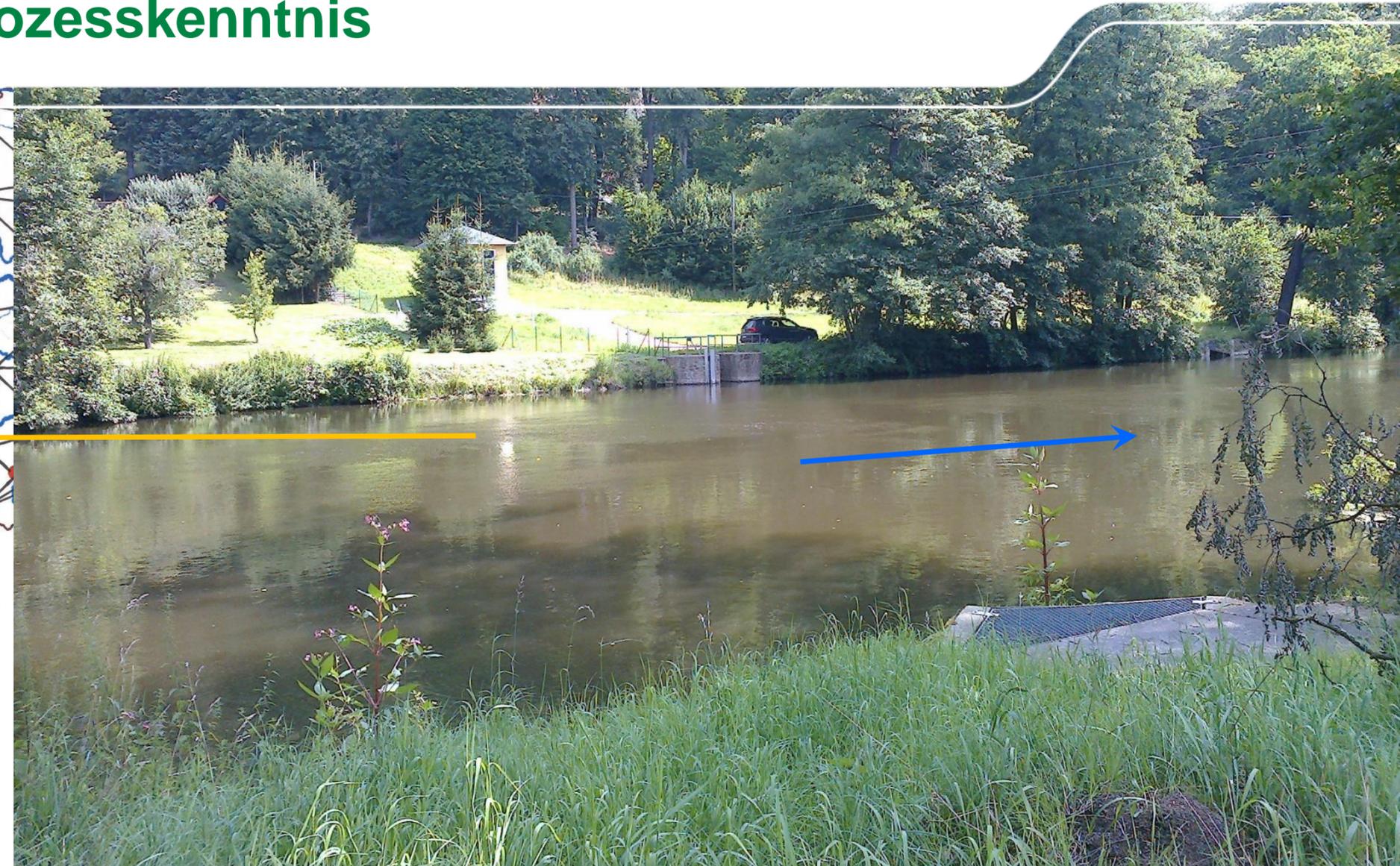
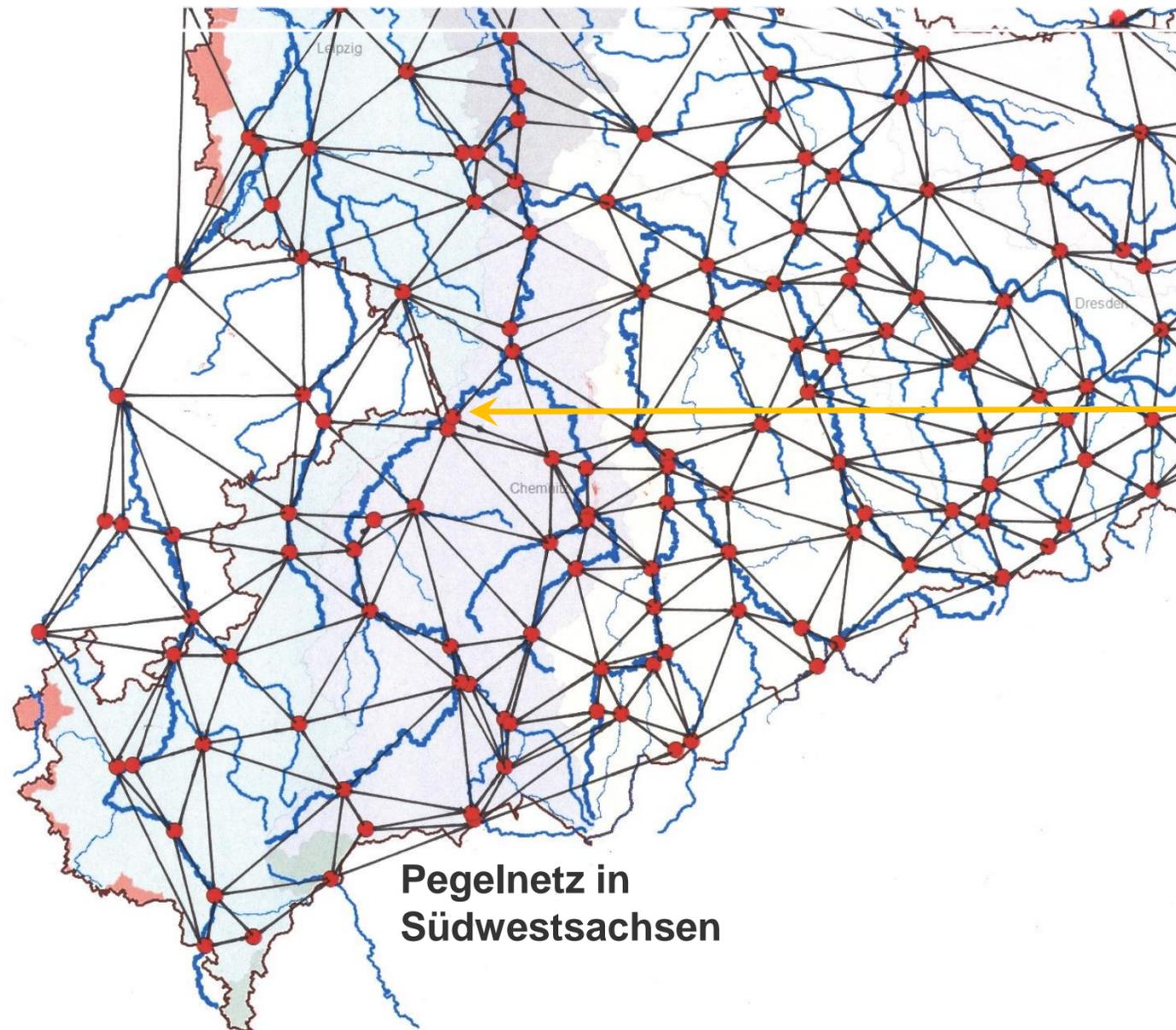


