

# Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit im semiariden Zentralasien

TU München, 25. November 2021

Dr. Tobias Siegfried, hydrosolutions GmbH, Zürich



# Überblick

- Geographie
- Klimawandel & Auswirkungen



# Übersicht

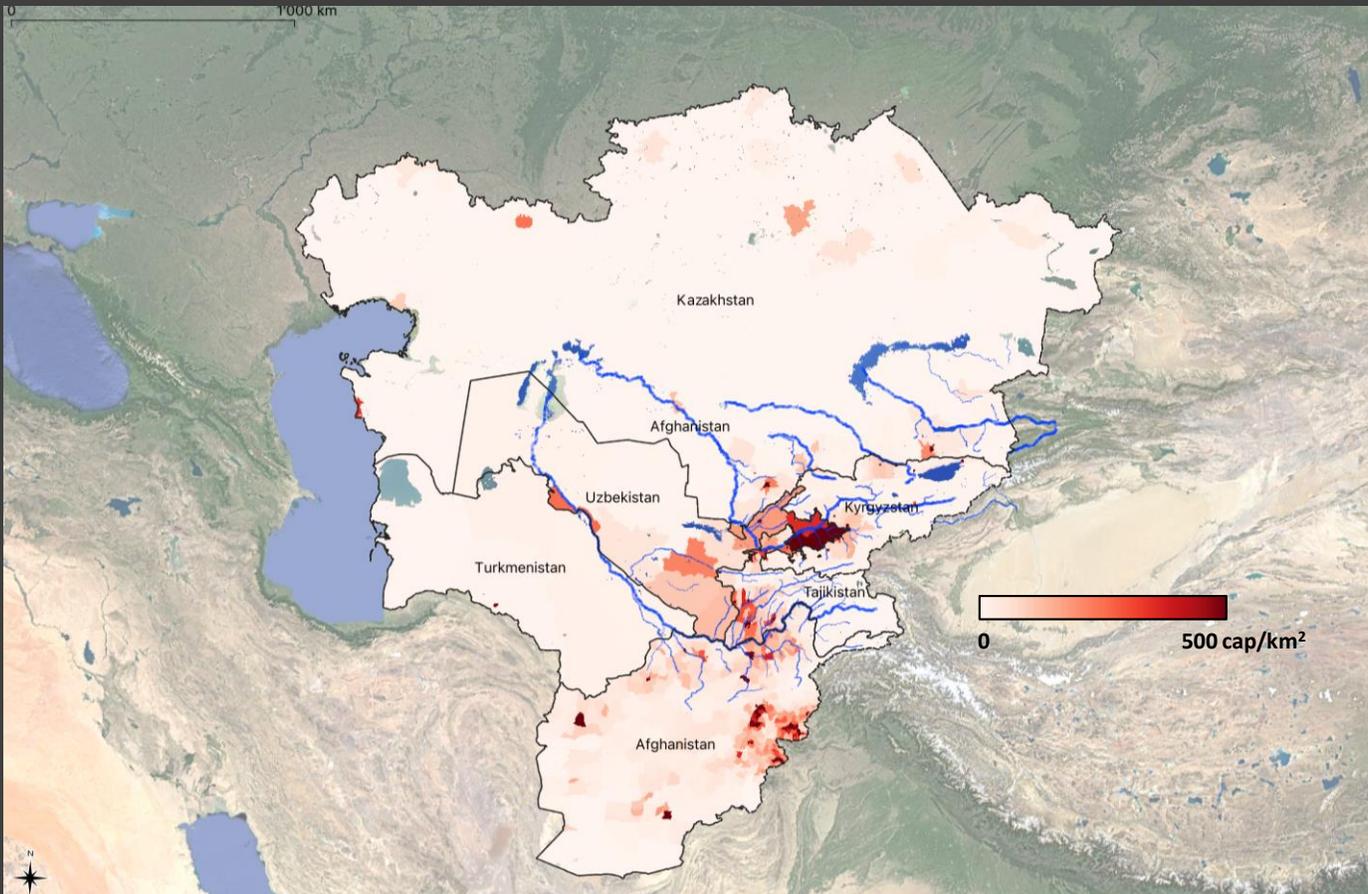


- Länder Zentralasiens beinhalten die ehemaligen soz. Sowjetrepubliken sowie das Islamische Emirat Afghanistan

Land	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Bevölkerung [Mio., 2018]	Bev. Dichte [Einw./km <sup>2</sup> ]
Kazakhstan	2'724'900	18.3	6.3
Kyrgyzstan	199'950	6.3	29.7
Tajikistan	142'550	9.1	60.4
Turkmenistan	488'100	5.9	11.1
Uzbekistan	448'978	33.9	69.1
Afghanistan	652'864	32.9	50.4
<b>Total</b>	<b>4'657'342</b>	<b>106.4</b>	<b>22.8</b>

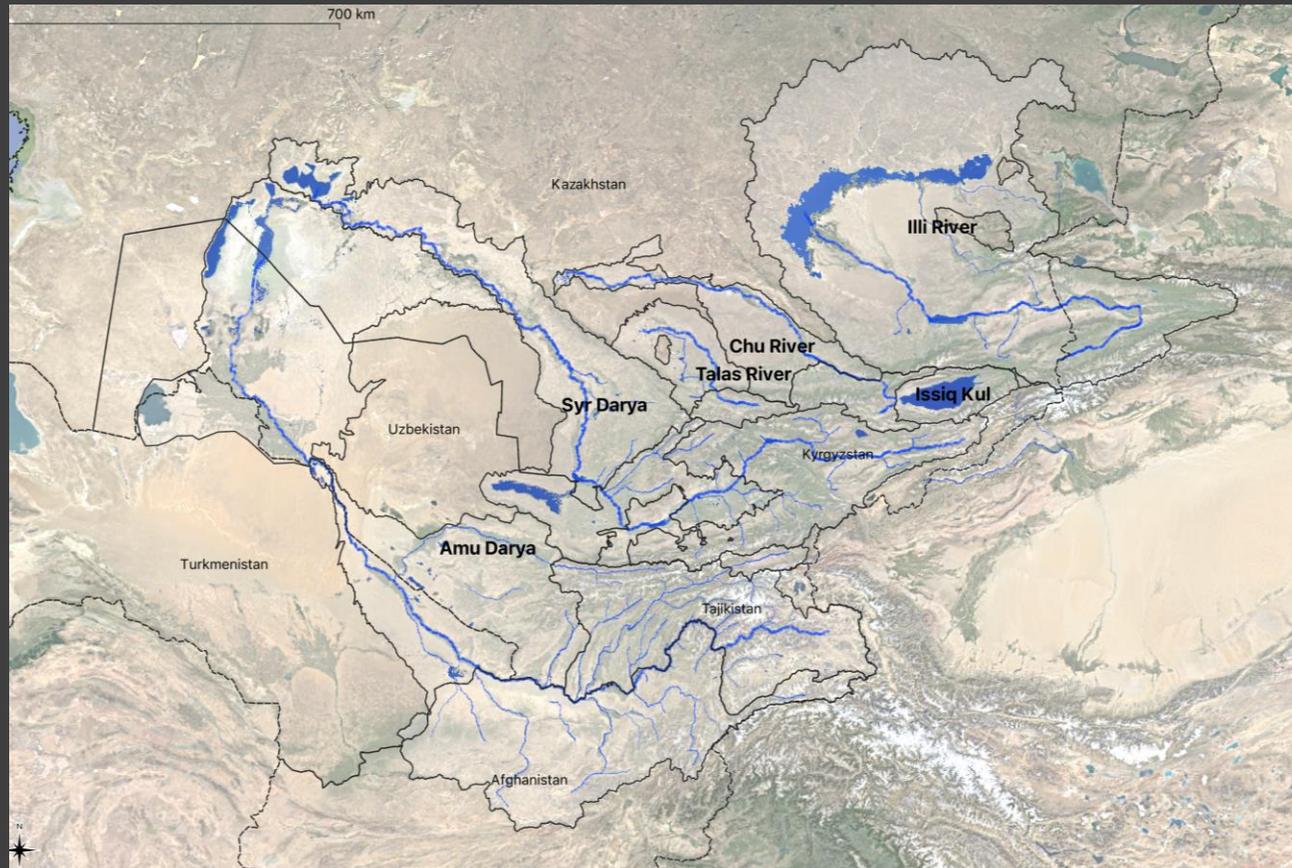
Quellen: Statistiken zusammengestellt aus verschiedenen Quellen: World Population Review, Weltbank und Wikipedia

# Übersicht



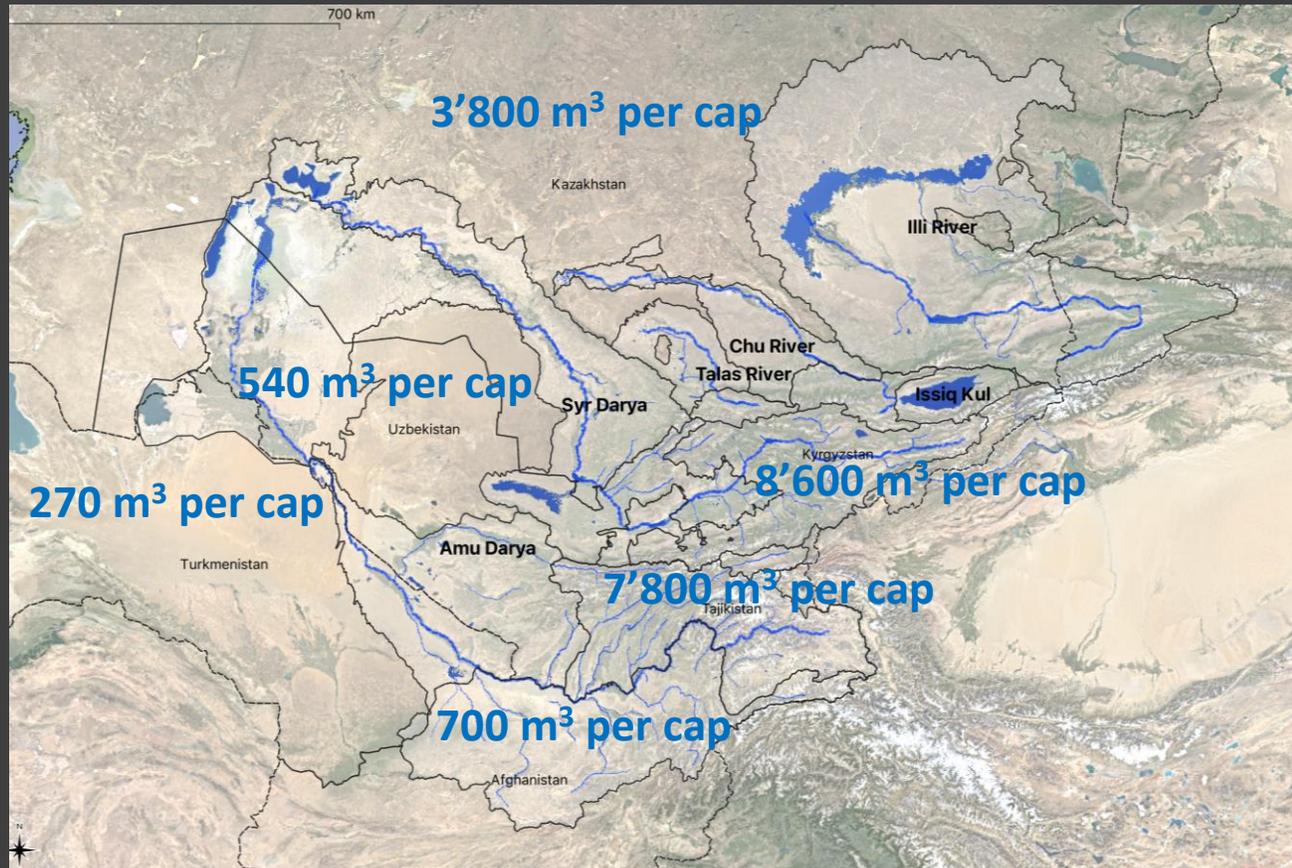
- Erwartetes Bevölkerungswachstum
  - 2050: + 50 %
  - 2100: + 75 %
- Überproportionales Wachstum in einzelnen Regionen, die bereits heute stark besiedelt sind (z. B. Fergana-Tal, Teile Tajikistans und Nordafghanistans)

# Einzugsgebiete im ariden Zentralasien



- Relevante grenzüber-schreitende Einzugsgebiete
  - Amu Darya: 74 km<sup>3</sup>/a
  - Syr Darya: 37 km<sup>3</sup>/a
  - Talas: 1.5 km<sup>3</sup>/a
  - Chu: 4.8 km<sup>3</sup>/a
  - Ili: 16 km<sup>3</sup>/a
- Durchschnittliche erneuerbare Wasserfügbarkeit pro Kopf
  - ~ 1'500 m<sup>3</sup> pro Jahr und Kopf

# Einzugsgebiete im ariden Zentralasien



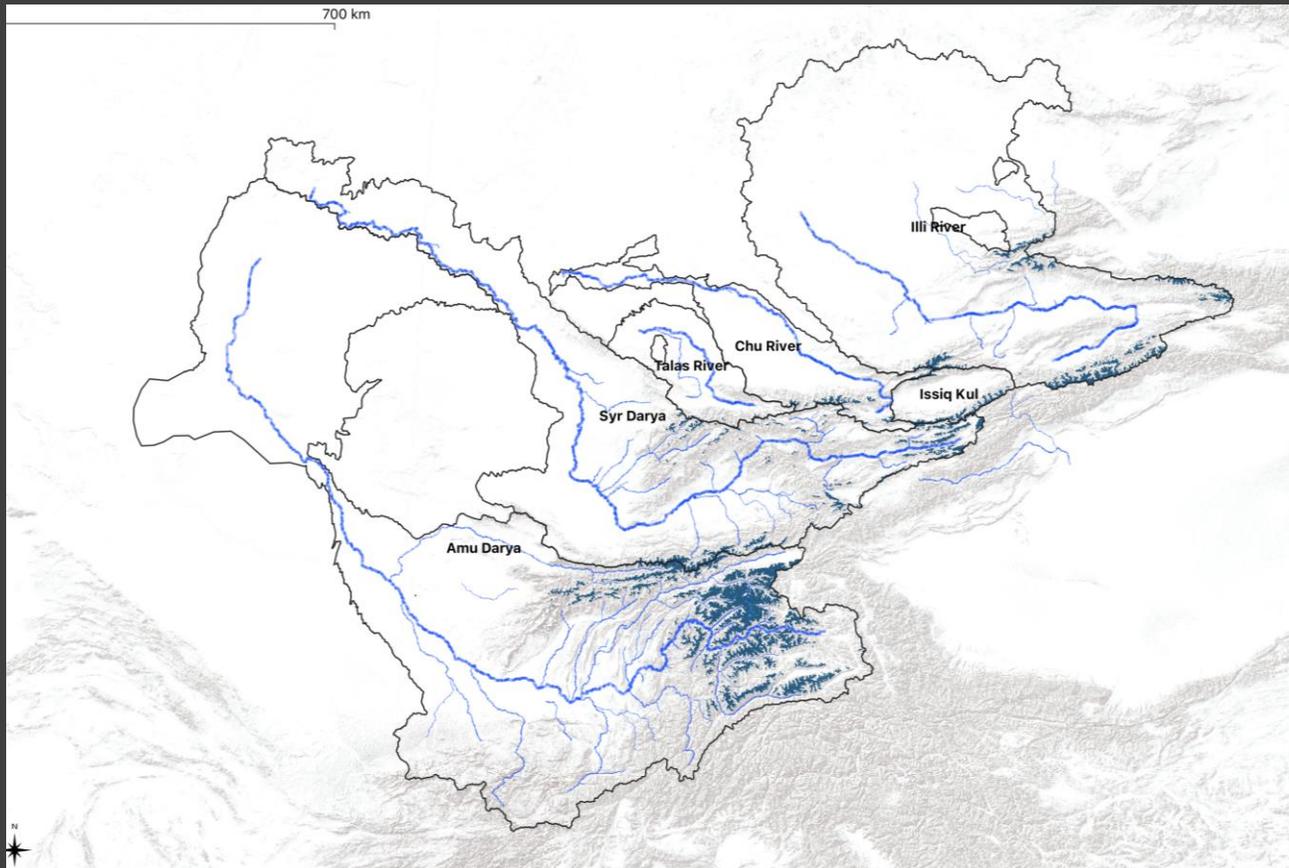
- Relevante grenzüberschreitende Einzugsgebiete
  - Amu Darya: 74 km³/a
  - Syr Darya: 37 km³/a
  - Talas: 1.5 km³/a
  - Chu: 4.8 km³/a
  - Ili: 16 km³/a
- Durchschnittliche erneuerbare Wasserfügbarkeit pro Kopf
  - ~ 1'500 m³ pro Jahr und Kopf

