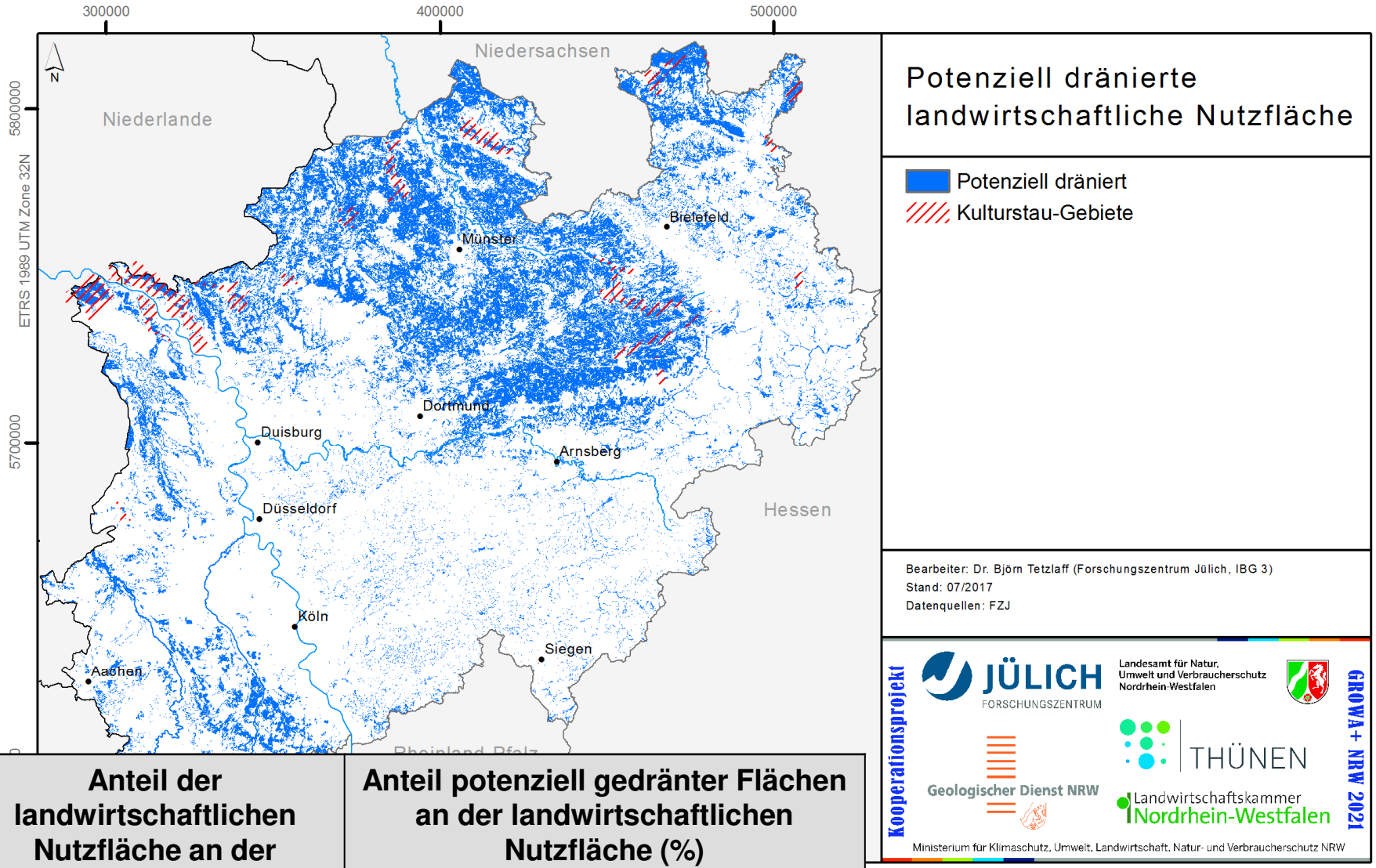


Sandig-toniger Lehm
bei Saugspannung 550 hPa
kapillare Aufstiegsrate 1,2 mm/Tag
über 9 dm in den Wurzelraum

Ableitung potenziell dränierter Flächen in NRW

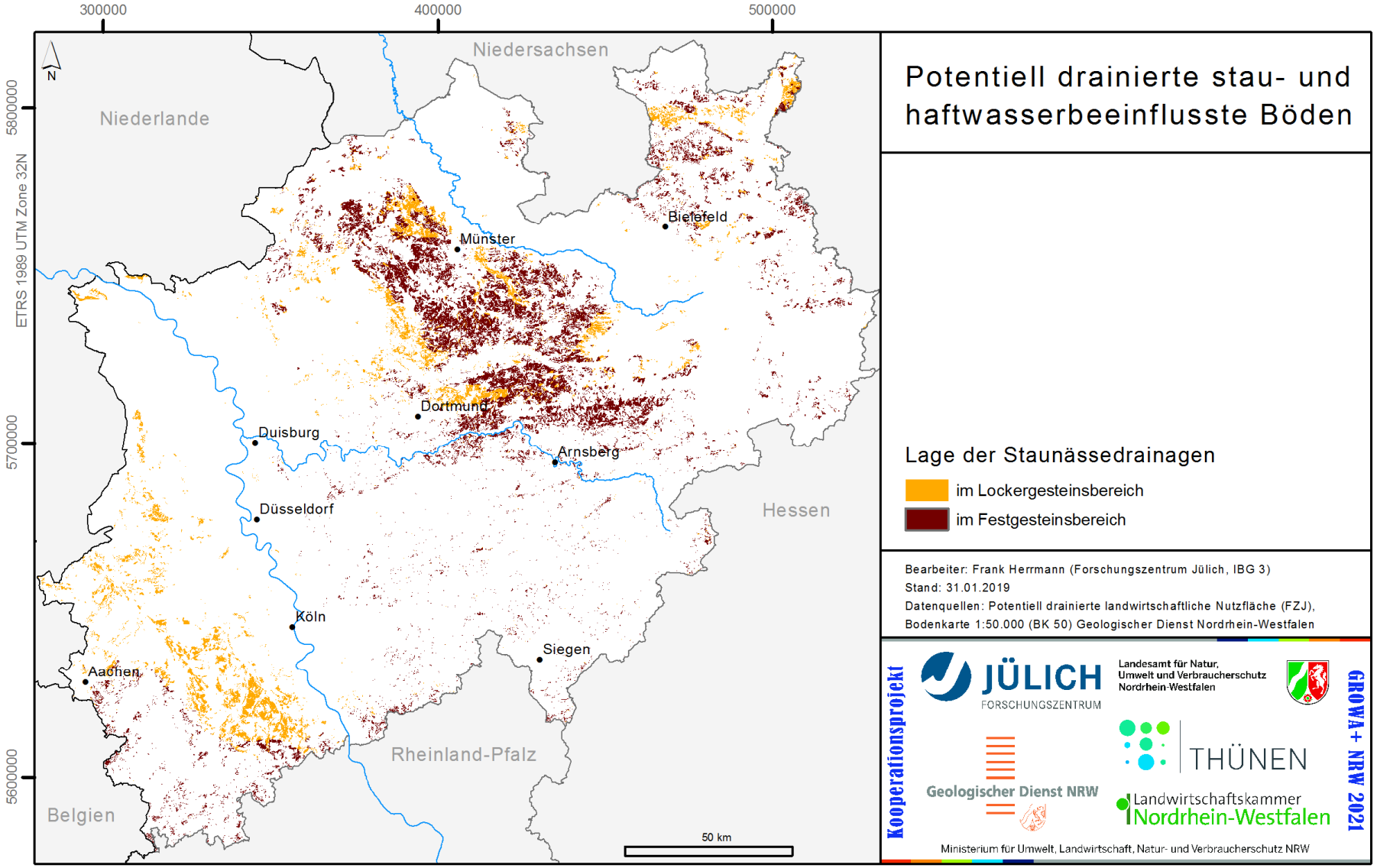


Potenziell dränierte Landwirtschaftsfläche



Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche an der Gesamtfläche (%)	Anteil potenziell gedränter Flächen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (%)
52	40