Die Konzeption des hydrologischen Pegelnetzes in Sachsen

Anthropogenes Erfordernis versus Prozesskenntnis



Pegel Wolkenburg/Zwickauer Mulde mit Ultraschall-Durchfluss-Messanlage (Foto: BfUL)

Nutzungsbereich der erhobenen Daten

Pegelfunktionen

Nutzungsbereich 1:

Abgestimmte Nutzung der Ressourcen der Fließgewässer (optimale Bewirtschaftung)

Nutzungsbereich 2:

Schutz der Fließgewässerressourcen vor Schädigung

Nutzungsbereich 3:

Schutz vor schädigenden Wirkungen fließenden Wassers

Nutzungsbereich 4:

Bereitstellung von Grundlagen in Form von Daten

Landschaftsbezogene langzeitige Erfassung des gesamten Spektrums von Wasserständen und Durchflüssen in Fließgewässern unter langsam und allmählich ablaufender anthropogener Beeinflussung zur Regionalisierung (Übertragung in unbeobachtete Gebiete) und Identifizierung der Folgen von Änderungen der Landnutzung und des Klimas

Einzugsgebietsbezogene langzeitige Erfassung des gesamten Spektrums von Wasserständen und Durchflüssen in Fließgewässern zur Bewirtschaftung von Fluss(teil)gebieten

Erfassung hydrologischer Daten zur operativen Vorhersage

Traditionelle Erfassung hydrologischer Daten zur Generierung von Hochwasserstandsmeldungen

Erfassung hydrologischer Daten zum Betrieb wasserbau- und wasserwirtschaftlicher Anlagen

Erfassung hydrologischer Daten zur Abstimmung grenzüberschreitender Durchflüsse

Erfassung hydrologischer Daten zum Gewässergütemonitoring (EU-WRRL)