# Große topographische Kontraste



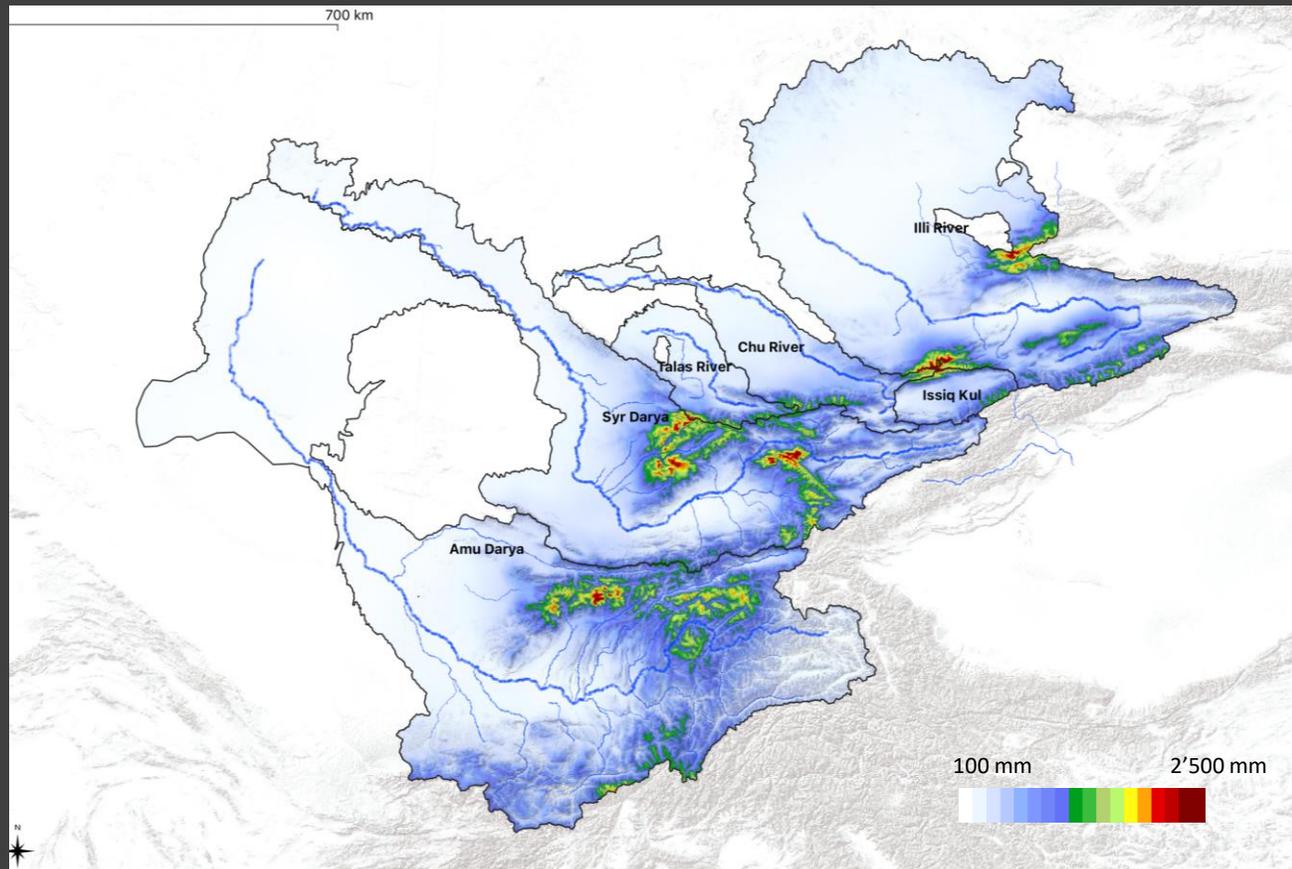
- Große topografische Unterschiede zwischen den Ebenen und den Bergregionen
- Die Flüsse entspringen in den grossen Bergketten
  - Hindukush
  - Pamirs
  - Gissar-Alay Range
  - Tien Shan

# Vergletscherung im Hochgebirge



- Schätzungsweise 600 km<sup>3</sup> Wasser als Landeis in der Bergregion gespeichert
- Gletscher spielen lokal eine wichtige Rolle zur Wasserversorgung in den trockenen Sommermonaten
- Beitrag zum Gesamtabfluss der großen Flüsse jedoch nur ~ 2 % – 4 %

# Klima



- Trockenes, kontinentales Klima mit heißen Sommern und kalten Wintern
- Niederschlag hauptsächlich in Hochgebirgsregionen
- Das Klima wird durch westliche Zirkulationsmuster und damit verbundene Feuchtigkeitsflüsse beeinflusst
- Im borealen Winter (November – März) fällt im Durchschnitt mehr als 50 % des Jahresniederschlags als Schnee, insbesondere in den Berg-regionen

Bild: Jährlicher Gesamtniederschlag

# Klima

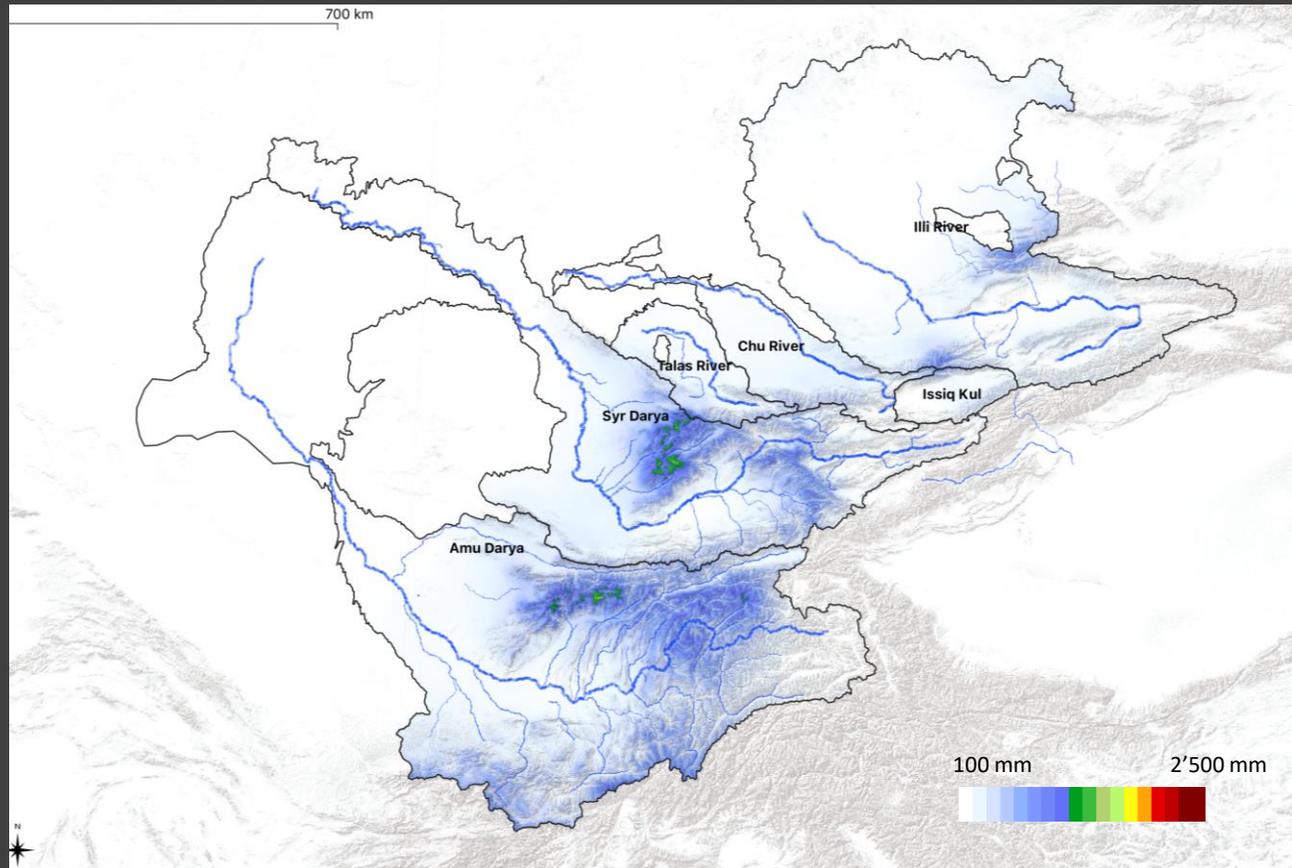


Bild: Gesamtniederschlag kalte Jahreszeit (Oktober – März)

- Trockenes, kontinentales Klima mit heißen Sommern und kalten Wintern
- Niederschlag hauptsächlich in Hochgebirgsregionen
- Das Klima wird durch westliche Zirkulationsmuster und damit verbundene Feuchtigkeitsflüsse beeinflusst
- Im borealen Winter (November – März) fällt im Durchschnitt mehr als 50 % des Jahresniederschlags als Schnee, insbesondere in den Berg-regionen

# Klima

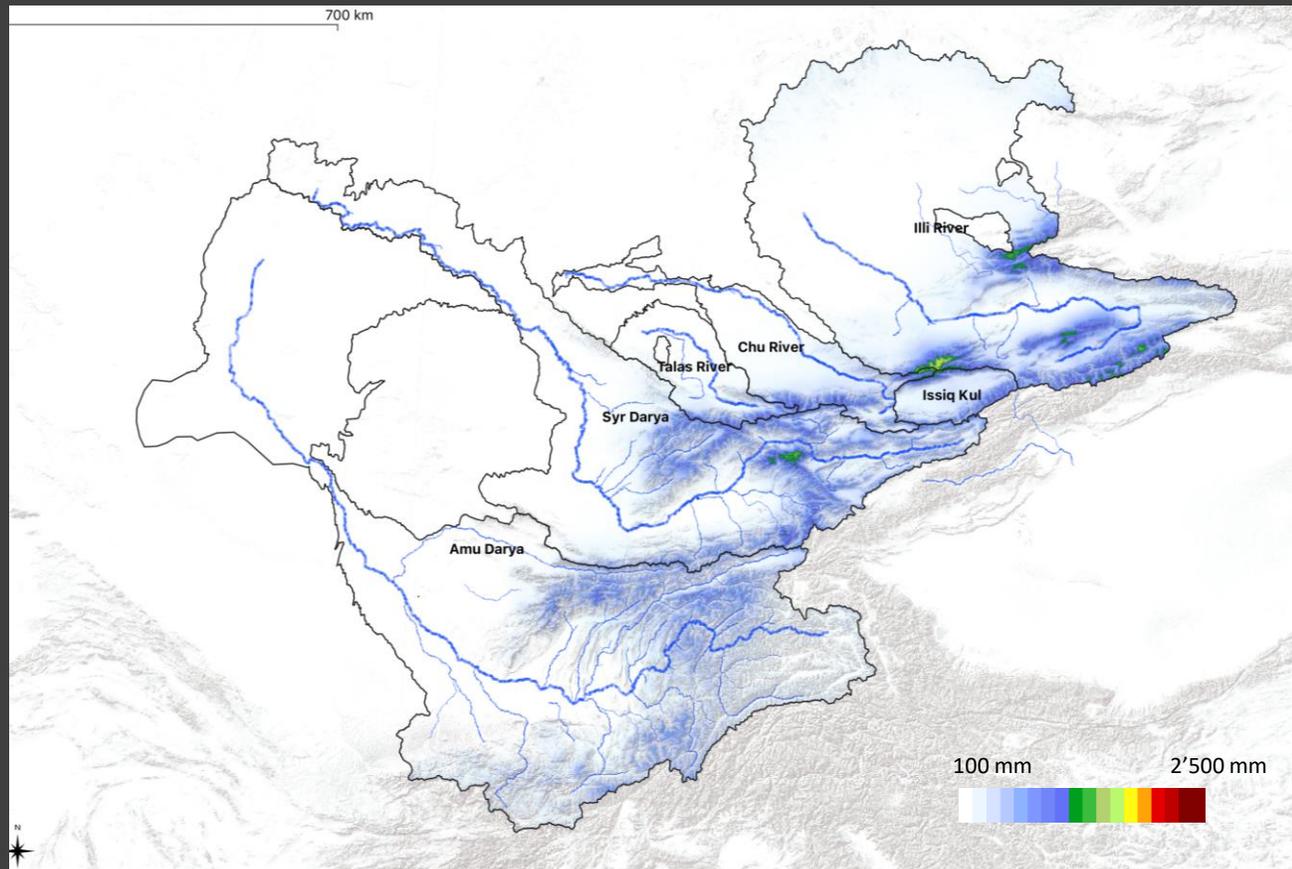
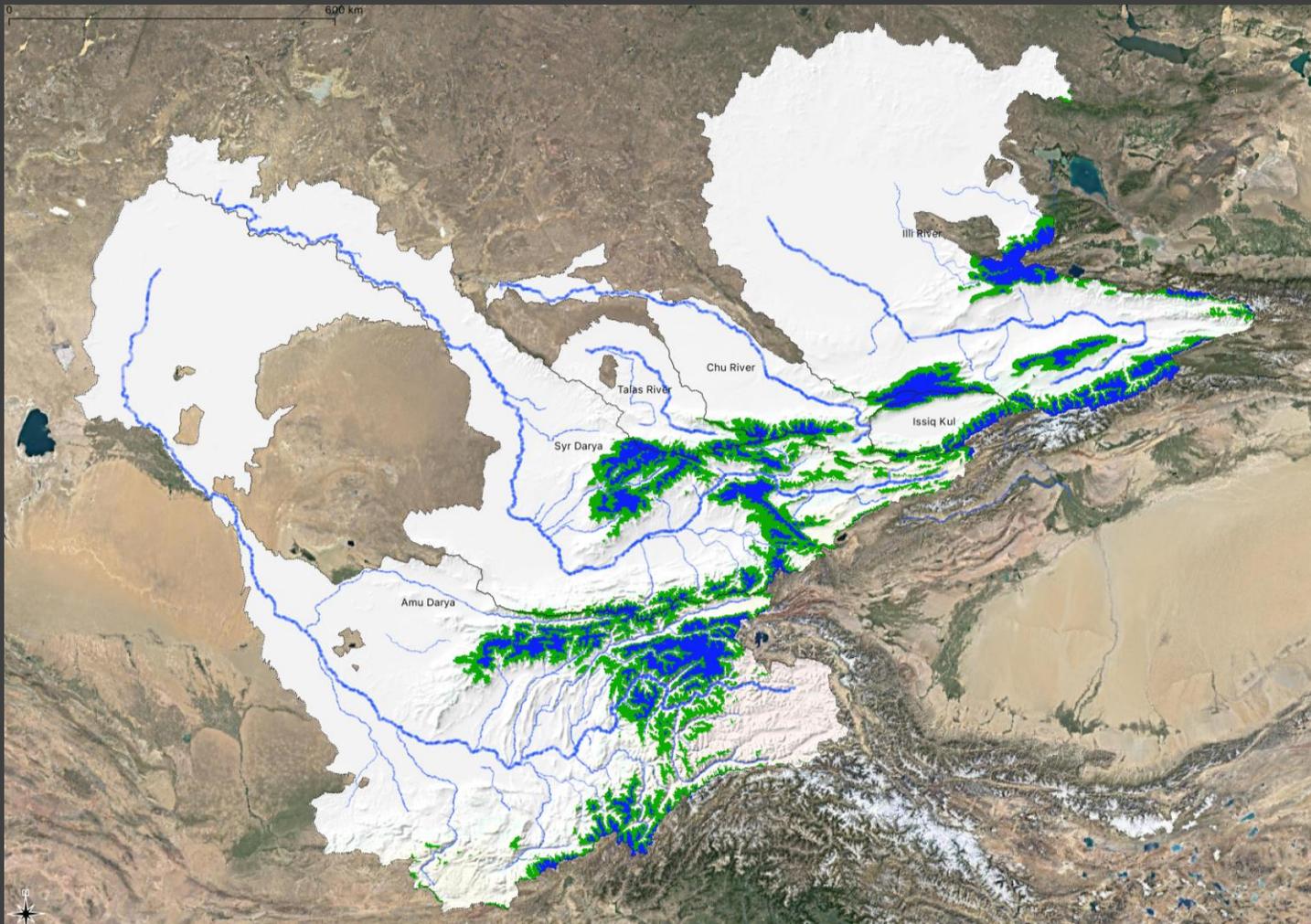