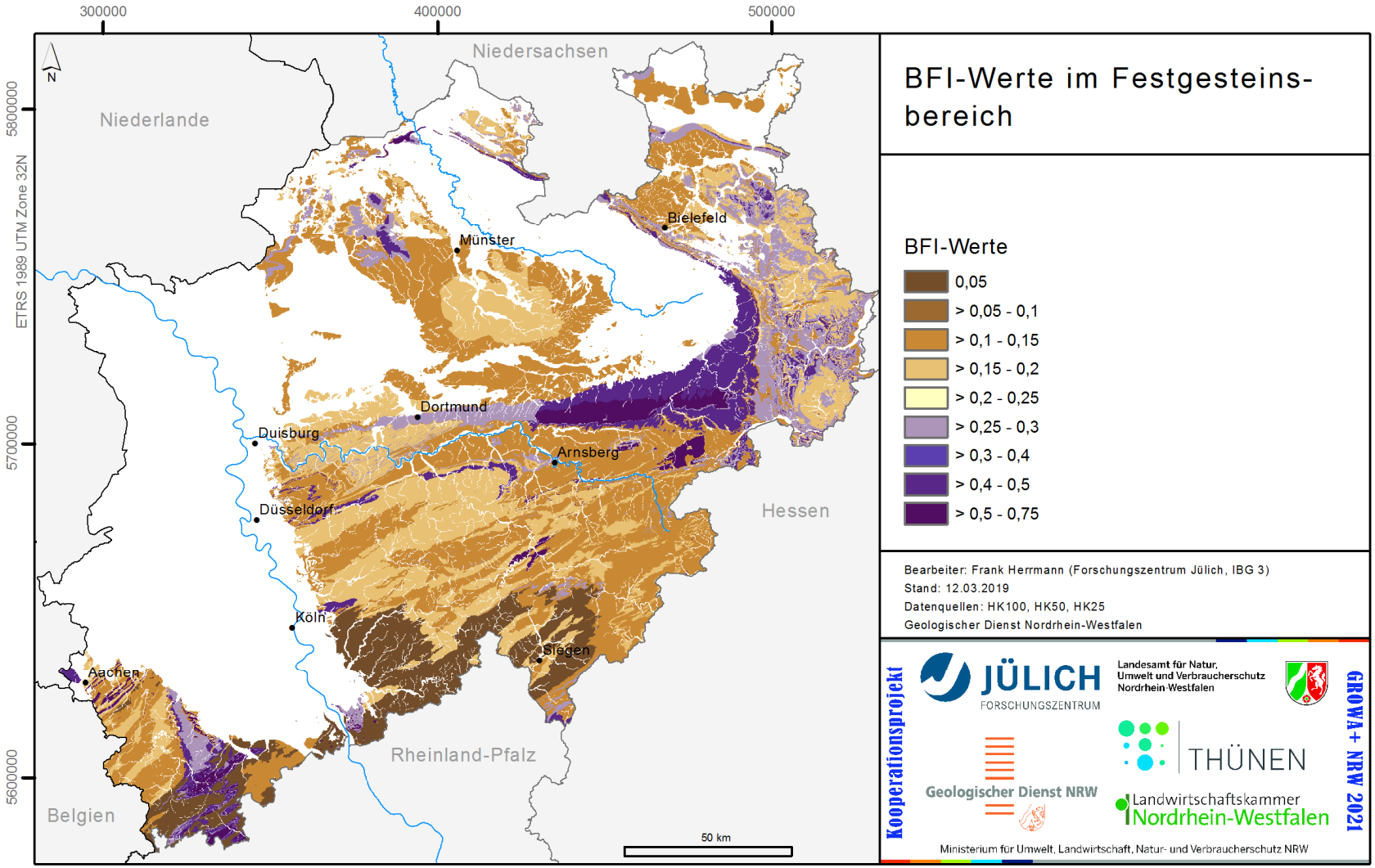
Staunässedrainagen



BFI-Werte im Festgestein

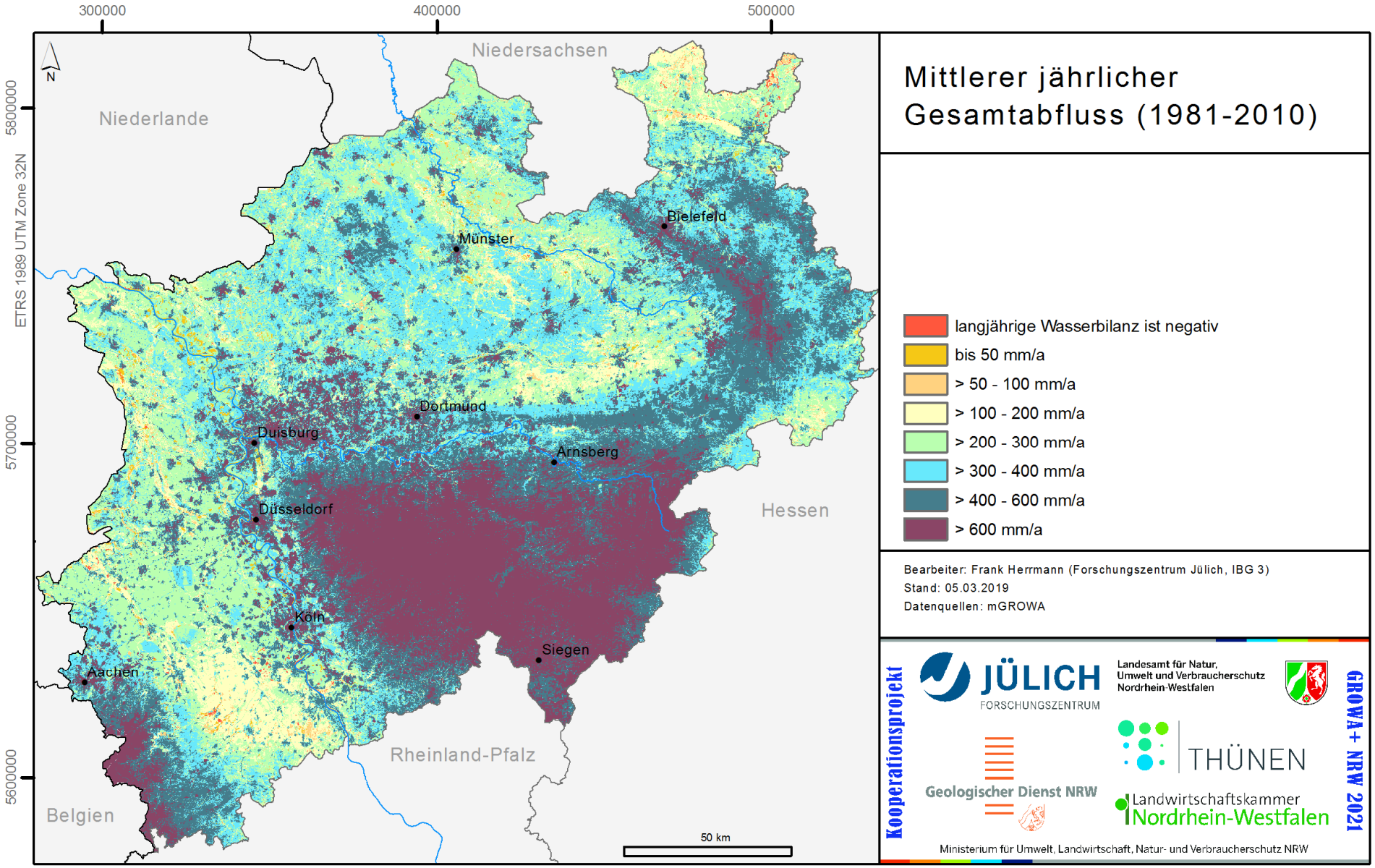
196 relevante hydrogeologische Festgesteinseinheiten wurden individuell parametrisiert

$$BFI = \frac{Grundwasserneubildung}{Gesamtabfluss}$$

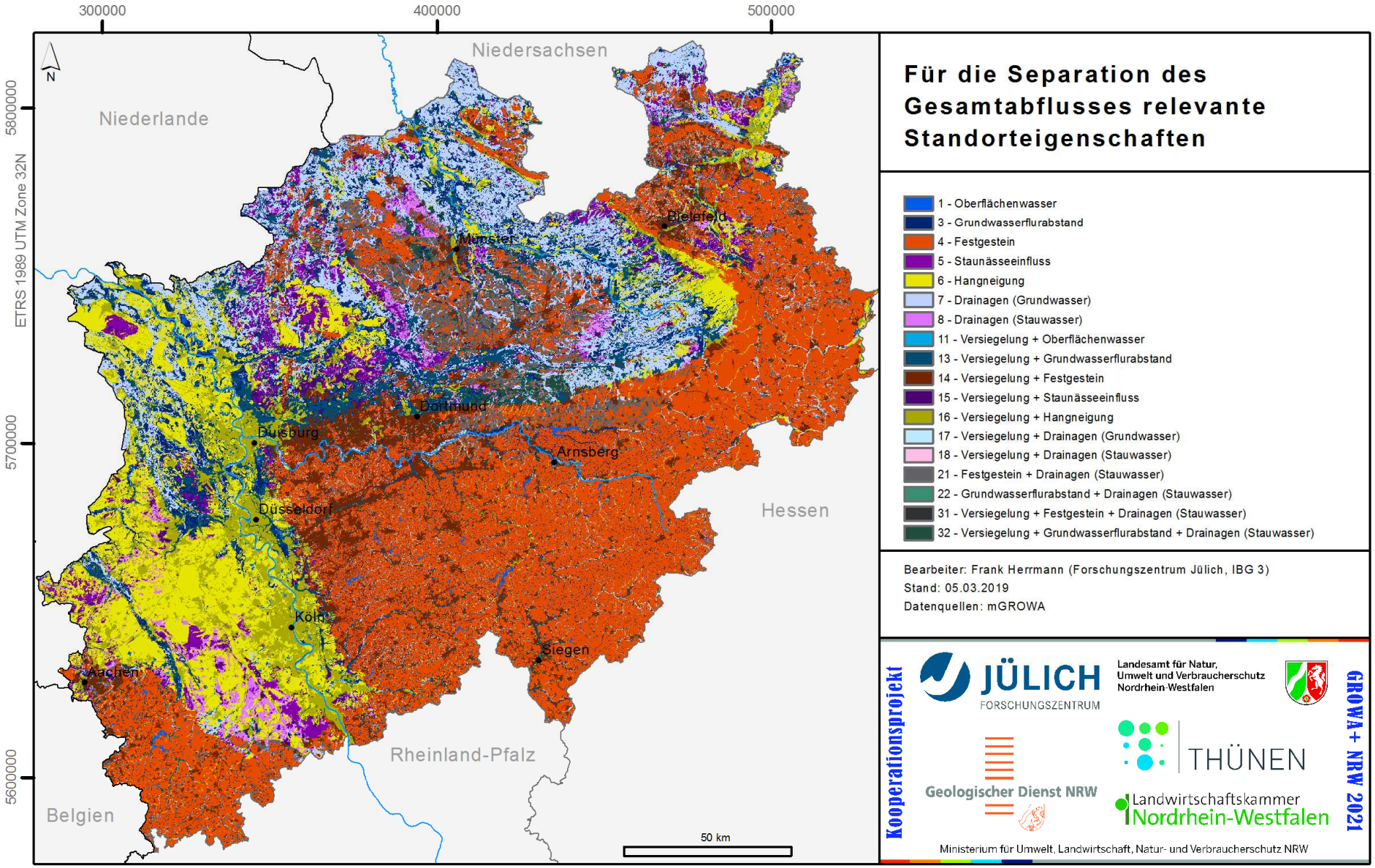


mGROWA Ergebnisse (1981-2010)

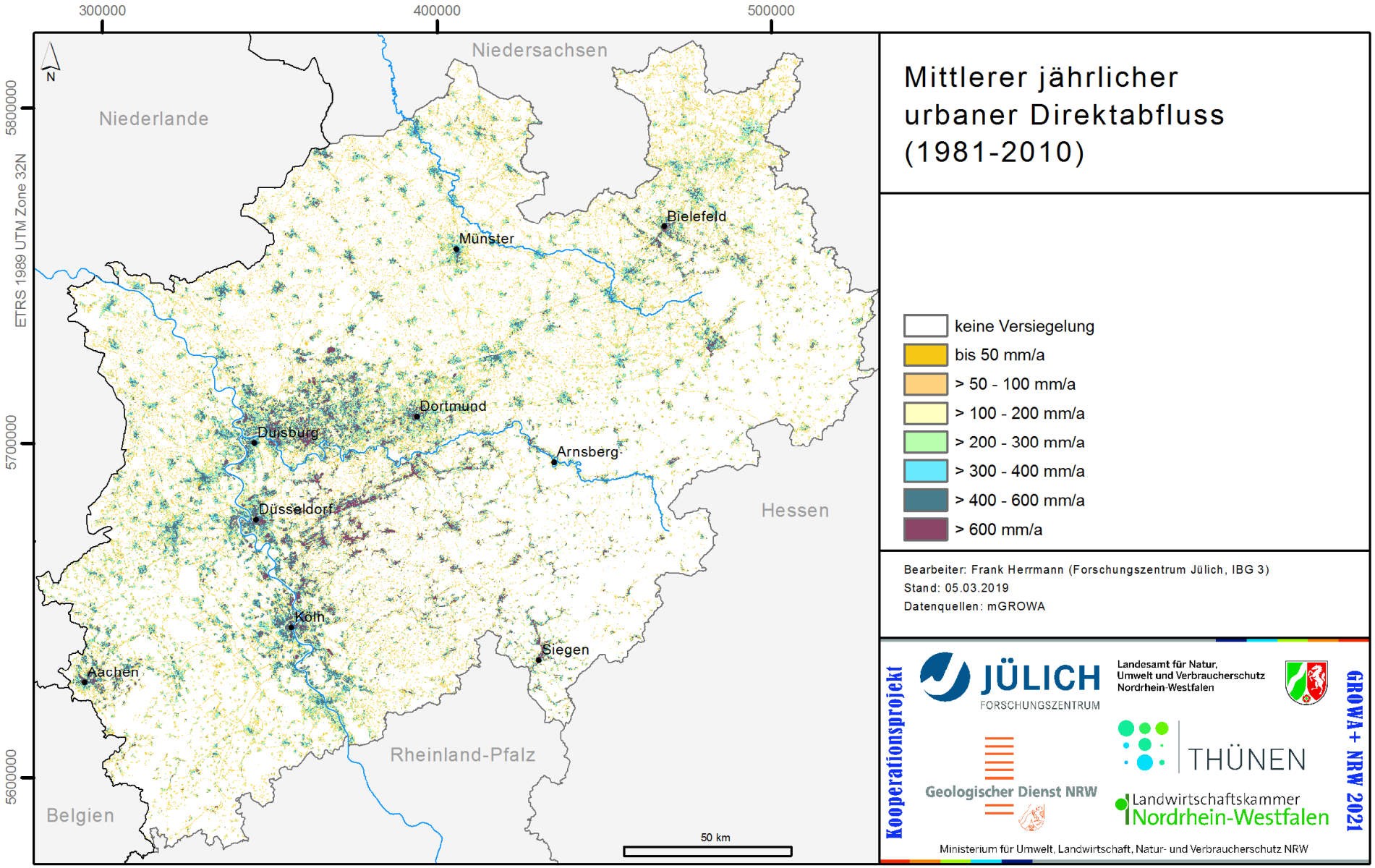
Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss (1981-2010) in mm/a



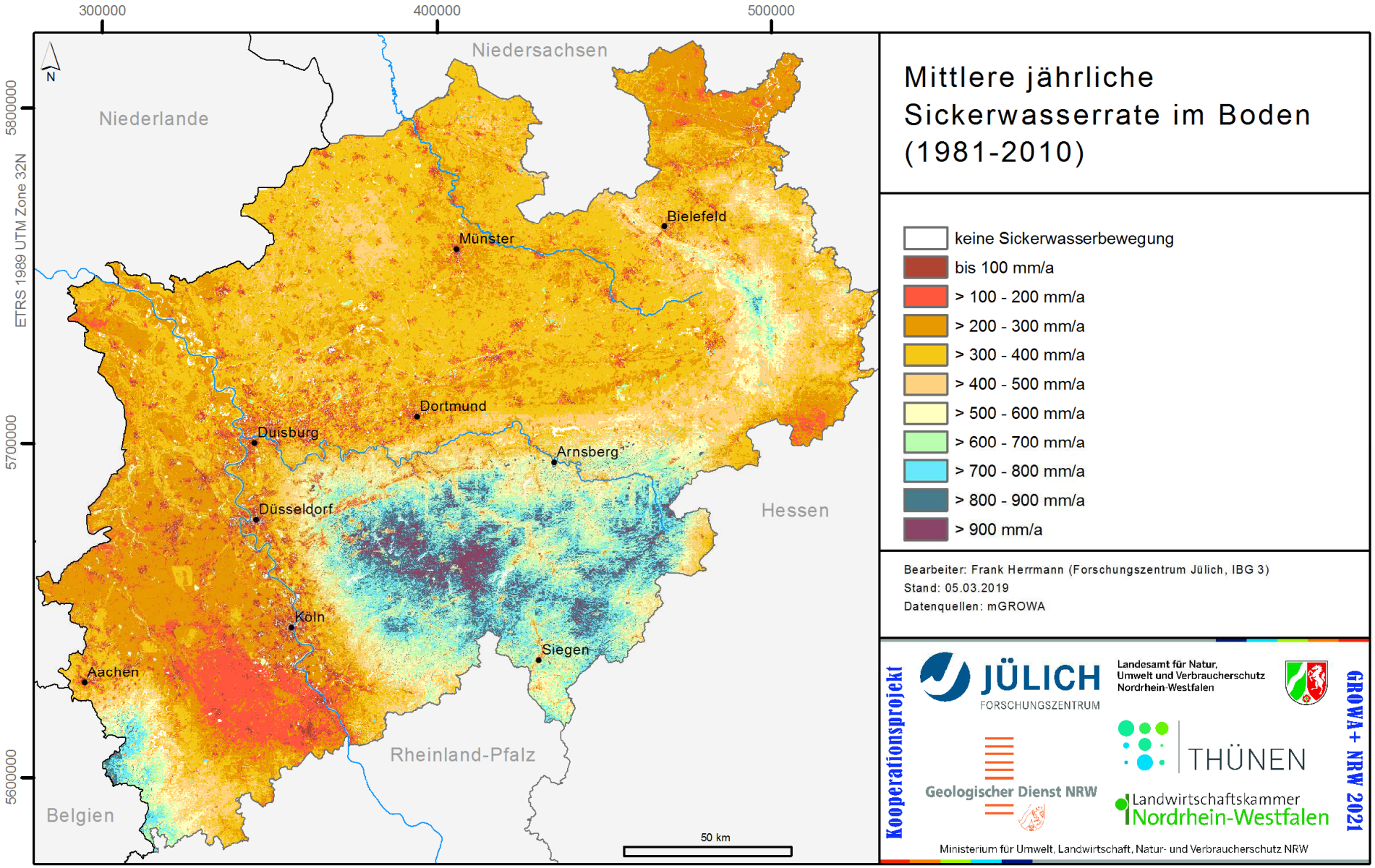
Für die Separation des Gesamtabflusses relevante Standorteigenschaften



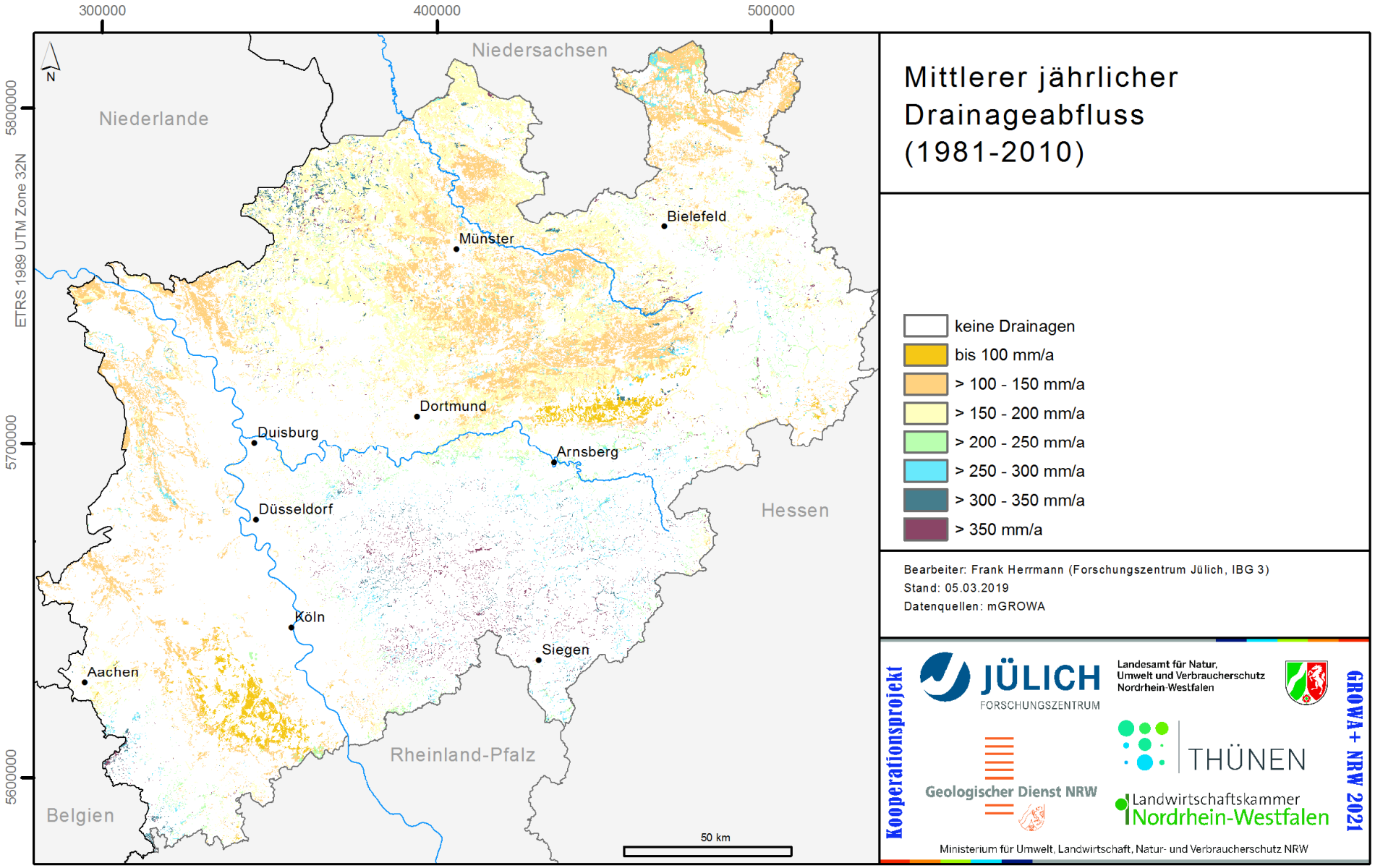
Mittlerer jährlicher urbaner Direktabfluss (1981-2010) in mm/a