Bild: Gesamtniederschlag warme Jahreszeit (April – September)

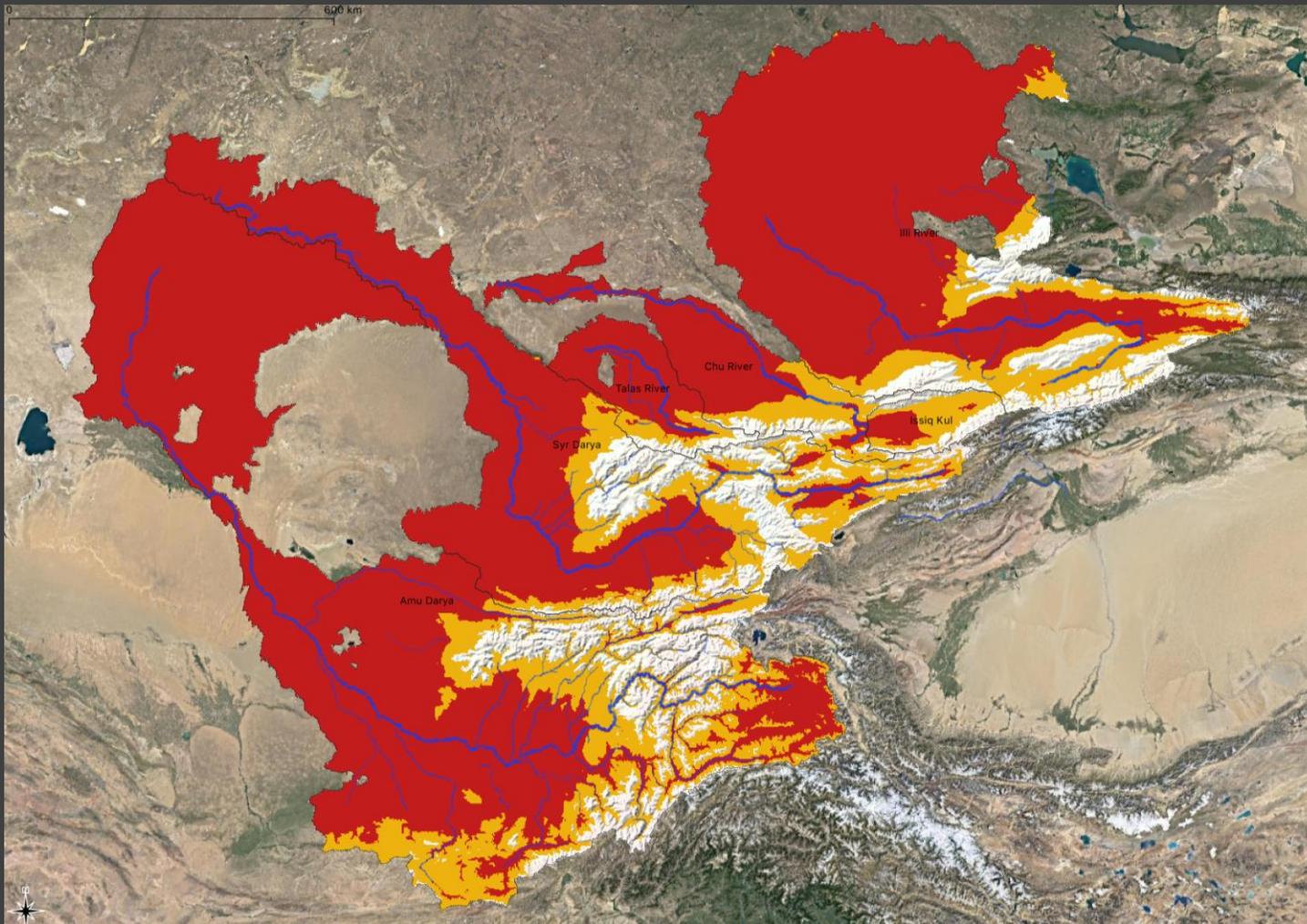
- Trockenes, kontinentales Klima mit heißen Sommern und kalten Wintern
- Niederschlag hauptsächlich in Hochgebirgsregionen
- Das Klima wird durch westliche Zirkulationsmuster und damit verbundene Feuchtigkeitsflüsse beeinflusst
- Im borealen Winter (November – März) fällt im Durchschnitt mehr als 50 % des Jahresniederschlags als Schnee, insbesondere in den Berg-regionen

# Hydroklimatologische Zonen



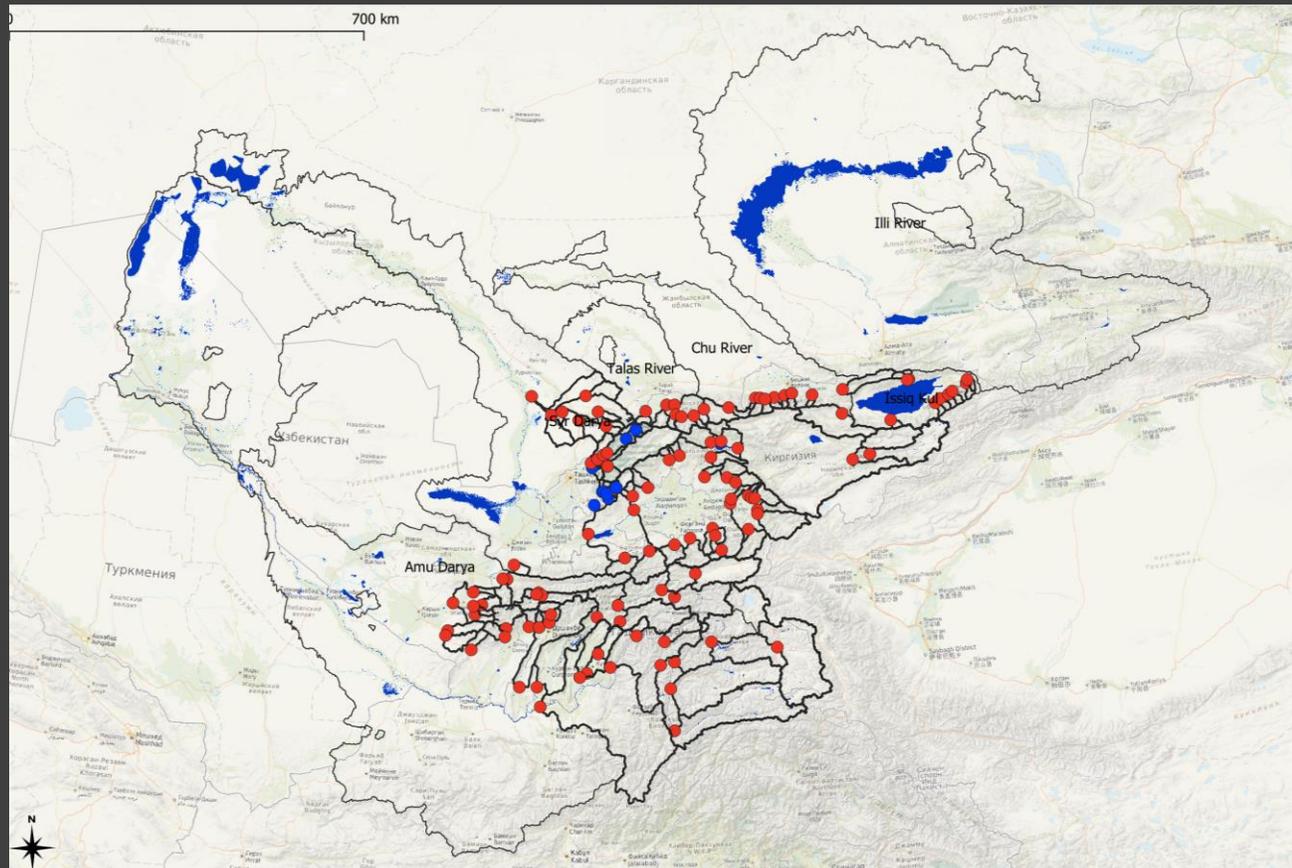
- Trockenheitsindex:  $\phi = \frac{E_{pot}}{P}$ 
  - $\phi < 0.76$ , i.e. feuchte Bedingungen
  - $\phi \geq 0.76$  &  $\phi \leq 1.3$ : äquidistante Bedingungen
- Diese Regionen definieren einfach gesagt die Zonen der Abflussbildung

# Hydroklimatologische Zonen



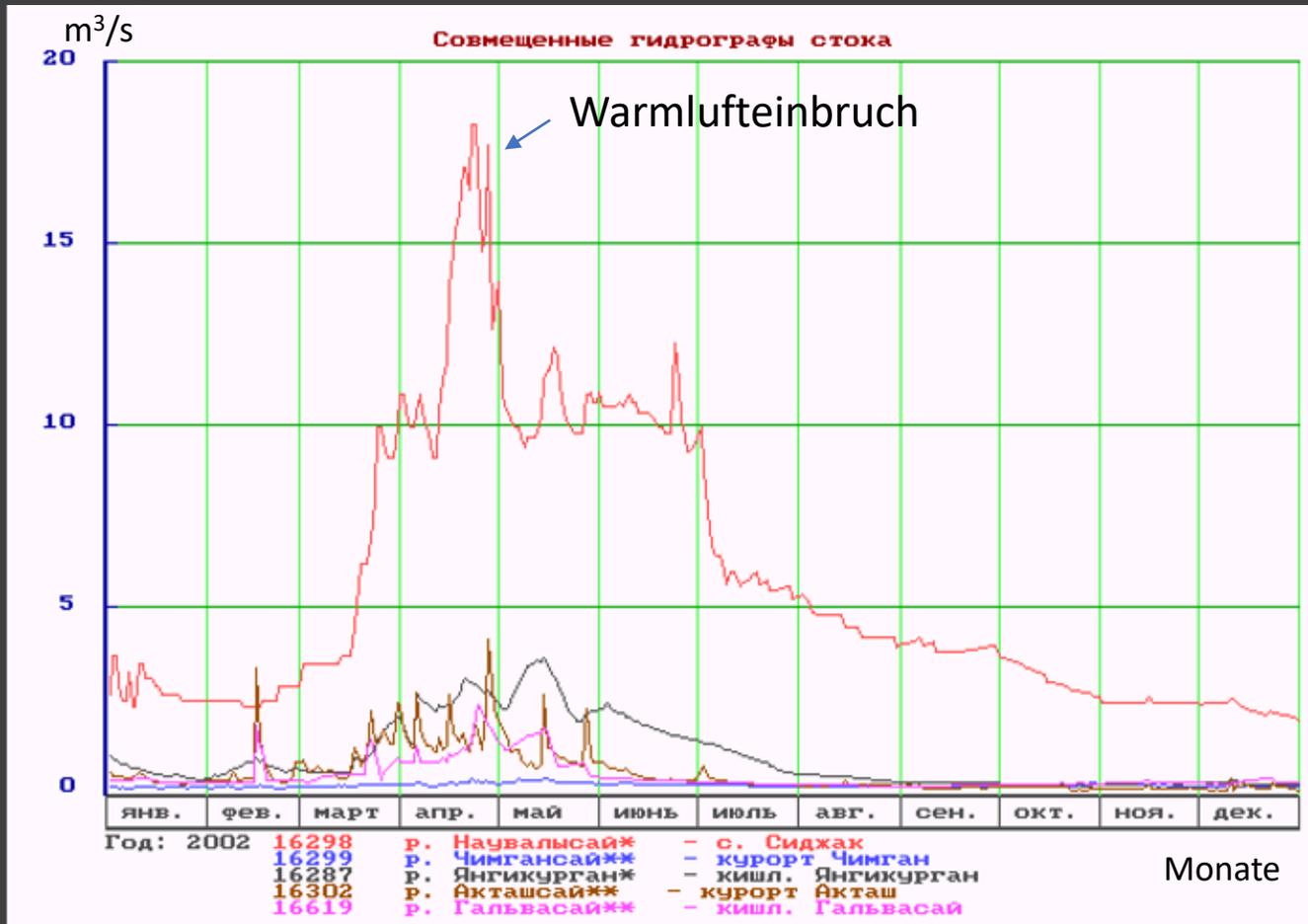
- Trockenheitsindex:  $\phi = \frac{E_{\text{pot}}}{P}$ 
  - ☐  $\phi > 1.3$ : trockene Bedingungen
  - ☐  $\phi > 3$ : hyperaride Zustände
  - Lokale atmosphärische Wasser-versorgung nicht ausreichend um Bedarf zu decken
- Unterscheidung zwischen
  - Zonen der Abflussbildung
  - Zonen der komplexen Wasserverteilung und -nutzung

# Abflussmessungen



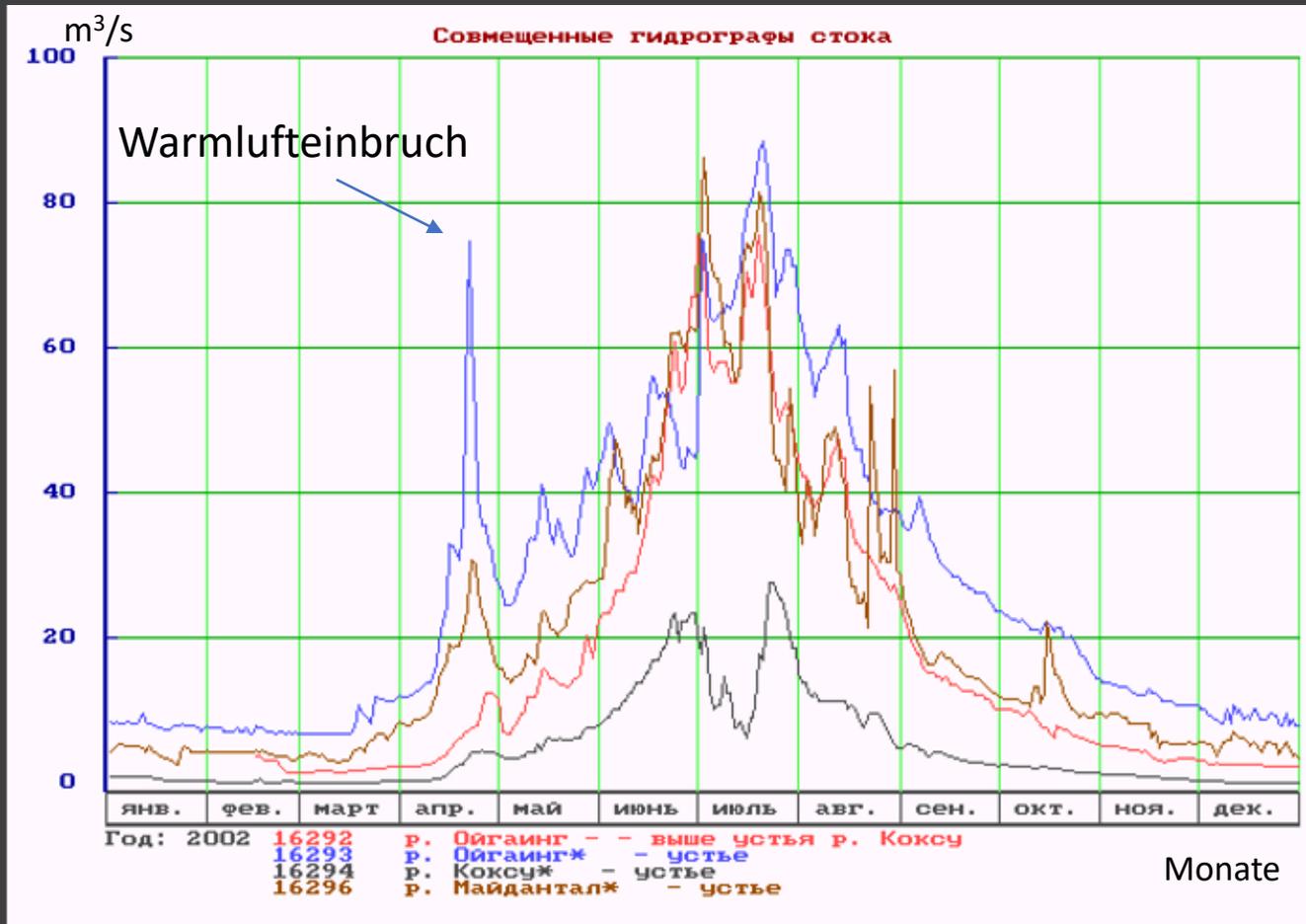
- Abflüsse werden von den zentralasiatischen hydrometeorologischen Agenturen gemessen
- Hydrologische Beobachtungs-netze wurden seit Mitte der 1980er Jahre um 40 % -50 % reduziert in allen Ländern der Region

# Abflussregime



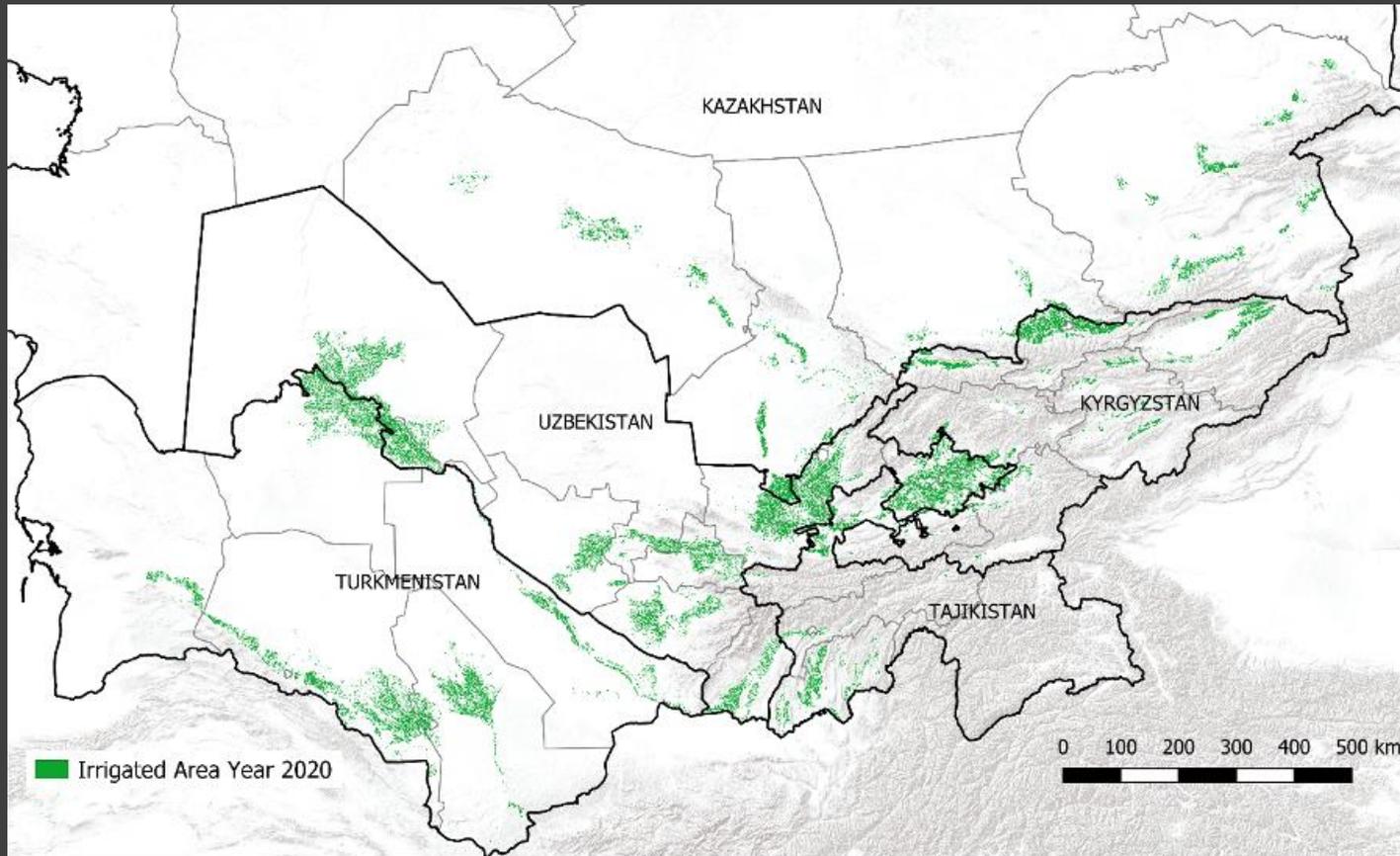
- Durchschnittliche Beiträge zum jährlichen Abfluss
  - 80 % Schneeschmelze
  - 17 % Regen
  - 3 % Gletscherschmelze
- Unterschiedliche Abflussregime
  - Schnee-Glaziär
  - Schnee-Regen
- Beispiel von Schnee-Regen Abflussregimen in tief-liegenden Einzugsgebieten (Chirchik Einzugsgebiet)

# Abflussregime



- Durchschnittliche Beiträge zum jährlichen Abfluss
  - 80 % Schneeschmelze
  - 17 % Regen
  - 3 % Gletscherschmelze
- Unterschiedliche Abflussregime
  - Schnee-Glaziär
  - Schnee-Regen
- Beispiel für das Schnee-Glaziär Abflussregimeverhalten von Hochgebirgsflüssen
- Größte Abflussmengen zeitlich synchronisiert mit der größten Wassernachfrage im Unterstrom

# Bewässerte Landwirtschaft



- Seit Jahrtausenden spielt die Bewässerung im Unterstrom eine wichtige Rolle, um die Bevölkerung und ihre Lebensgrundlage zu unterstützen
- Seit Anbeginn der Geschichte waren Oasen Umschlagsstätte der Seidenstraße und Schmelztiegel der Ideen
- Existierende bewässerte Gebiete wurden während der sowjetischen Kolonialzeit im 20. Jahrhundert stark erweitert
- Mehr als 92 % der jährlich erneuerbaren Wasserressourcen werden zum Zweck der Bewässerung allokiert
- Es existieren zehntausende Kilometer Bewässerungs- und Drainagekanäle

Ragettli, S.; Herberz, T.; Siegfried, T. An Unsupervised Classification Algorithm for Multi-Temporal Irrigated Area Mapping in Central Asia. Remote Sens. 2018, 10, 1823. <https://doi.org/10.3390/rs10111823>

Source: EU Horizon 2020 Project **HYDRO4U**, hydrosolutions GmbH

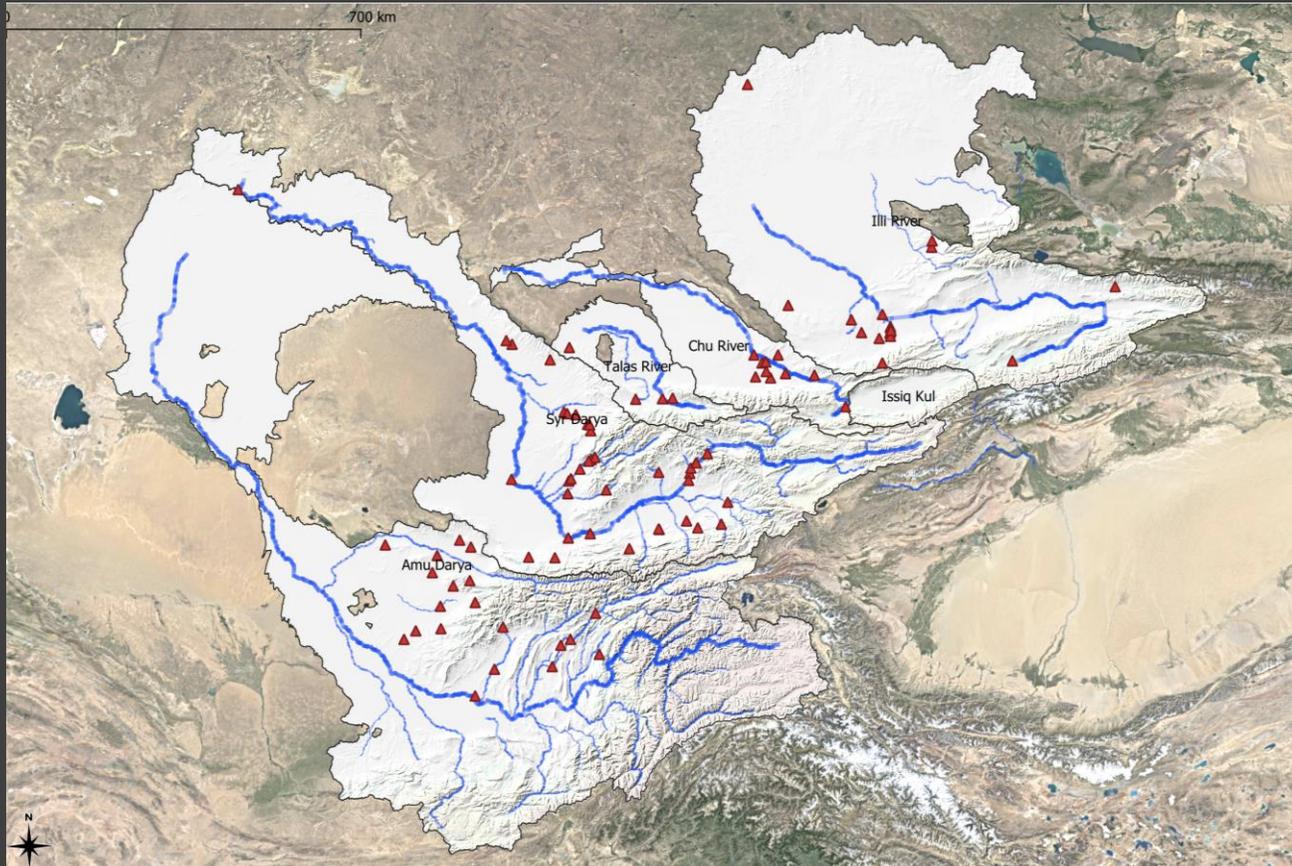
# Bewässerungs- & Wasserkraftinfrastruktur



## Beispiel Usbekistan

- ~ 27'600 km inter-farm Kanäle, 62 % davon unbefestigt
- ~ 167'000 km on-farm Kanäle, 80 % davon unbefestigt

# Bewässerungs- & Wasserkraftinfrastruktur

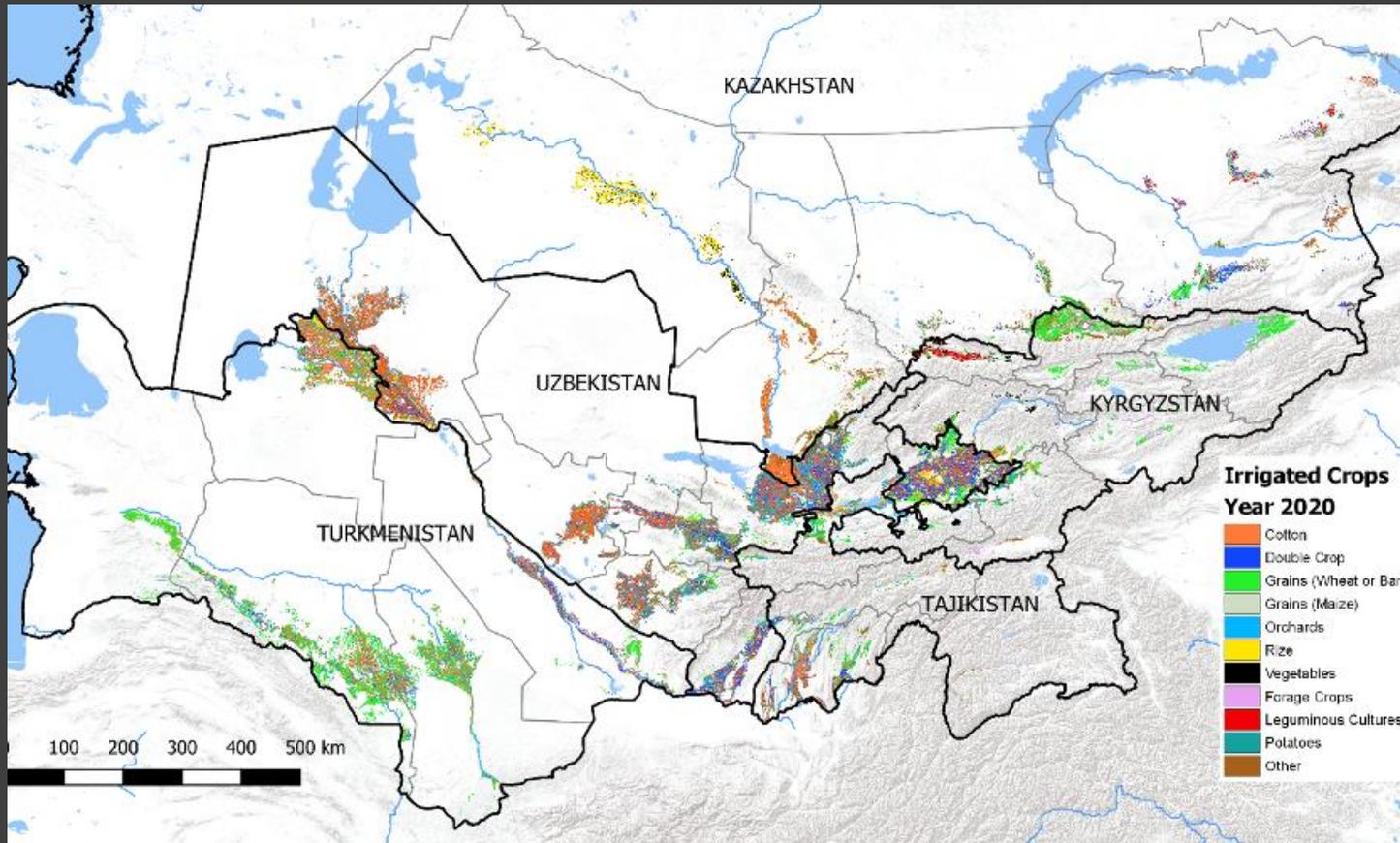


GOODD Global Dataset: 88 dams in CA river basins.

Source: Mulligan, M., van Soesbergen, A. and Saenz, L. (2020) GOODD, a global dataset of more than 38,000 georeferenced dams. Scientific Data <http://www.nature.com/scientificdata>.