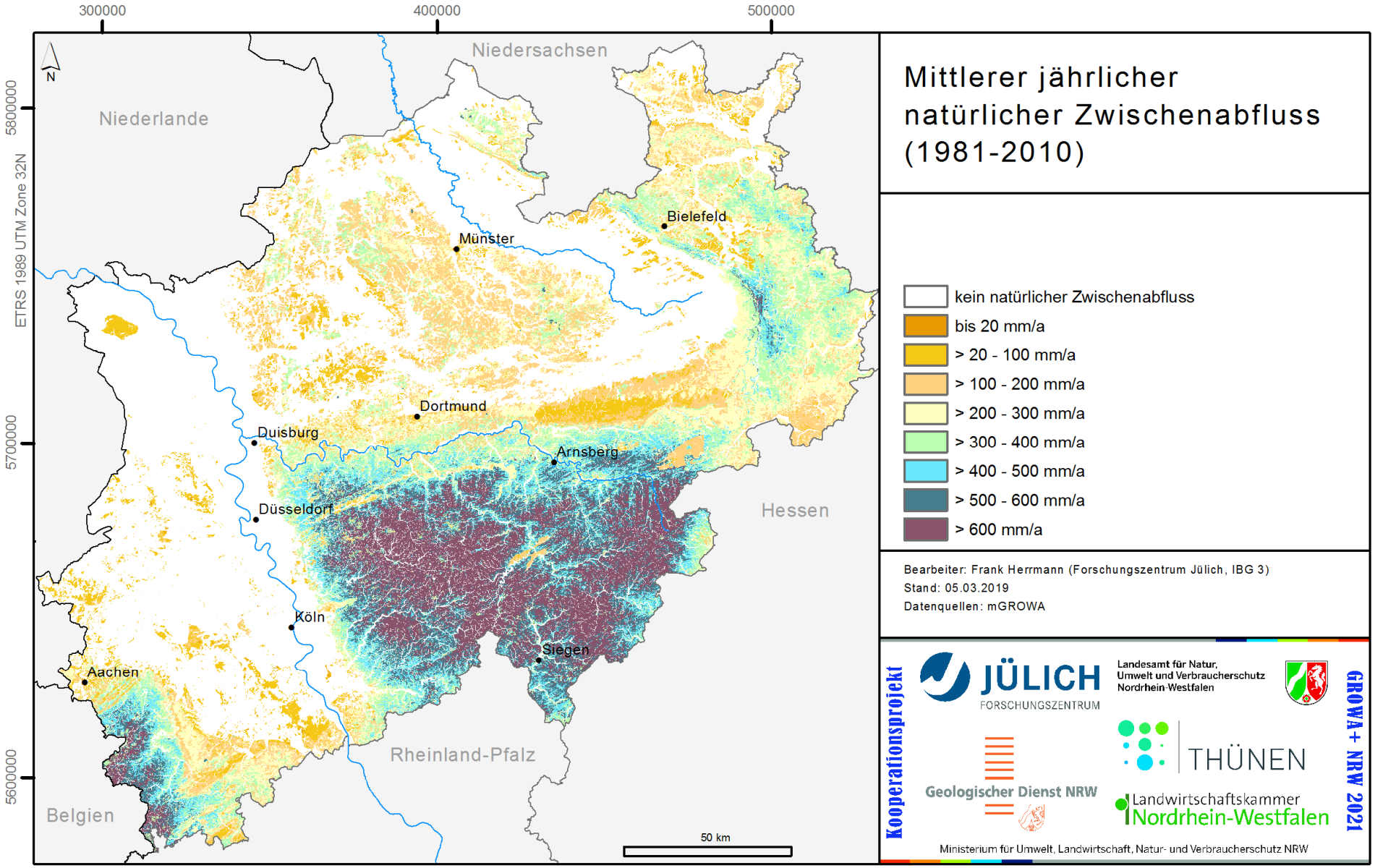
Mittlere jährliche Sickerwasserrate im Boden (1981-2010) in mm/a



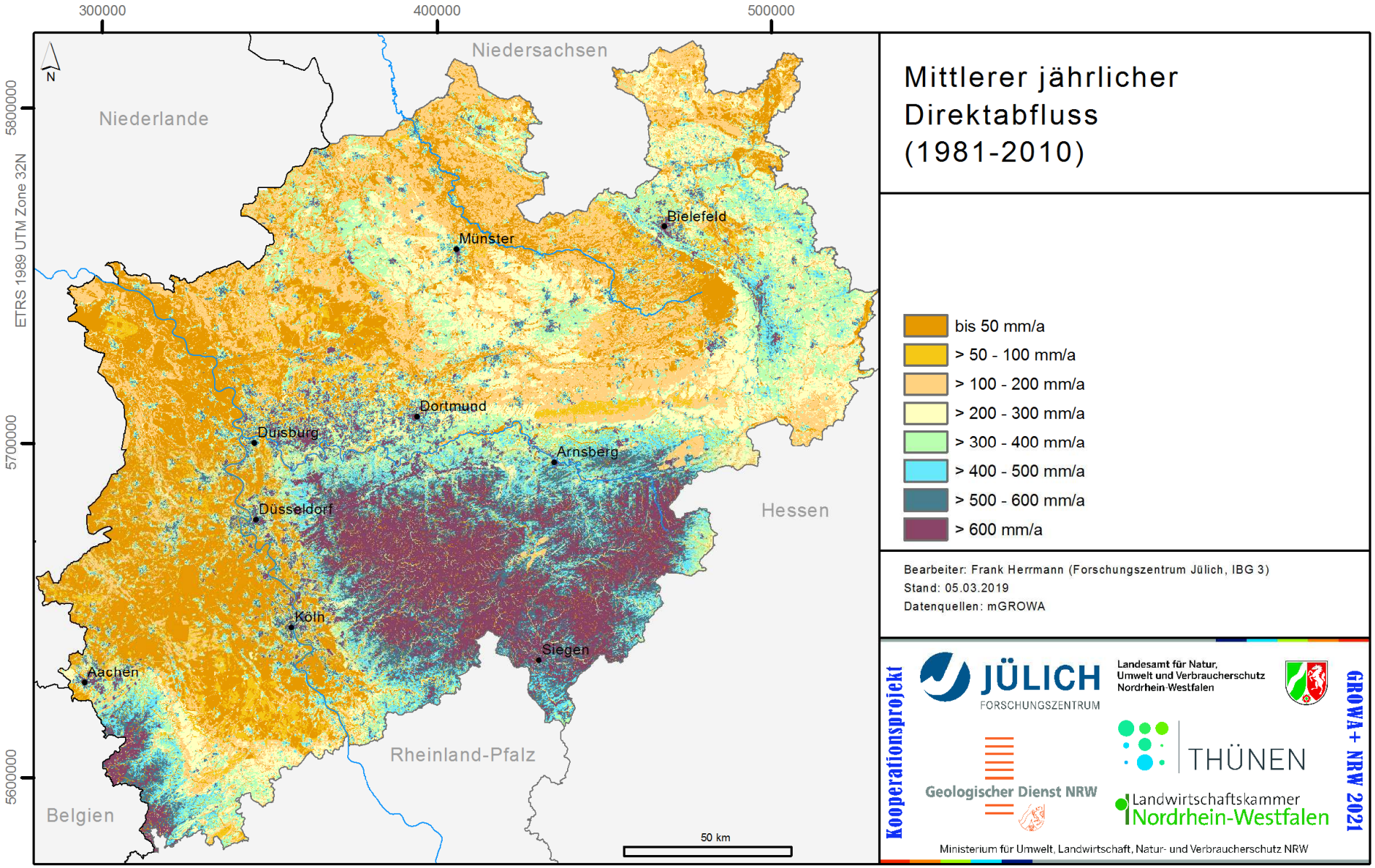
Mittlerer jährlicher Drainageabfluss (1981-2010) in mm/a