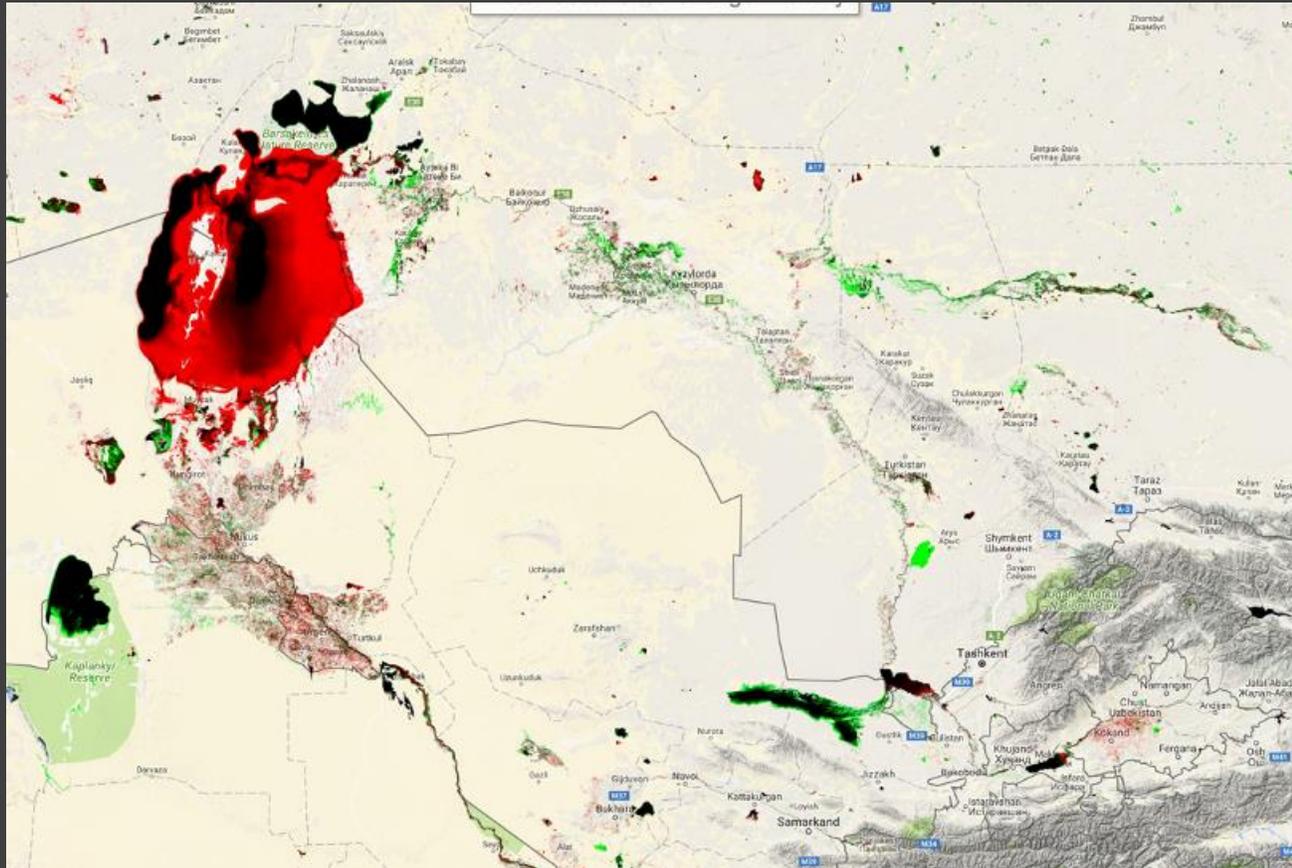
- Wichtige Wasserkraftsinfrastruktur in den Naryn- und Vakhshkaskaden
- Totales Wasserkraftpotential
  - 524 GW in KYG und TAJ
- Derzeit installierte Leistung:
  - 43 GW
- Große Anzahl von saisonalen / dekadischen Speichern im Unterstrom zur Steuerung der Verteilung des Bewässerungswassers

# Regional differenzierter Anbau



- Regionale Differenzierung des landwirtschaftlichen Anbaus aufgrund agro-hydro-klimatischer Bedingungen, geopolitischen Überlegungen sowie dem Zugang zu lokalen und internationalen Märkten

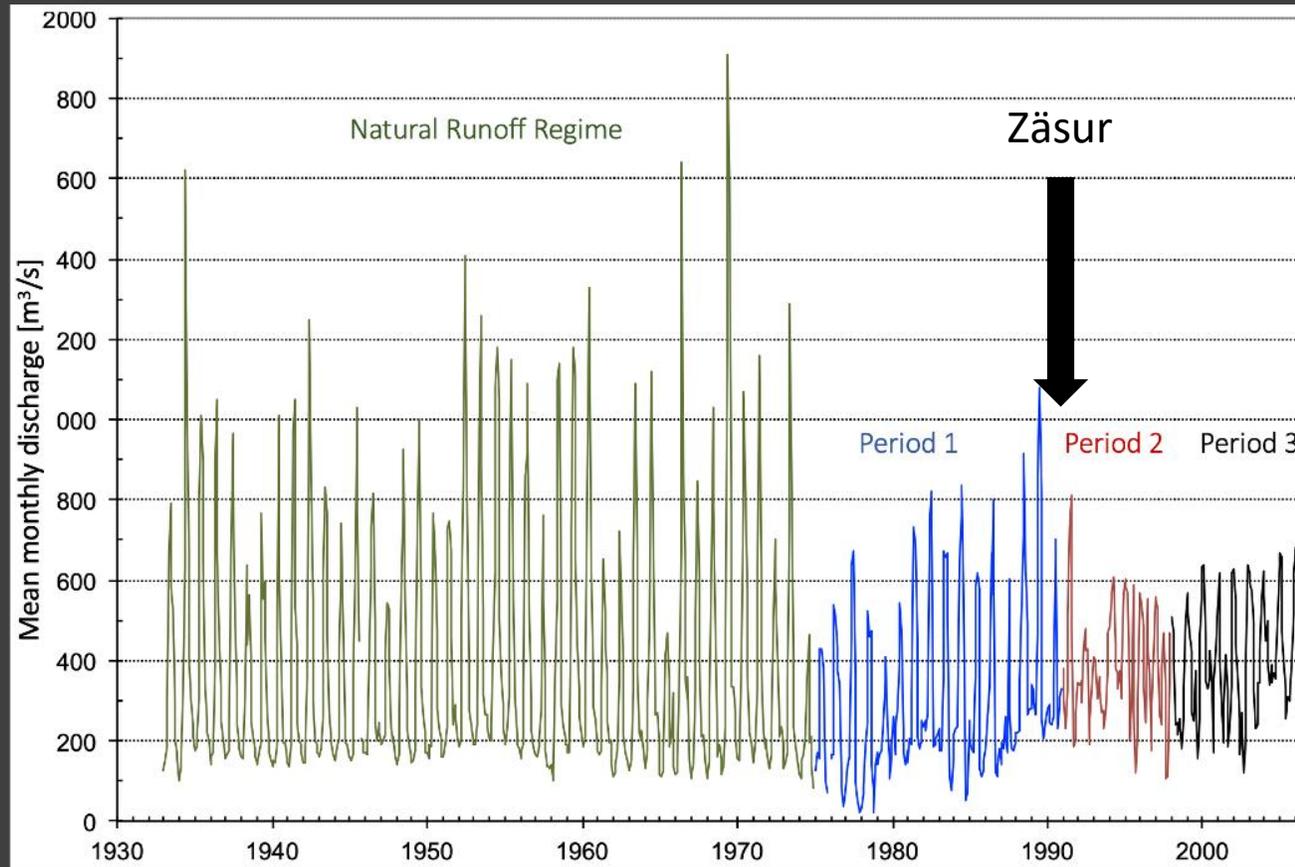
# Ökologische Katastrophe



- Aralsee vor 1960 der viert größte See weltweit gemessen an der Fläche
- Konsumtive Allokation in der bewässerten Landwirtschaft hat das Ökosystem des Aralsees zerstört aber dafür zur Gesamtentwicklung der Region beigetragen
- Bodenfruchtbarkeit ist aufgrund von Versalzung in schlecht drainierten Unterstromgebieten stark gesunken

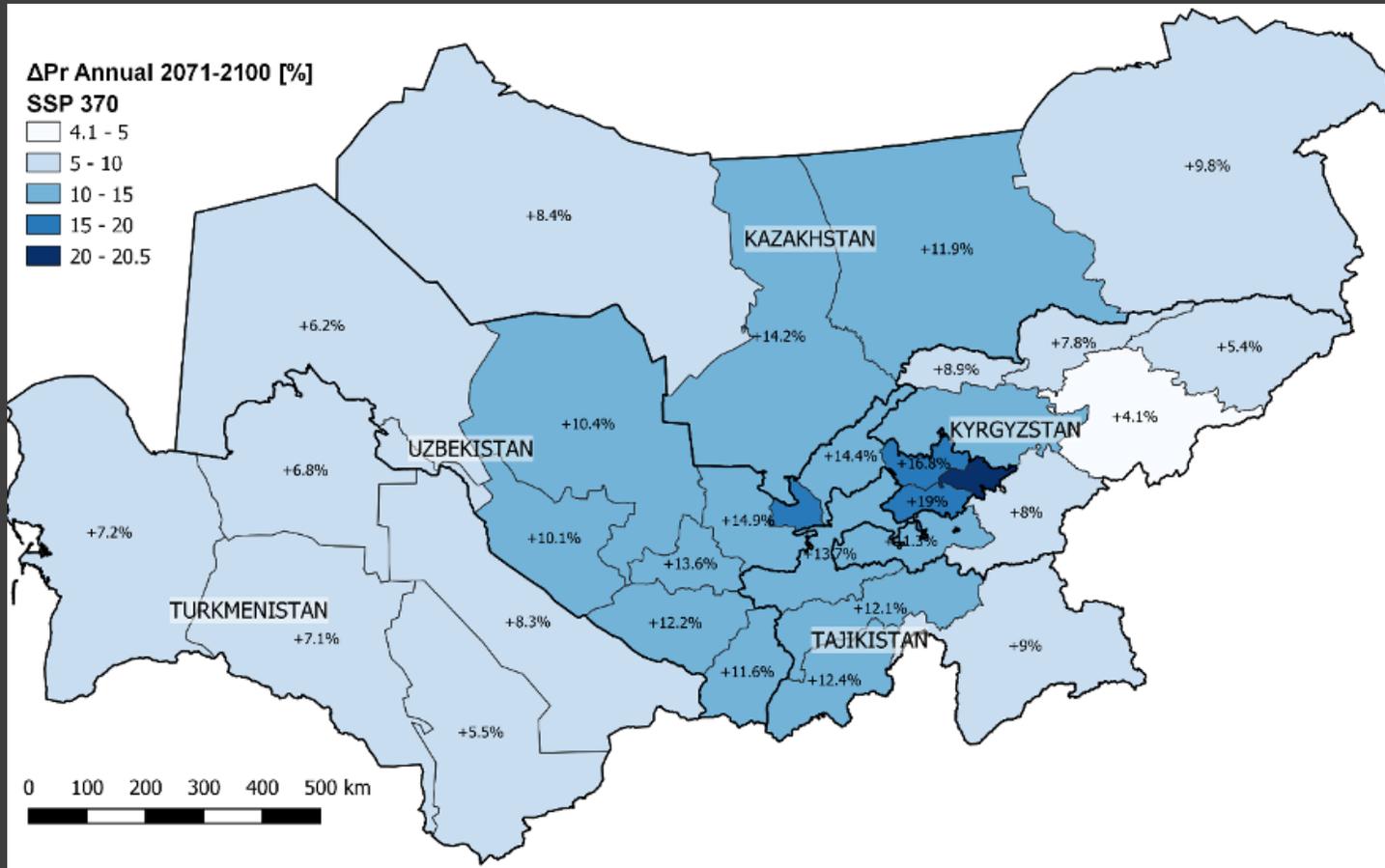
Quelle: [global-surface-water.appspot.com](http://global-surface-water.appspot.com). Karte zeigt die langjährigen Veränderungen der Wasservorkommen. Rote Farbe: Abahme der Wahrscheinlichkeit von Wasservorkommen, Grün: Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Wasservorkommen.

# Politische Katastrophe



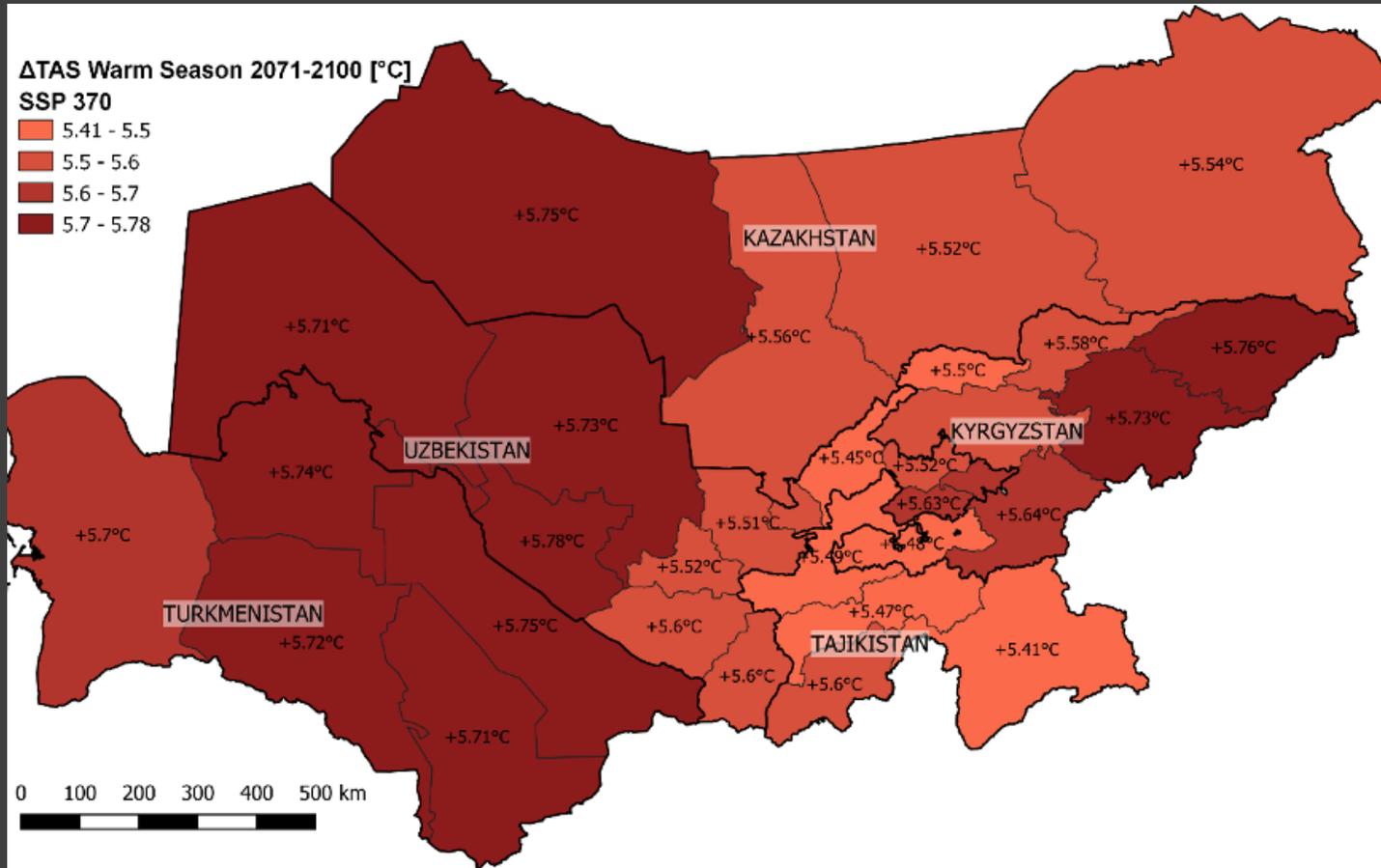
- Untergang der Sowjetunion war traumatisierend für die Region
- Grenzüberschreitendes Management der großen Wasserinfrastruktur bleibt auch 30 Jahre später eine Herausforderung die zu regelmäßigen Konflikten führt

# Niederschlagsprojektionen



- Klimamodell-Ensemble-Projektionen für das SSP 370-Szenario bezüglich des mittleren Jahresniederschlags 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1981-2010.
- > + 5 % Anstieg mit lokal wesentlich höheren Werten
- Große Unsicherheiten in diesen Prognosen der Niederschlagsentwicklung

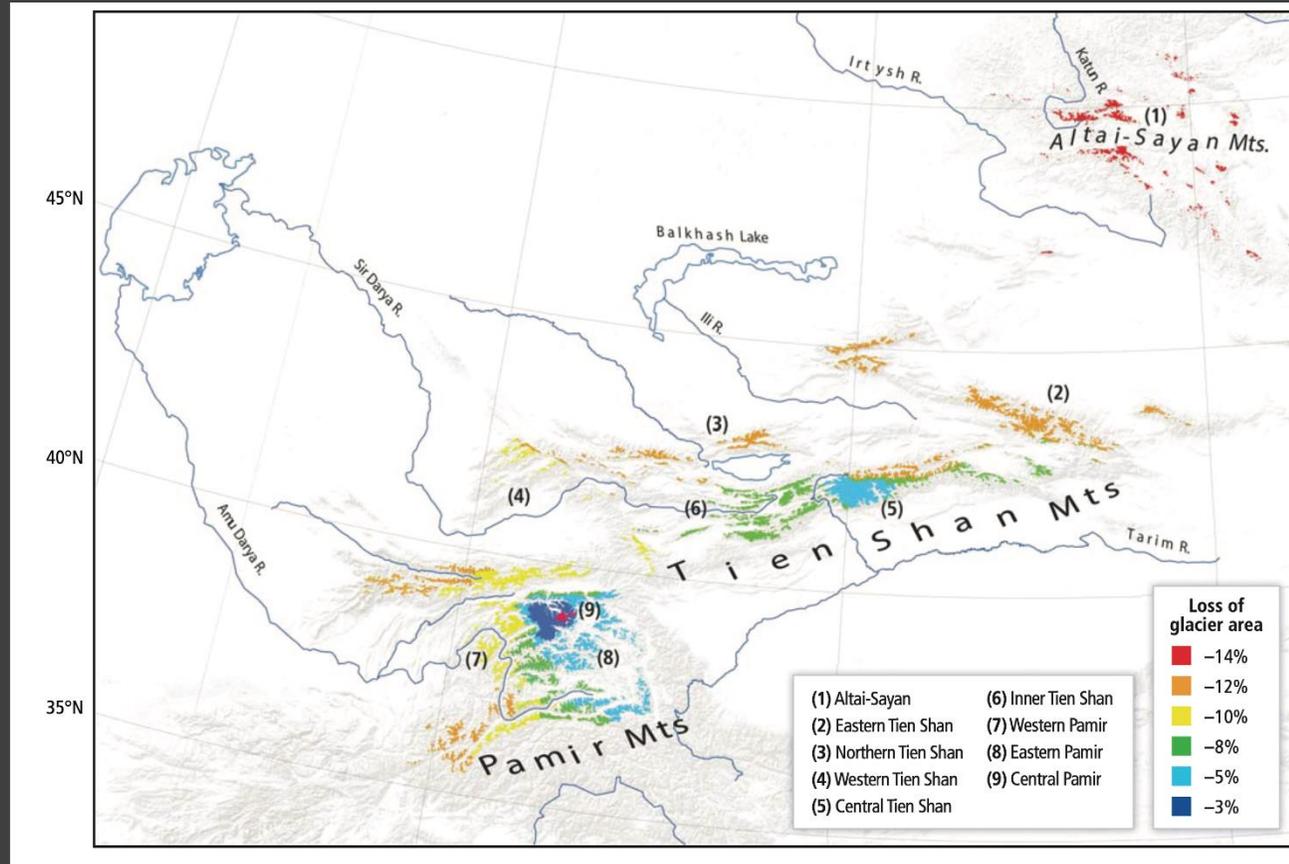
# Temperaturprojektionen



- Klimamodell-Ensemble-Projektionen für das SSP 370-Szenario bezüglich der Veränderung der mittleren Lufttemperaturen von April bis September in den Jahren 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1981-2010
- $\Delta T > + 5$  deg. C und Anstieg der Nullgradlinie um  $> 1'000$  Meter
- Modelle sind sich in Bezug auf diese Projektionen einig
- Einfluss auf den Anbaukalender im Unterstrom