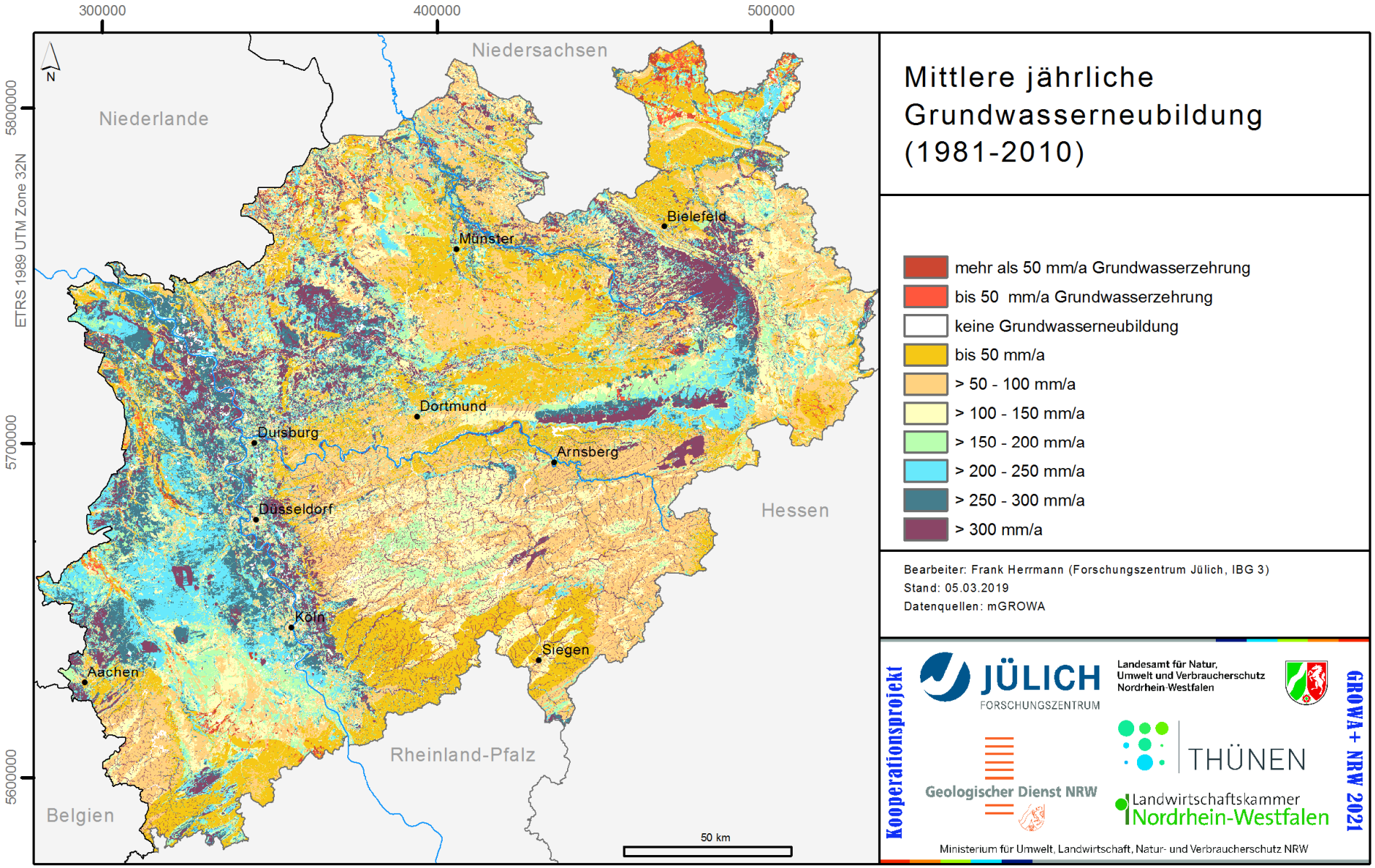
Mittlerer jährlicher natürlicher Zwischenabfluss (1981-2010) in mm/a



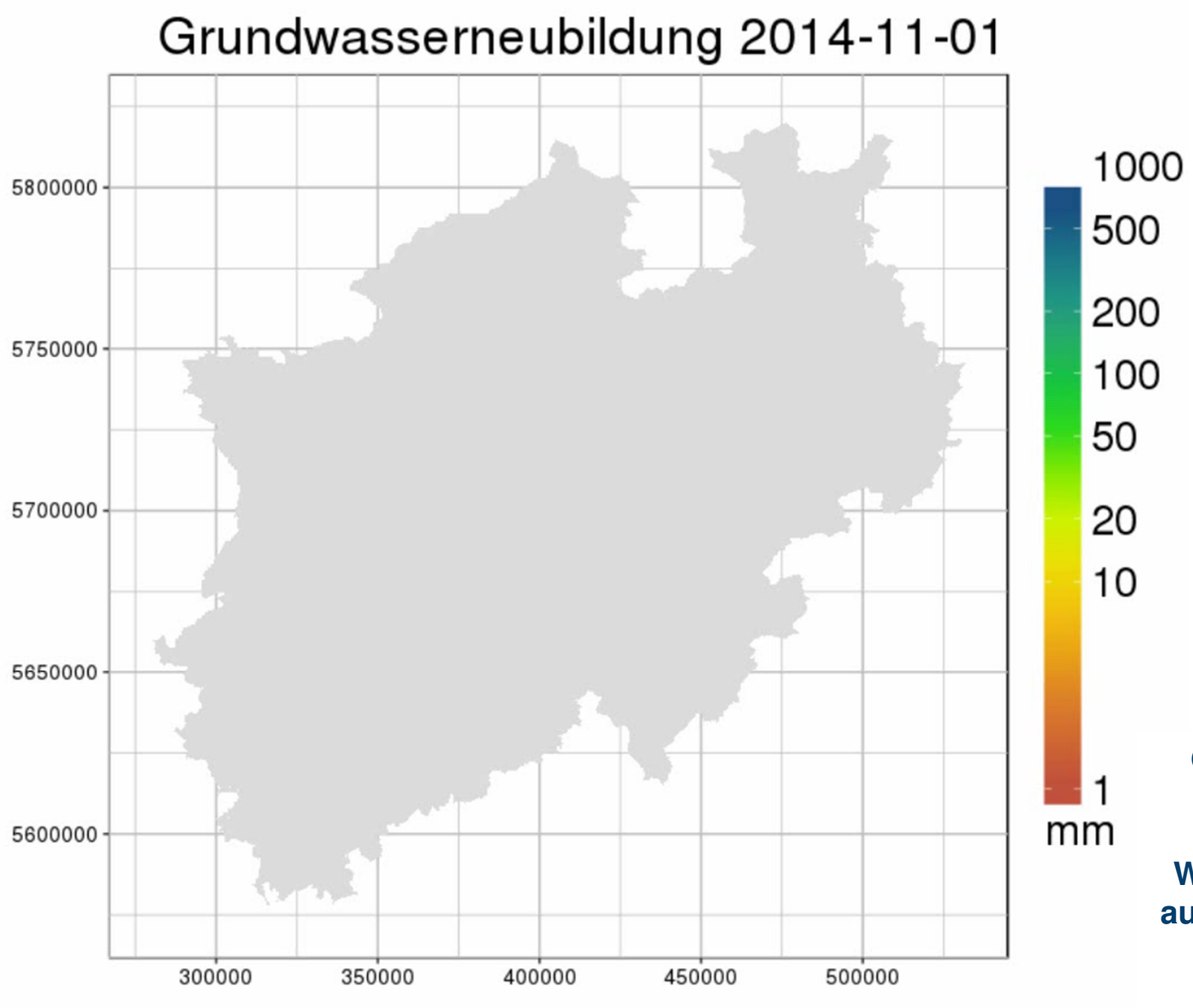
Mittlerer jährlicher Direktabfluss (1981-2010) in mm/a



Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (1981-2010) in mm/a

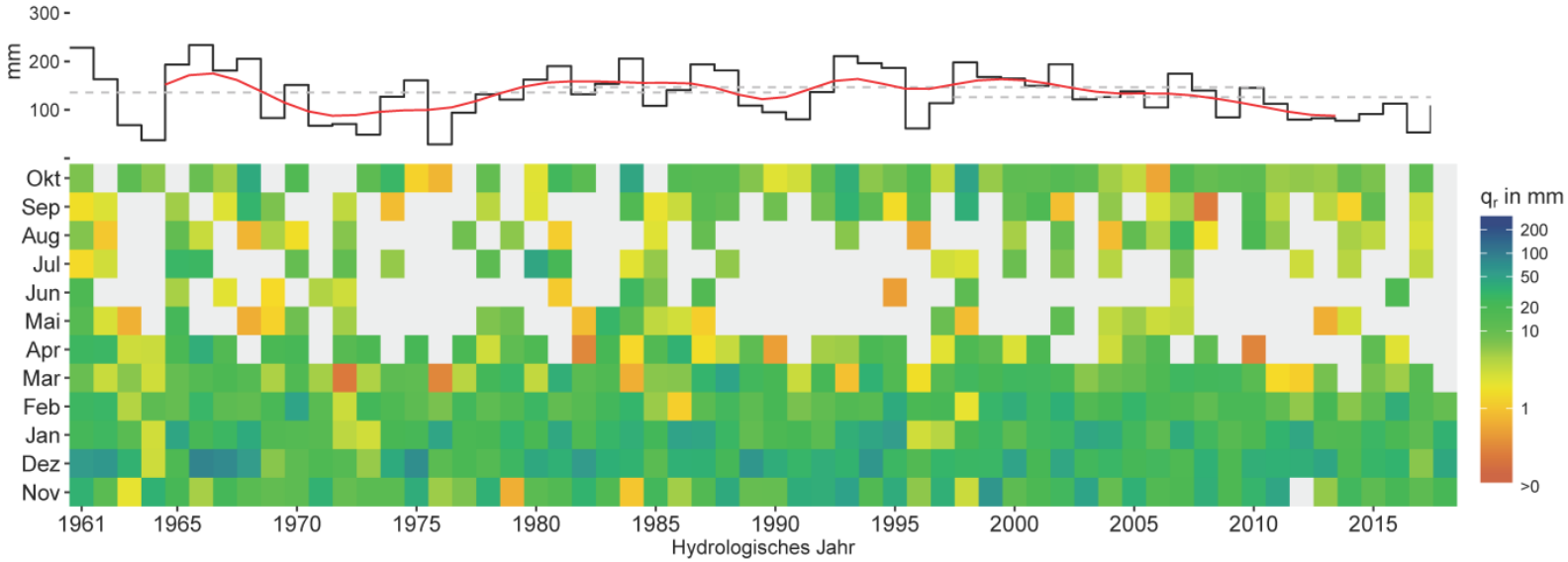


mGROWA – Grundwasserneubildung



Gezeigt werden hier die kumulierten Werte im Verlauf des Wasserwirtschaftsjahres auf allen nicht drainierten grundwasserfernen Standorten

Variabilität der Grundwasserneubildung in NRW seit 1961 simuliert mit mGROWA



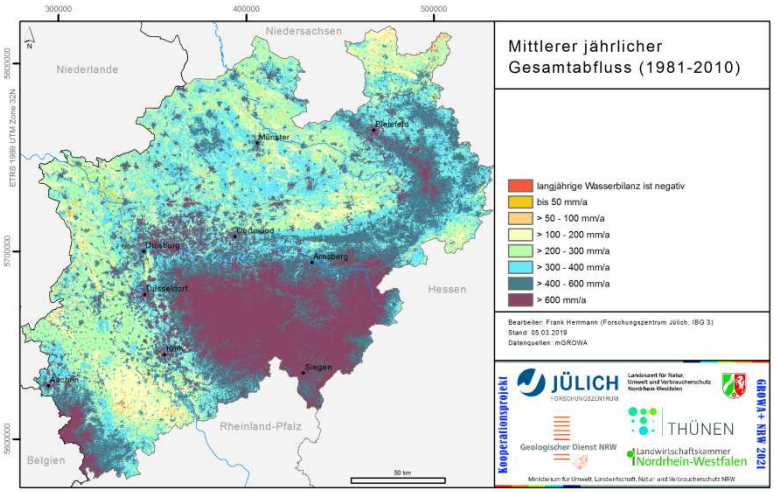
	Mittelwert in mm/a		Änderung in mm/a	Alpha		
Parameter	**1998-2007**	**2008-2017**	**2008-2017 vs. 1998-2007**	**U-Test**	**Mann-Kendall-Test (1998-2007)**	**Mann-Kendall-Test (2008-2017)**
Grundwasser-neubildung	154	98	-56	0.998	0.89	0.85

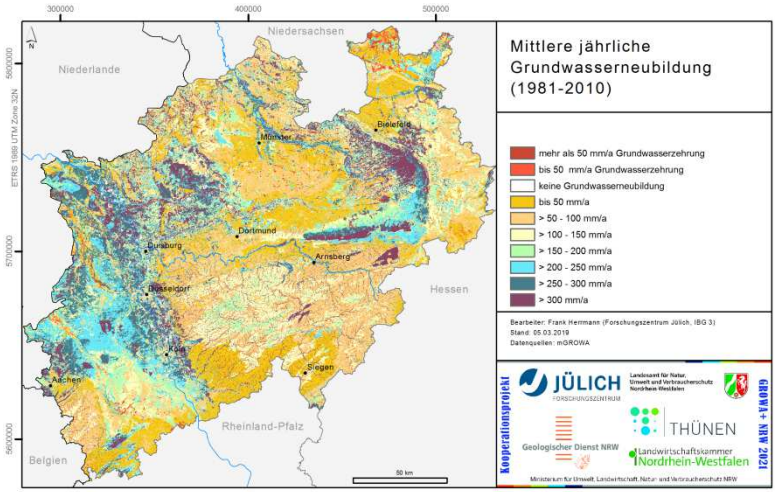
<u>U-Test</u> prüft, ob zwischen den Perioden 2008-2017 gegenüber 1998-2007 ein signikanter Trend vorliegt

<u>Mann-Kendall-Test</u> prüft, ob innerhalb der jeweiligen Perioden 1998-2007 und 2008-2017 ein signifikanter Trend vorliegt

Alpha > 0,85 → signifikant
Alpha < 0,85 → nicht signifikant

Evaluierung des mittleren jährlichen Gesamtabflusses und der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung der Periode 1981-2010





Wie gut passen die aus den Abflusszeitreihen für die Gewässerpegeln in NRW berechneten MQ und MoMNQ-Werte mit den für diese Einzugsgebiete (EZG) von mGROWA berechneten mittlere Gesamtabfluss- und Grundwasserneubildungswerten zusammen?

Datenbasis für die Evaluierung der mGROWA-Ergebnisse

- Datenbank mit Abflusszeitreihen für 233 Pegel in NRW und dazugehörige Einzugsgebietsgrenzen (EZG).
- Insgesamt liegen Abflusszeitreihen für die Zeitspanne 01.11.1979 bis 31.01.2014 vor.
- Die Abflusszeitreihen einzelner Pegel sind jedoch teilweise deutlich kürzer und weisen auch Lücken auf, d.h. sie decken die Evaluierungsperiode 1981-2010 nicht ausreichend ab.
- **Vielfältige Einleitungen, wasserwirtschaftliche Maßnahmen und wasserbauliche Einrichtungen beeinflussen das natürlichen Abflussgeschehen und die Abflussstatistik.**

➢ EZG-bezogene Gegenüberstellung des simulierten mittleren Gesamtabflusses und dem MQ aus Abflusszeitreihen.

➢ Gegenüberstellung der simulierten mittleren jährlichen Grundwasserneubildung und dem aus Abflusszeitreihen für die EZG gewonnenen mittleren jährlichen Basisabfluss:

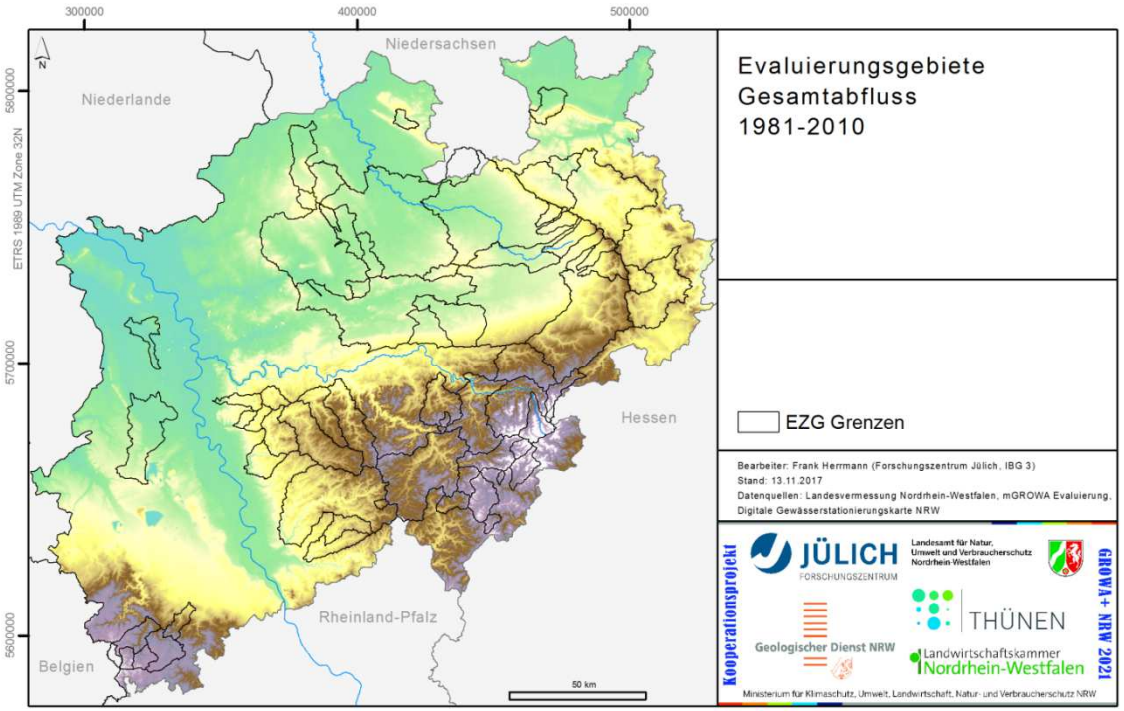
  – Im Lockergesteinsbereich mit Ergebnissen der Methode von Wundt (1958), d.h. Mittelwert der MoNQ-Wert.

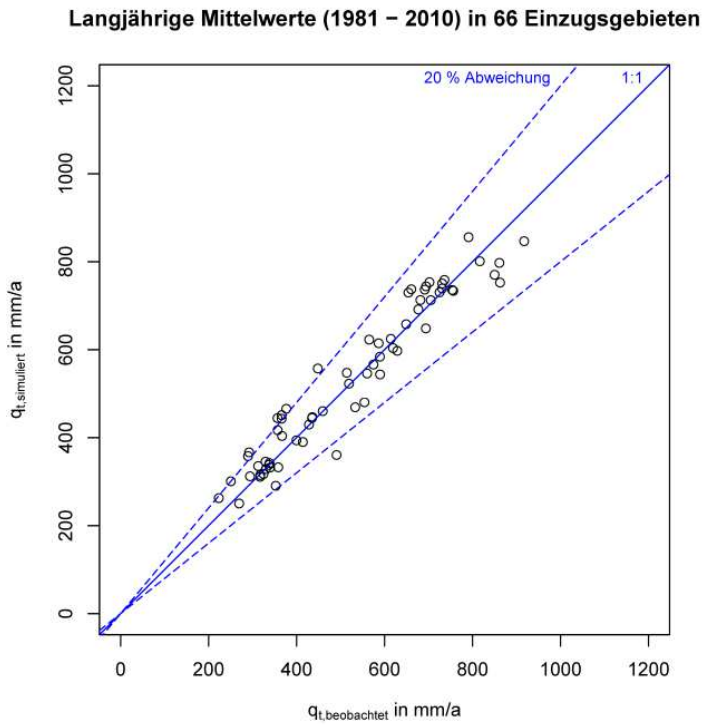
  – Im Festgesteinsbereich mit Ergebnissen der Methode von Demuth (1993), wenn diese anwendbar ist.