Das SSP 370-Szenario befindet sich im oberen mittleren Teil der gesamten Palette der Klimapfadsszenarien, da es eine geringe internationale Priorität bei der Bewältigung von Umweltbelangen berücksichtigt.  
Quelle: hydrosolutions GmbH, 2021

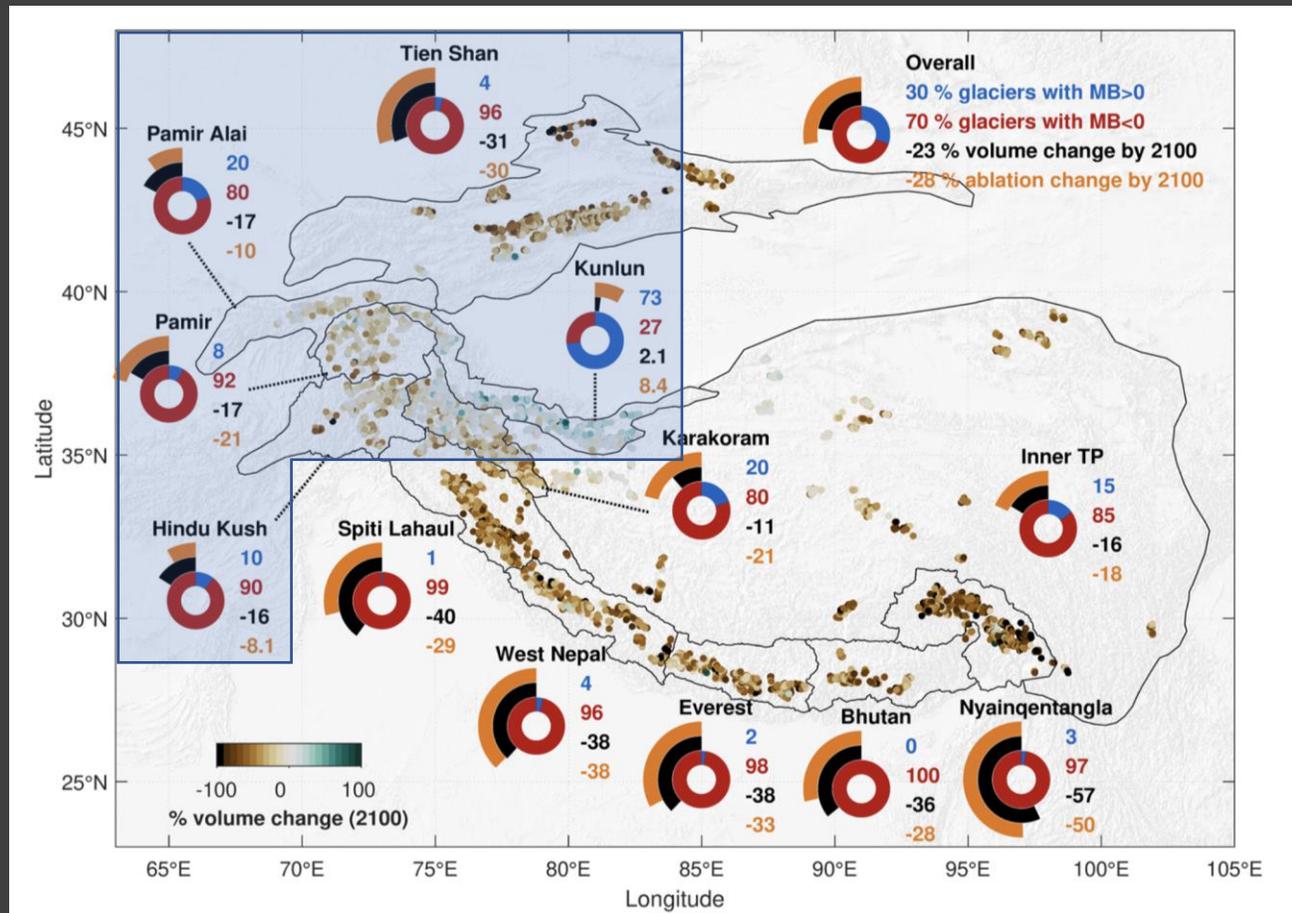
# Gletscherschmelze in HMA



- Reduktion der vergletscherten Fläche und dem gespeicherten Wasser-volumen im Landeis
- Vor allem tiefer liegende Gletscher von starker Schmelze betroffen
- Verlust von Permafrost

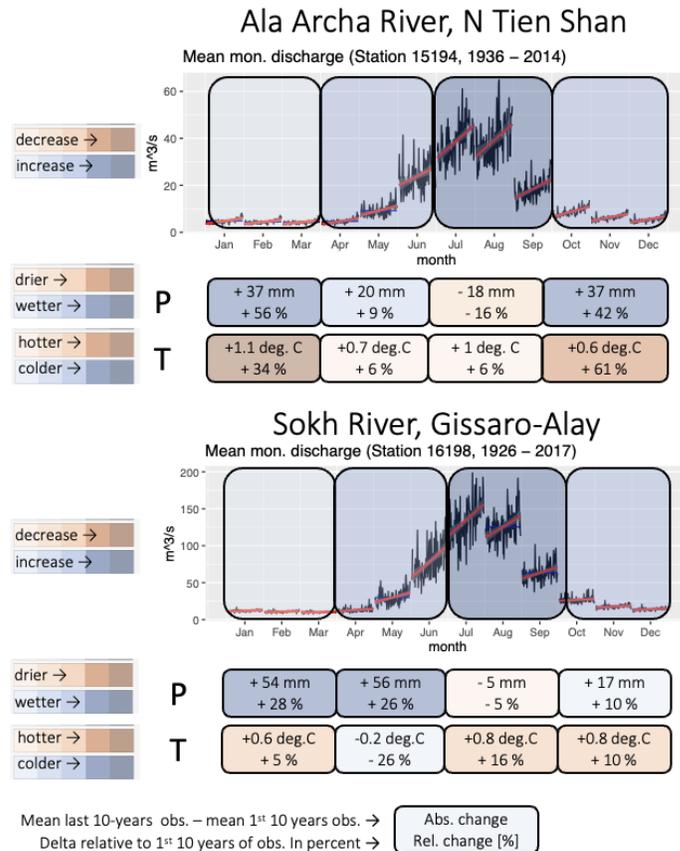
Fernerkundungs-analyse von den 1960er Jahren (Corona) bis 2008 (Landsat, Aster und Alos Prism). Quelle: Hijioka, Y., E. Lin, J.J. Pereira, R.T. Corlett, X. Cui, G.E. Insarov, R.D. Lasco, E. Lindgren, and A. Surjan, 2014: Asia. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1327-1370.

# Gletscherschmelze



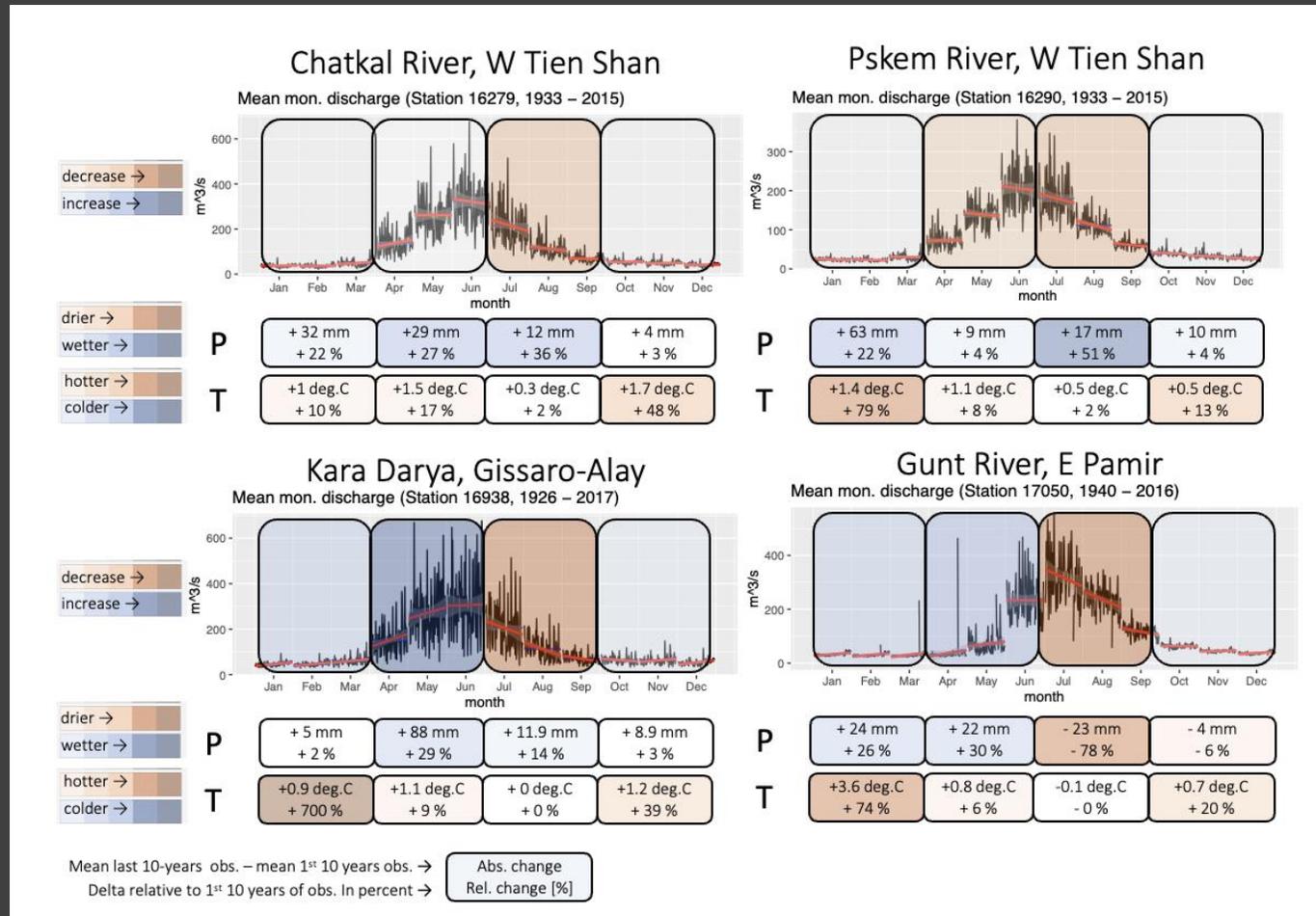
- Unter der Annahme anhaltender heutiger Trends wird 16 % - 31 % des Gletschervolumen in der zentralasiatischen HMA region abschmelzen (konservative Schätzung)
- Ganze asiatische Hochgebirgsregion von Abschmelze betroffen (Ausnahme Teile von Karakoram und Kunlun Shan)

# Historische Veränderungen in exemplarischen Einzugsgebieten



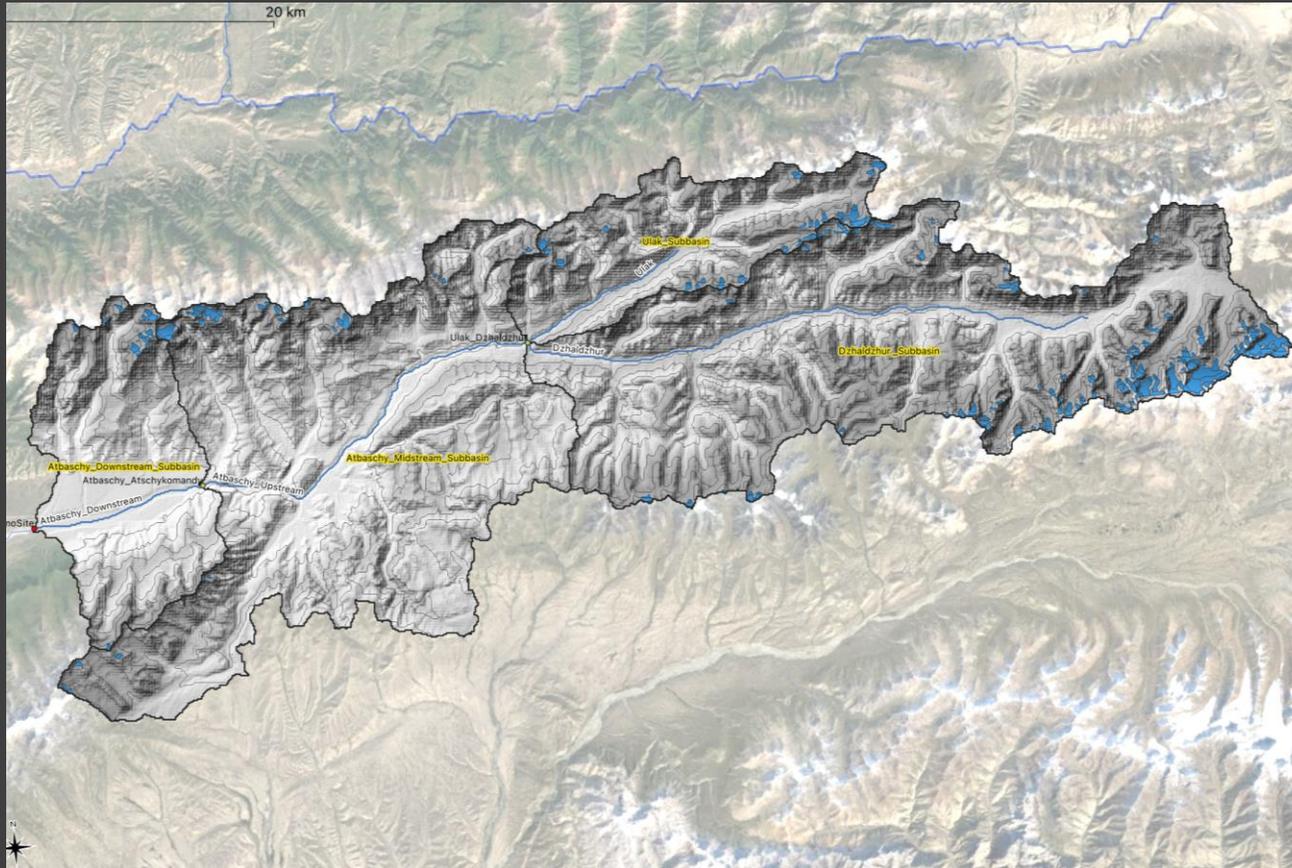
- Zunahme der Abflüsse in stark vergletscherten Einzugsgebieten vor allem in Q2 und Q3
- Erwärmung in allen Jahreszeiten aber vor allem in Q1 und Q4
- Zunahme der Niederschläge in den Wintermonaten in Q1 und Q4