Für die Evaluierung des Gesamtabflusses verwendete EZG

- Insgesamt wurden 66 EZG für die Evaluierung des Gesamtabflusses anhand eines Kriterienkataloges selektiert.
- In der Evaluierung unberücksichtigt blieben außerdem EZG, für die eine Eignung anhand der Datenlage nicht abschließend geklärt werden konnte, jedoch große Differenzen zwischen simuliertem Gesamtabfluss und berechnetem MQ bestanden.

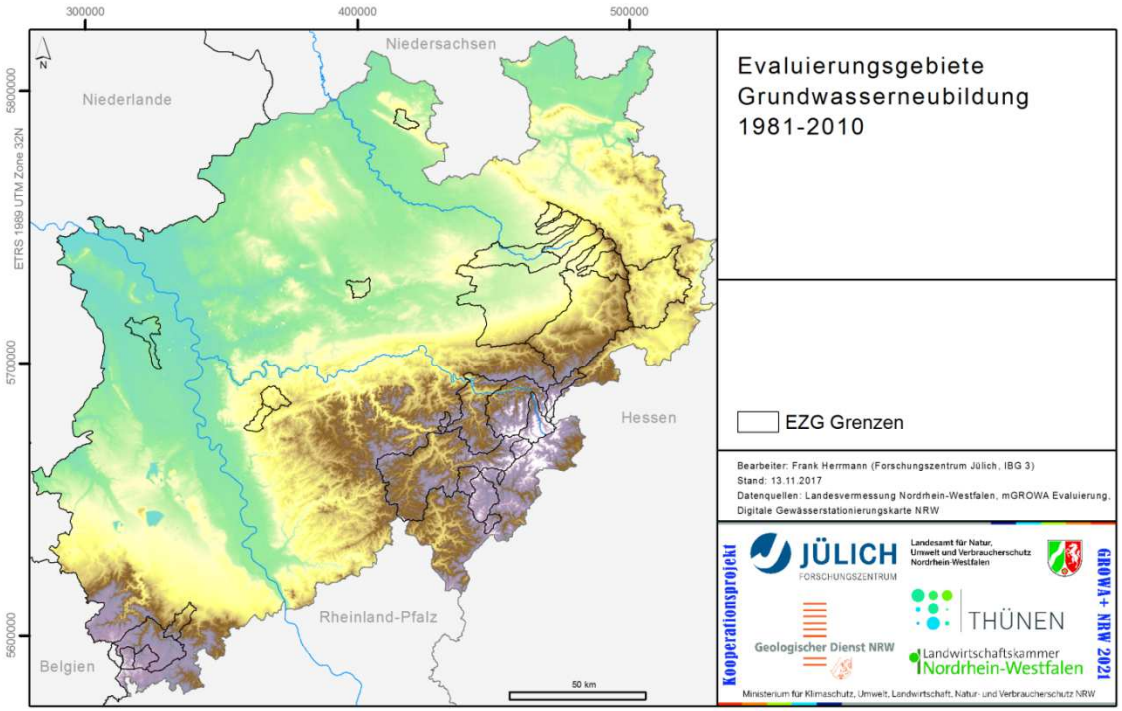
Sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachtetem und simuliertem Gesamtabfluss

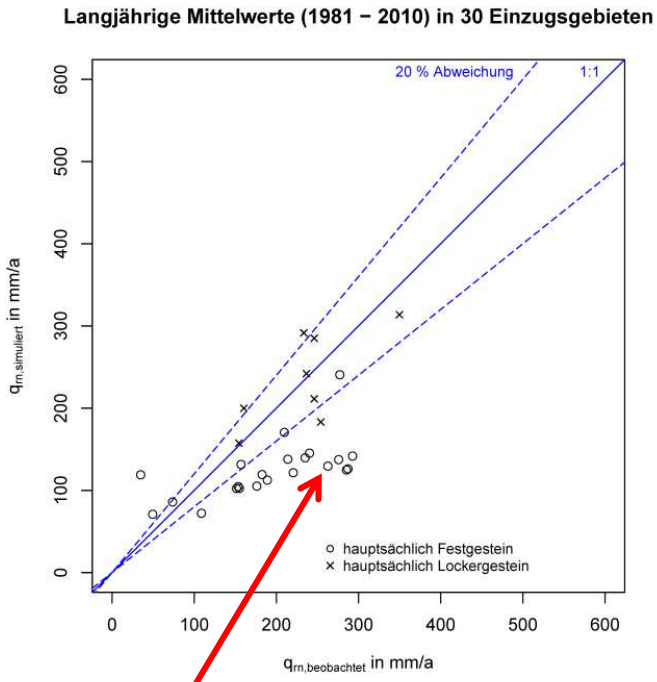




Evaluierung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (1981-2010)

- Eine Evaluierung ist nur für 30 Einzugsgebiete möglich (Abwasseranteil < 30 %).
- Aufgrund anthropogener Einflüsse auf den Niedrigwasserabfluss, d.h. Mindestabfluss aus Talsperren, Einleitung von Abwasser, etc. gibt es in mehreren Evaluierungsgebieten eine Unterschätzung der Grundwasserneubildung durch das Modell → **Die BFI-Werte im Modell sollen jedoch die aus dem GWL nachhaltig gewinnbaren Grundwassermengen reflektieren.**





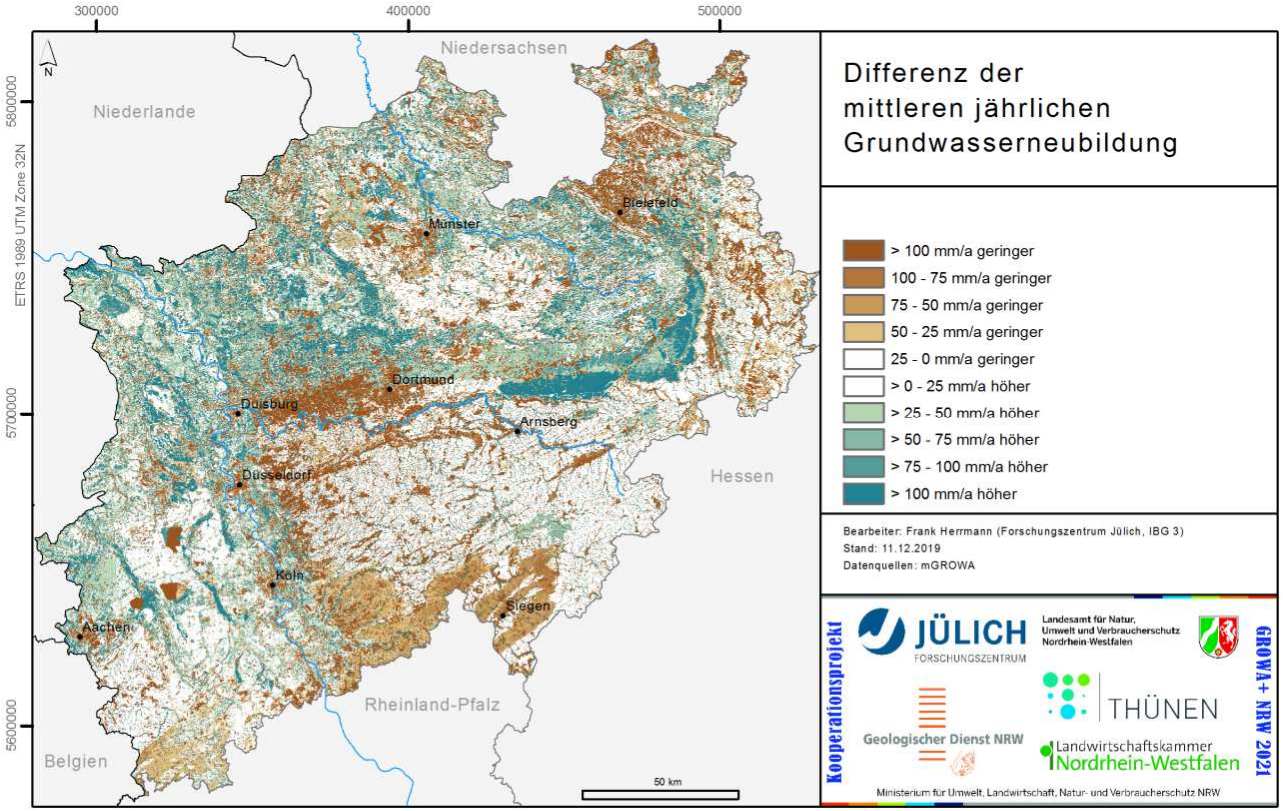
Einfluss von Talsperren auf den Niedrigwasserabfluss

Differenzen der Grundwasser-neubildungskarten 2013 vs. 2018

Berechnung:

mGROWA-2018 (1981-2010) MINUS

mGROWA-2013 (1971-2000)



Ursachen:

- Unterschiedliche hydrologische Perioden und unterschiedliche Klimadatenbasis.
- Alle Datengrundlagen wurden aktualisiert und verfeinert.
- Berechnungsmethodik hat sich für mehrere Standorttypen verändert.
- Grundwasserflurabstand ist nun als Jahresgang abgebildet und dadurch wesentlich verfeinert.
- Versiegelungsgrade sind nun als deutlich feinere Rasterdaten implementiert.
- …

Im landesweiten Mittel 13 mm/a geringere Grundwasserneubildung

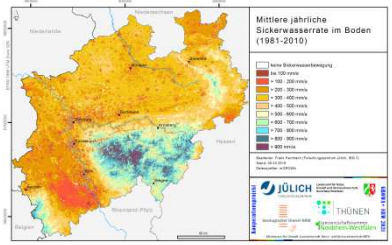
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Das **mGROWA-NRW-Modell** wurde im Rahmen des Kooperationsprojekts GROWA+ NRW 2021 in den letzten 3 Jahren methodisch weiterentwickelt und es wurden verfügbare aktualisierte Datengrundlagen eingepflegt.
- Zeitlich und räumlich hochaufgelöste Wasserhaushaltsgrößen (Grundwasserneubildung, Sickerwasserrate, etc.) liegen nun vor für:
  - Den gesamten Simulationszeitraum 01.11.1960 bis 28.02.2018
  - Aggregiert für wasserwirtschaftliche Planungszwecke als langjährige Mittelwerte der Periode 1981-2000
- Die Evaluierung der Modellergebnisse anhand beobachteter Abflusszeitreihen (insg. 66 EZG) hat ergeben, dass das **mGROWA-NRW-Modell** keine relevante Tendenz zum Über- oder Unterschätzen des Gesamtabflusses aufweist.
- Ein Vergleich der simulierten Grundwasserneubildung mit dem langjährigen Basisabfluss aus beobachteten Abflusszeitreihen (Wundt & Demuth) ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, weil der Niedrigwasserabfluss fast im gesamten Land NRW anthropogen beeinflusst ist.