# Historische Veränderungen in exemplarischen Einzugsgebieten



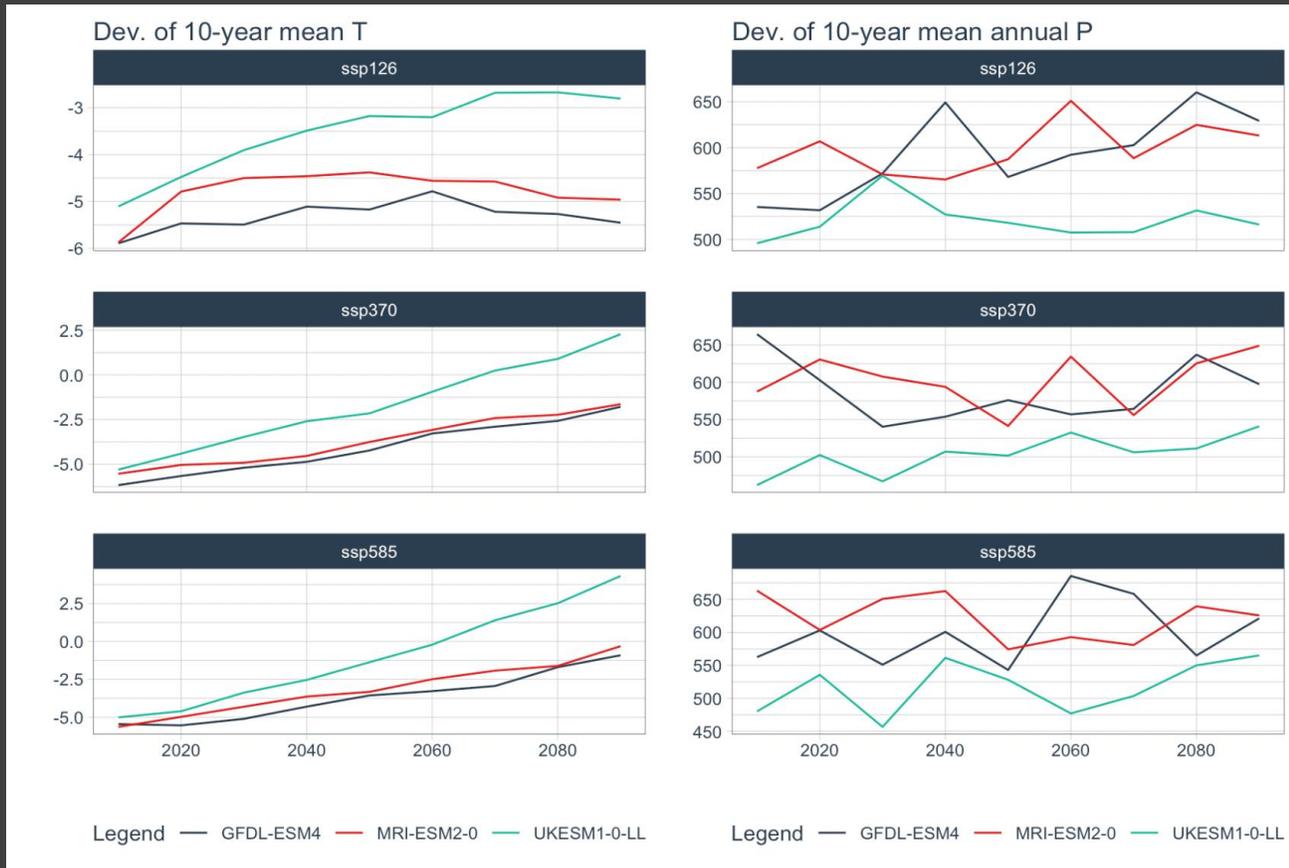
- Abnahme der Abflüsse in wenig vergletscherten Einzugsgebieten in tieferliegenden sowie sehr hochgelegenen Einzugsgebieten
- Erwärmung in allen Jahreszeiten aber vor allem in Q1 und Q4
- Zunahme der Niederschläge in den Wintermonaten in Q1 und Q4 (Ausnahme Gunt in Q4)

# Hydrologische Beispielmmodellierung – Atbaschy, Naryn



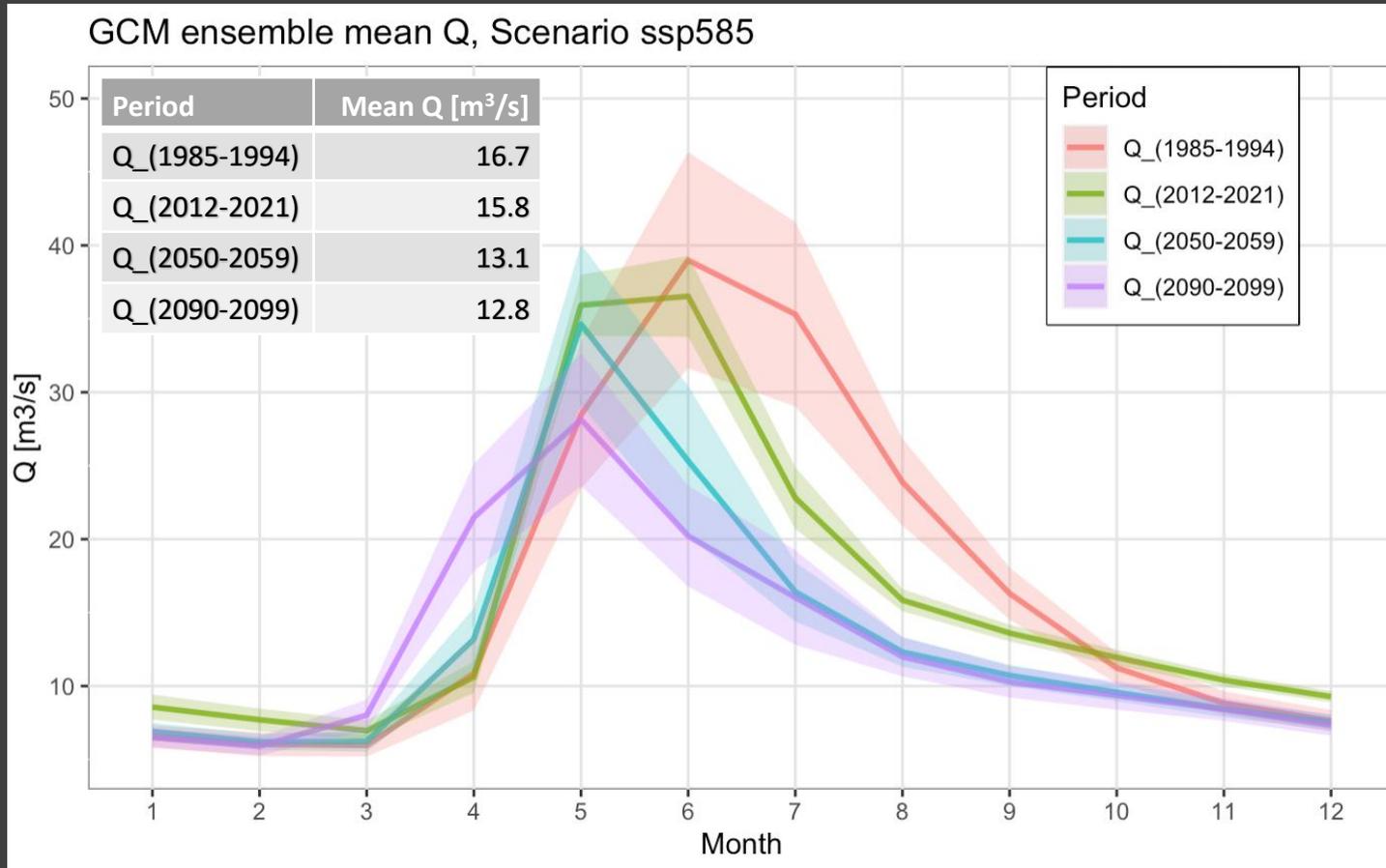
- Fläche Einzugsgebiet: 1'496 km<sup>2</sup>
- Höhenbereich: 2'455 – 4'843 masl
- Mittleres Q: 16.6 m<sup>3</sup>/s (1970-1995)
- Spezifischer Abfluss: 350 mm
- Gesamtgletscherfläche: 34 km<sup>2</sup>
- Gletschervolumen: 0.8 km<sup>3</sup>

# Klimatische Entwicklung im zentralasiatischen Hochland



- Temperatur- und Niederschlagsprognosen gemittelt über 10 Jahre für 3 GCM (GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0, UKESM2-0) und Szenarien (ssp126, ssp370, ssp585)
- Prognostizierte Temperaturentwicklung relativ konsistent über Modelle und Szenarien
- Prognostizierte Niederschlagsentwicklung stark modellabhängig

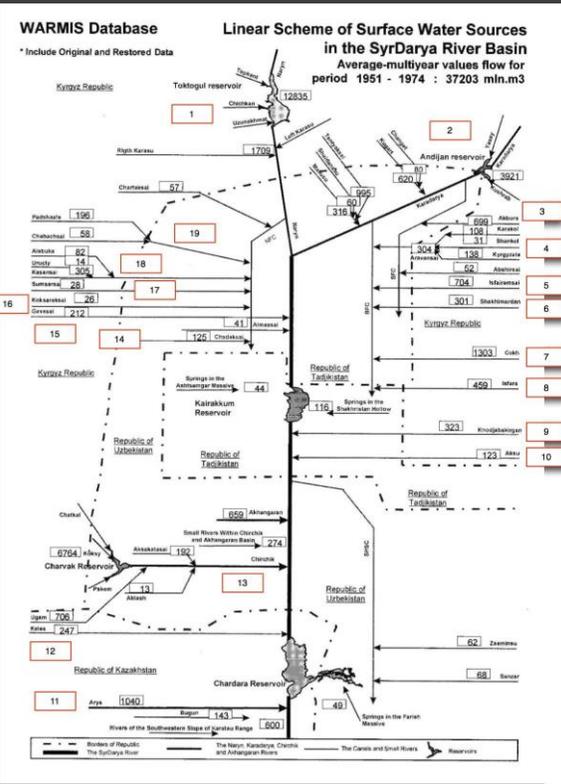
# Modellierte Entwicklung der Abfluss-ganglinien im Atbaschy Einzugsgebiet



Station 16076 Atbaschy-Atschakomandi:

- Gemessene Abflussganglinie (historisch, 1985 – 1994) im Vergleich mit modellierten Abflussganglinien für die Perioden 2012 – 2021, 2050 – 2059 und 2090 – 2099 (Mittelwerte über 3 GCM Modelle, Experiment 585)
- Regimewechsel Schnee-glaziären → Schnee-Regen

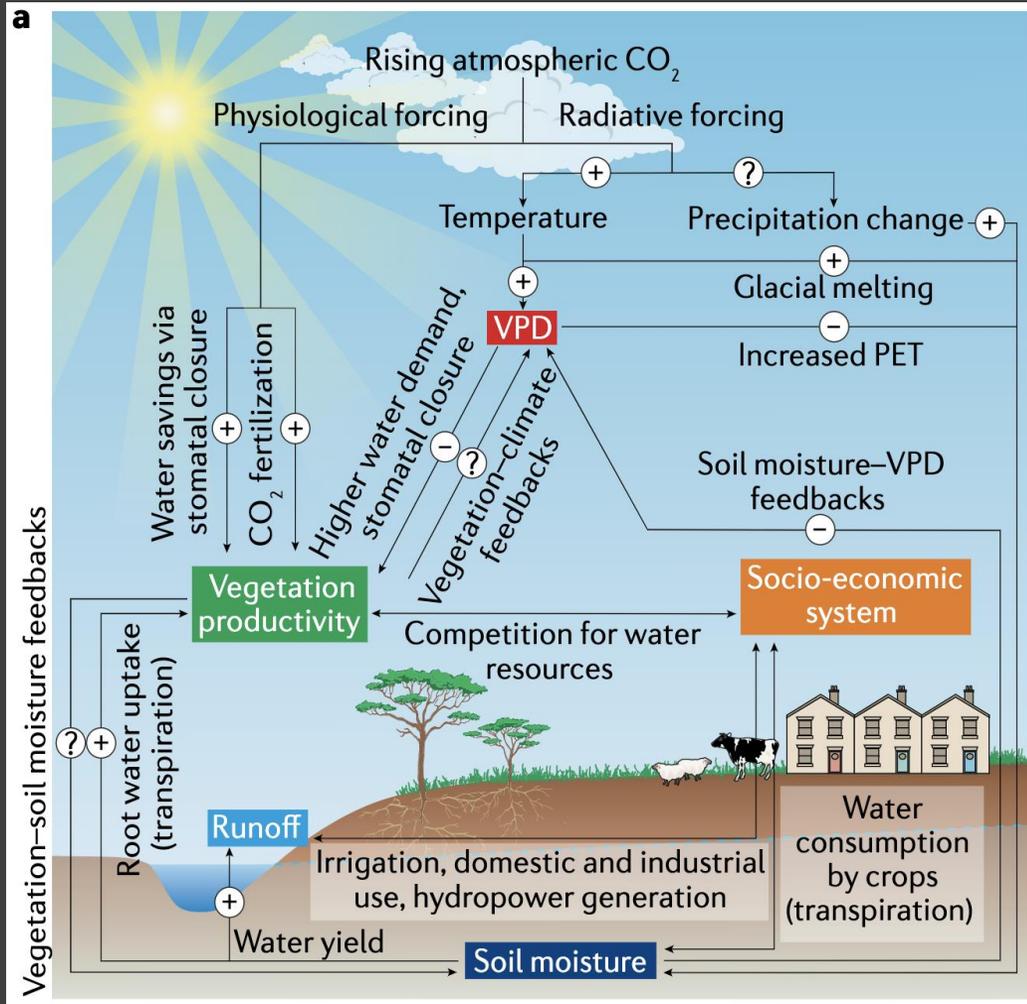
# Entwicklung in den großen Flüssen



#	River Name	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	Naryn	1.45	1.11	1.24	1.52	1.89	1.14	0.58	0.51	0.68	1.05	1.67	1.89
2	Yassy	1.37	1.76	1.86	1.07	0.64	0.62	0.90	1.45	2.24	2.64	1.96	1.38
3	Akbura	1.25	0.94	0.91	1.03	1.23	0.85	0.58	0.74	1.01	1.40	2.02	1.94
4	Aravansay	0.89	0.85	0.98	1.16	0.80	0.55	0.70	0.96	1.32	1.92	1.83	1.18
5	Isfaramsai	1.17	0.90	0.86	0.99	1.22	0.90	0.59	0.74	1.00	1.36	1.97	1.86
6	Shakimardan	1.20	0.89	0.85	0.98	1.17	0.80	0.56	0.70	0.97	1.33	1.91	1.85
7	Sokh	1.37	1.04	0.99	1.13	1.35	0.93	0.64	0.81	1.11	1.54	2.21	2.13
8	Isfara	1.59	1.23	1.36	1.66	2.09	1.26	0.64	0.56	0.75	1.15	1.83	2.08
9	Khodjabirgan	1.25	0.92	0.88	1.02	1.22	0.84	0.58	0.74	1.01	1.39	1.99	1.92
10	Aksu	1.28	0.95	0.90	1.00	1.23	0.84	0.59	0.74	1.02	1.41	1.97	1.96
11	Arys	NA											
12	Keles	1.42	1.74	1.05	0.54	0.47	0.61	0.88	1.60	1.75	1.33	1.02	1.14
13	Chirchik	1.17	1.20	1.47	1.62	1.01	0.59	0.53	0.73	1.19	1.88	2.15	1.63
14	Chadaksai	2.20	1.73	1.22	1.38	1.88	2.15	1.32	0.68	0.59	0.80	1.25	1.91
15	Gavasi	2.14	1.40	1.06	1.00	1.23	1.40	0.97	0.67	0.84	1.15	1.58	2.27
16	Koksareksai	1.00	0.75	1.00	1.29	0.84	0.64	0.76	1.00	1.38	2.00	1.75	1.25
17	Sumsarsa	0.80	1.00	1.14	0.92	0.61	0.77	1.07	1.44	1.83	1.80	1.25	1.00
18	Kasansai	0.97	1.08	1.32	0.91	0.63	0.79	1.08	1.51	2.13	2.08	1.31	1.00
19	Padshata	1.78	2.04	1.60	1.17	1.29	1.60	1.85	1.10	0.59	0.51	0.70	1.11