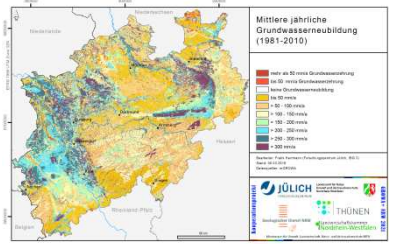
Nutzung der mGROWA-Ergebnisse

- Die mGROWA-Ergebnisse dienen im Kooperationsprojekt ***GROWA+ NRW 2021*** als Datengrundlage/Modellinput für:
  - die Modellierung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone und im Grundwasser,
  - die landesweite Modellierung der N- und P-Einträge als langjährige Mittelwerte:
    - *ins Grundwasser mit der Grundwasserneubildung*
    - *ins Oberflächengewässer über Zwischenabfluss*
    - *ins Oberflächengewässer über Dränabfluss*
    - *ins Oberflächengewässer über Grundwasserabfluss*
    - *ins Oberflächengewässer über Abschwemmung*
    - *ins Oberflächengewässer über Erosion*
- Im Rahmen wasserwirtschaftlicher Untersuchungen können mit mGROWA berechneten Wasserhaushaltsgrößen für beliebige Flächen im Land NRW sowie unterschiedliche Zeitabschnitte (1961 bis Gegenwart) weiter ausgewertet werden.
- mGROWA wird im Rahmen einer Klima-Impact-Studie zur Abschätzung einer zukünftig veränderten räumlichen und zeitlichen Verteilung der Grundwasserneubildung eingesetzt (ReKliEs-De+mGROWA Ensemble)
- …

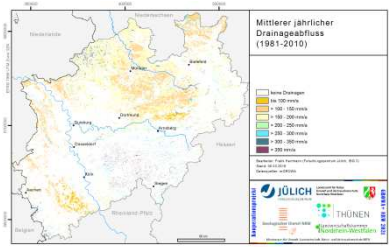
Sickerwasserrate



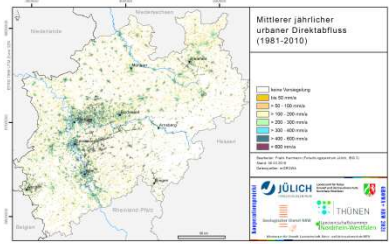
Grundwasserneubildung



Drainageabfluss



Urbaner Direktabfluss



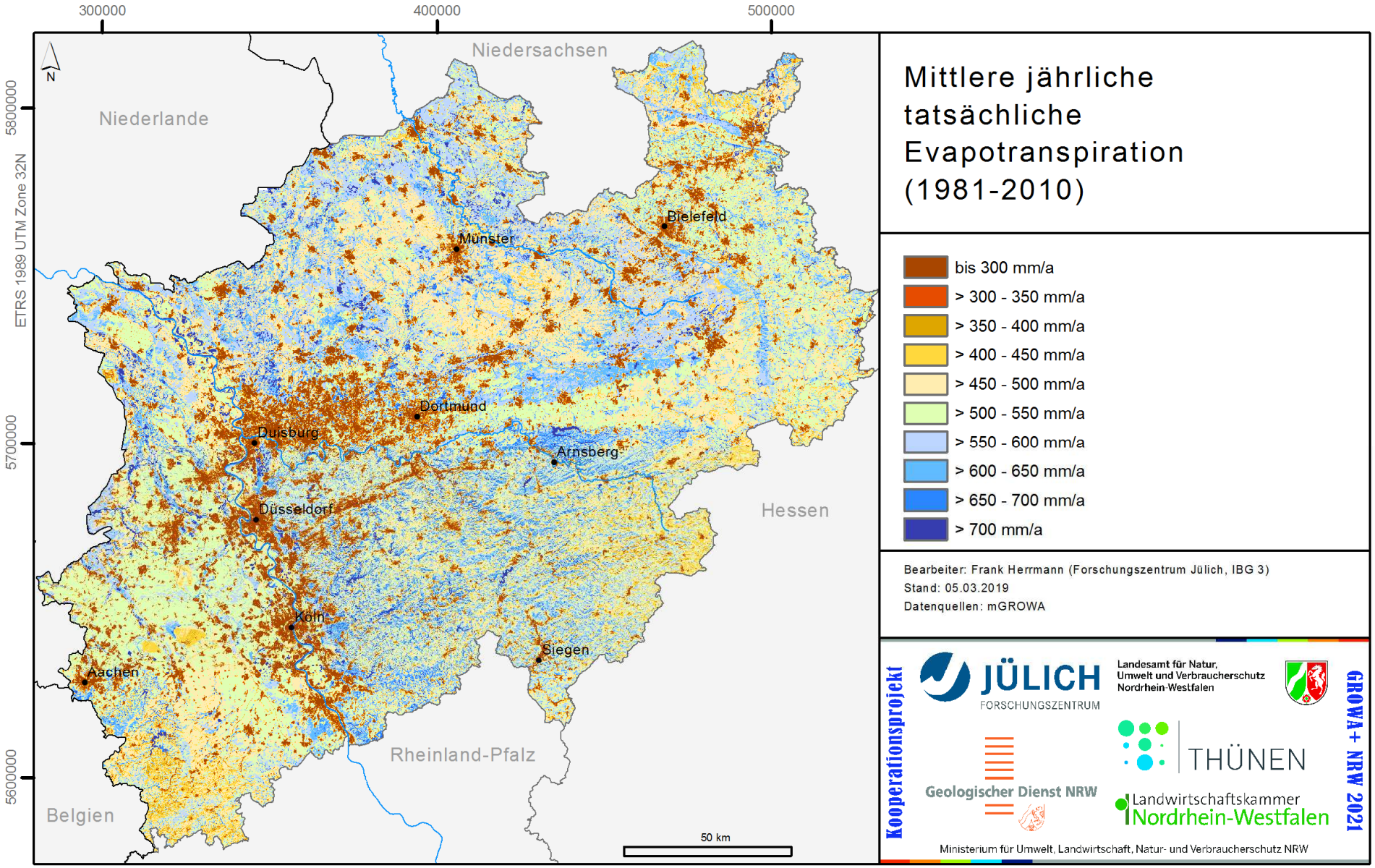
JÜLICH
Forschungszentrum

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

mGROWA – Quellen für Parameter

- **Parameter mit Bezug zu Bodenwasserspeicher und Bodenfeuchtedynamik stammen, wenn nicht direkt in der BK 50 verfügbar, aus:**
  - Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G., Zacharias, S., 2009. ***Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis***. In: Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M. (Eds.). Bodenökologie und Bodengenese. Technische Universität Berlin - Fachgebiet Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz - Institut für Ökologie.
  - Müller, U., Waldeck, A., 2011***. Auswertungsmethoden im Bodenschutz***. GeoBerichte, 19. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen.
  - Schwärzel, K., Šimůnek, J., Stoffregen, H., Wessolek, G., van Genuchten, M.T., 2006. ***Estimation of the Unsaturated Hydraulic Conductivity of Peat Soils.*** Vadose Zone Journal, 5(2): 628. DOI: 10.2136/vzj2005.0061
- **Parameter mit Bezug zur Vegetations- und Landnutzungs-spezifischen Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration stammen aus:**
  - ATV-DVWK, 2002. ***Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden***. Merkblatt ATV-DVWK-M, 504. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

Kriterien zur Bewertung der Eignung von Einzugsgebieten für die Evaluierung der mGROWA-Ergebnisse

- Teile des EZG außerhalb der Modellgebietes
- Datenlücken und fehlende Jahre
- Oberirdische und unterirdische EZG-Grenzen potentiell oder offensichtlich nicht deckungsgleich → Möglicher Einfluss von Karst-GWL auf die EZG-Grenzen
- Potentieller Einfluss von Wassertransfers aus dem EZG auf den Gesamtabfluss
- Potentieller Einfluss von Talsperren auf den Niedrigwasserabfluss
- Potentieller Einfluss von Einleitungen auf den Niedrigwasserabfluss
- Potentieller Einfluss von Bergbau im EZG
- Abwasseranteile am MQ und MNQ
- Geringe Entfernung zu anderen Pegeln
- Geringe EZG-Größe und deshalb hohe Wahrscheinlichkeit für ungenaue Bestimmung der tatsächlichen EZG-Grenzen
- Einfluss von Kanälen und Umflutern
- Anteil urbaner Fläche im EZG

Mittlere jährliche tatsächliche Evapotranspiration (1981-2010) in mm/a