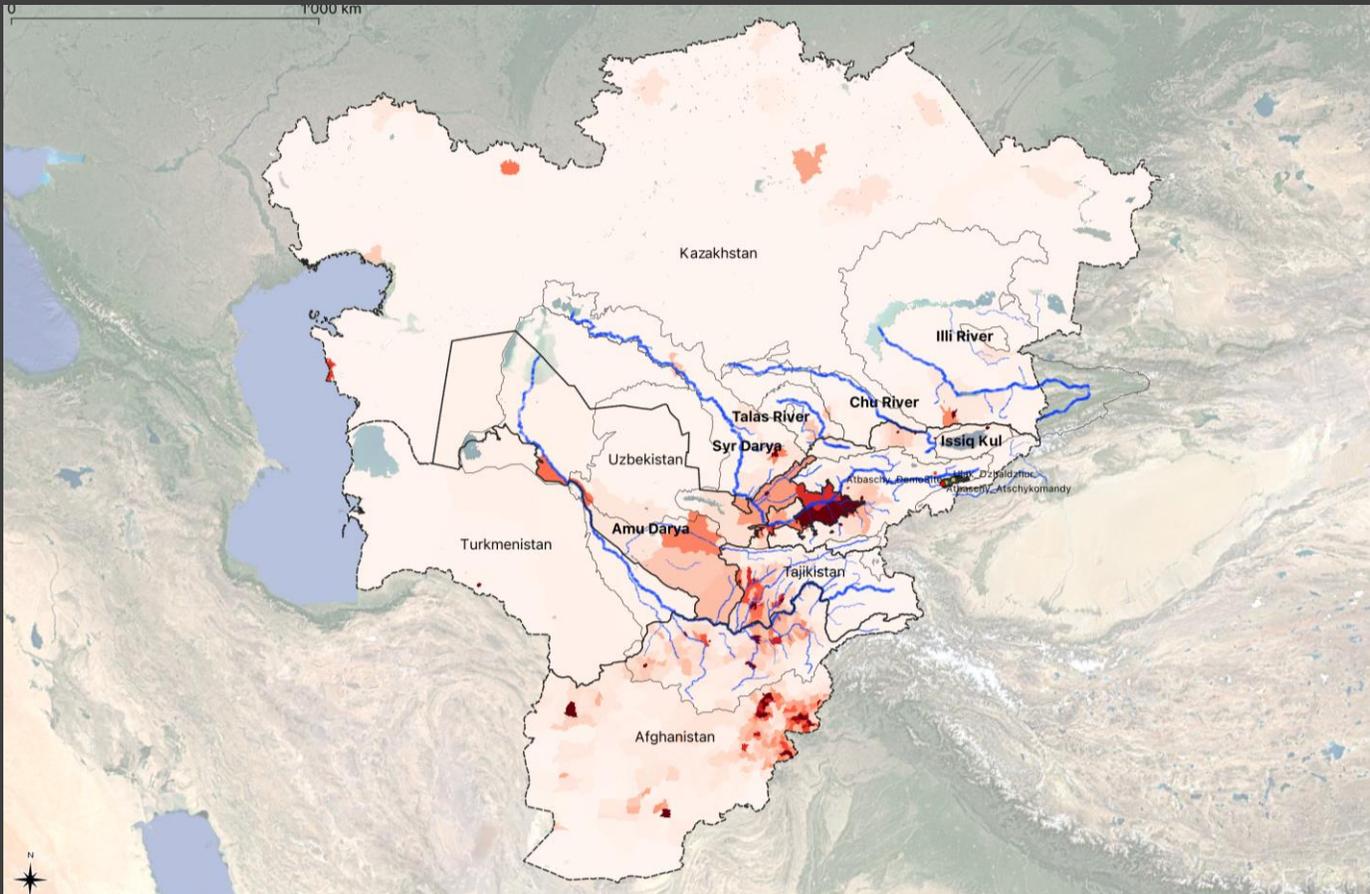
- Übergreifende Entwicklung in den Zubringern der großen Flüsse mittels regionalen Studien bestätigt
- Entkoppelung des Timings zwischen größter Wasserver-fügbbarkeit (Q2) und -nach-frage im Unterstrom (Q3)
- Bau von Speichern erscheint als interessante Maßnahme um Auswirkungen in kleineren Einzugsgebieten abzufedern.

# Komplexe Auswirkungen im Unterstrom



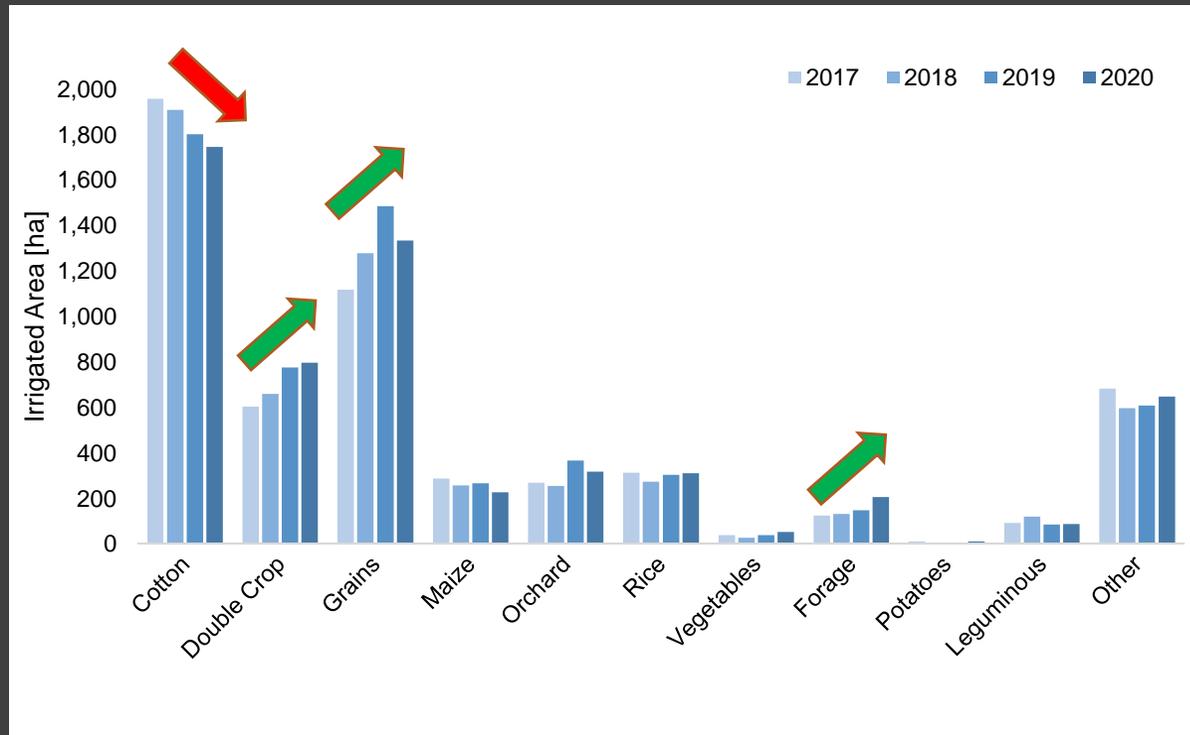
- Die beobachtete verstärkte atmosphärische Trocknung und der erhöhte Wasserbedarf wird allgemein als einfache thermodynamische Folge der Erwärmung akzeptiert
- Mangel an Oberflächenfeuchtigkeit und Verdunstungskühlung verstärkt zusätzlich die regionale Oberflächen-erwärmung in Trockengebieten
- Kein wissenschaftlicher Konsens über die komplexen Rückkoppelungen zwischen Vegetation & Klima sowie Vegetation & Bodenfeuchte und deren Auswirkungen auf die Trockenheit

# Ernährungssicherheit & Wassernachfrage



- Bevölkerungsentwicklung ( $\sim + 75 \%$ ) bis Ende Jahrhundert wird zu einer stark steigenden Wassernachfrage führen,
- Überlegungen der Ernährungssicherheit werden an Bedeutung gewinnen
- Beschleunigung der Verlagerung weg vom nachwachsenden Rohstoff Baumwolle hin zu mehr Nahrungsmittel- und Futterpflanzenproduktion

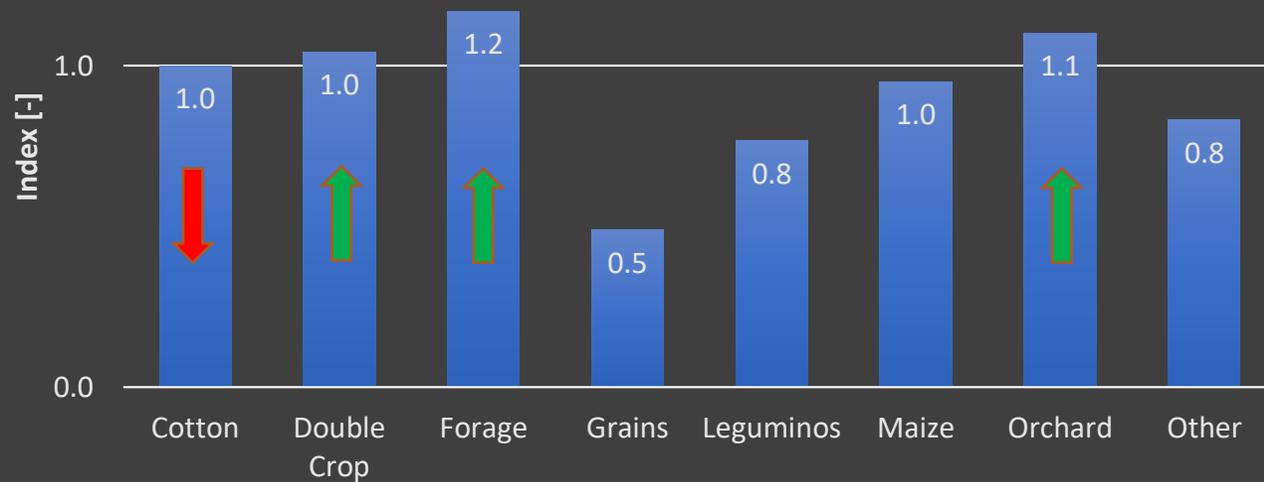
# Ernährungssicherheit & Wassernachfrage



- Bevölkerungsentwicklung (~ + 75 %) bis Ende Jahrhundert wird zu einer stark steigenden Wassernachfrage führen,
- Überlegungen der Ernährungssicherheit werden an Bedeutung gewinnen
- Beschleunigung der Verlagerung weg vom nachwachsenden Rohstoff Baumwolle hin zu mehr Nahrungsmittel- und Futterpflanzenproduktion

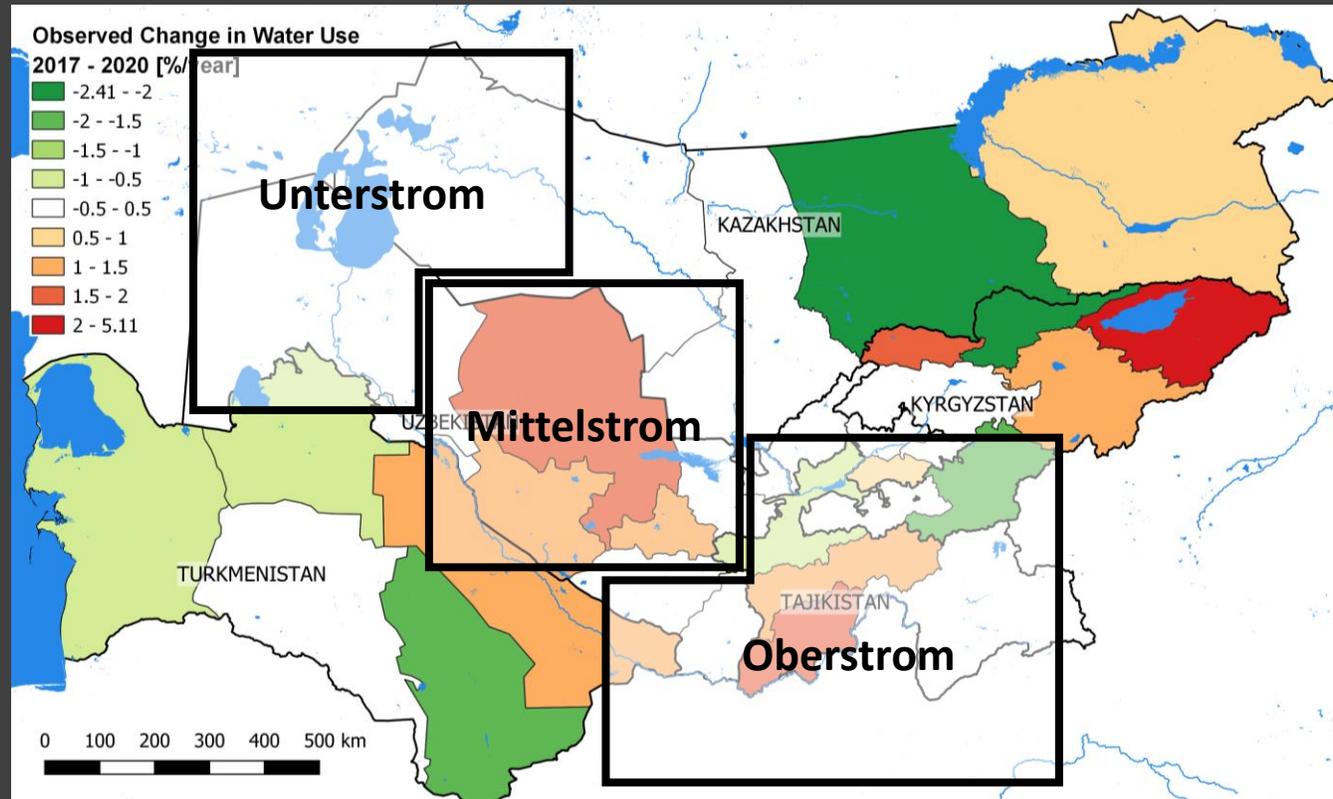
# Nutzpflanzenspezifischer Wasserbedarf in Zentralasien

## Tatsächlicher, nutzpflanzenspezifischer Evapotranspirationsindex in Zentralasien



- Unter der Annahme einer Fortsetzung heutiger Trends wird sich die Landwirtschaft hin zu einer Produktion mit erhöhtem Wasserbedarf bewegen
- Implikationen für die inter-regionale und zwischen-staatliche Wasserverteilung

# Störung eines fragilen Burgfriedens



- Das Amu Darya Einzugsgebiet erscheint als möglicher Hotspot von zukünftigen Verteilungskonflikten
- Vor allem Mittel- und Unterstrom werden von der künftigen Entwicklung betroffen sein, also die Gebiete, die schon heute von Wasserknappheit und Bodenversalzung betroffen sind
- Auswirkungen einer ökonomischen Entwicklung Nordafghanistans mit einhergehender landwirtschaftlicher Expansion in Diskussionen oft übersehen

Geschätzte Auswirkungen laufender Änderungen in den Anbaumustern von Kulturpflanzen auf den Gesamtwasserverbrauch pro Region, basierend auf den beobachteten Änderungen dieser Muster von 2017 - 2020 und dem mehrjährigen durchschnittlichen ET blue pro Pflanzenkategorie.  
Quelle: hydrosolutions GmbH, 2021

# Zusammenfassung

- Beobachtete und prognostizierte hydrologische Veränderungen entsprechen weltweiten Entwicklungen in anderen Hochgebirgsregionen
- Gefahrenlandschaft durch hydroklimatologische Extreme wird sich verändern. Alternde Infrastruktur und fehlende sektorale Investitionen machen die Region unvorbereitet und anfällig .
- Kooperation anstatt nicht kooperative Wassernutzung wird helfen, politisch stabile und nachhaltige grenzüberschreitende Allokationslösungen zu finden
- Neue kosteneffiziente Technologien, wie z. B. Satellitenfernerkundung, eröffnen neue, skalierbare Möglichkeiten zur besseren Nutzung der erneuerbaren Wasserressourcen





## Contact and Location

Dr. Tobias Siegfried  
hydrosolutions GmbH  
Venusstrasse 29  
CH-8050 Zurich  
Switzerland

+41 43 535 05 80

email: [siegfried@hydrosolutions.ch](mailto:siegfried@hydrosolutions.ch)

web: <http://www.hydrosolutions.ch>