Erfassung hydrologischer Daten für sonstige Zwecke

Pegelfunktionen

zwingend

- - - - -
nicht zwingend

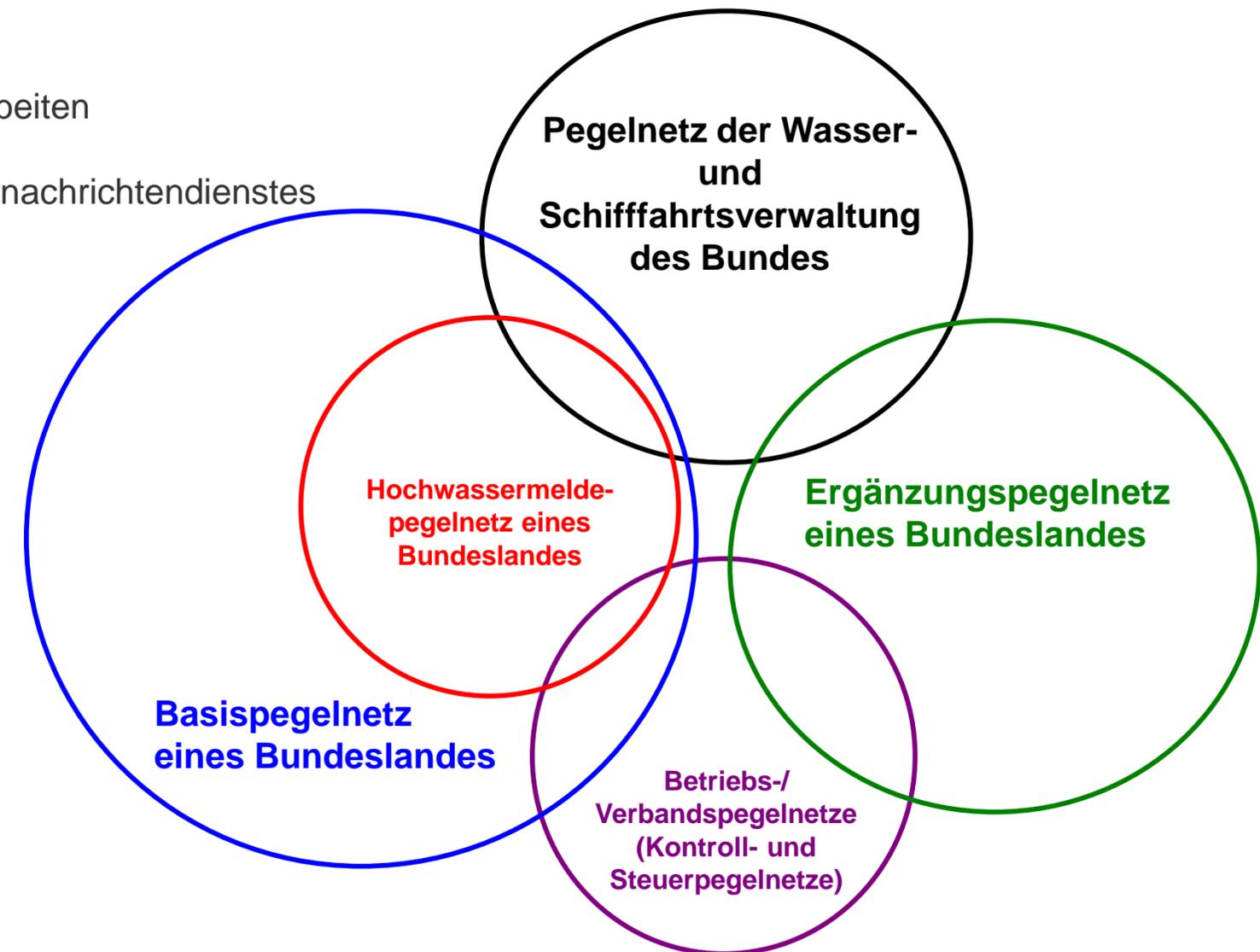
Unterscheidung von Pegelnetzen

Staatliches Hydrologisches Pegelnetz

- I Basispegelnetz mit dem Ziel dauerhafter Beobachtungen zum Zweck
 - I der Regionalisierung (Übertragung auf unbeobachtete Standorte) und Identifizierung von Änderungen der Landnutzung und des Klimas,
 - I der Bewirtschaftung von Fluss(teil)gebieten,
 - I hydrologischer Vorhersagen
- I Ergänzungs-(Sonder-)Pegelnetz zur befristeten Untersetzung gewässerkundlicher Arbeiten
- I Hochwassermeldepegelnetz zur Absicherung des verordnungsgemäßen Hochwassernachrichtendienstes

Andere Pegelnetze oder Pegelbetreiber

- I Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes mit ihren Pegeln an der Bundeswasserstraße Elbe (BW)
- I Talsperrenbetreiber mit ihrem Kontroll- und Steuerpegelnetz (KS) zur Überwachung des Betriebs von Stauanlagen
- I Verbände
- I Bundeseigene Bergbau-Verwaltungsgesellschaften
- I Energieversorger
- I Kommunen



Gründe und Ziele für Aufbau und Weiterentwicklung des staatlichen hydrologischen Pegelnetzes in Sachsen

- Erste Pegel wurden an der Elbe seit den 1770-er Jahren zur Unterstützung der Schifffahrt und zum Hochwassernachrichtendienst eingerichtet.
- In Folge des Hochwassers im Jahr 1897, das ganz Sachsen heimsuchte, erfolgte die Errichtung von hauptsächlich als „Hochwasserpegel“ fungierenden Lattenpegeln an günstig erreichbaren Orten innerhalb der Bebauung unabhängig von vorhandenen Umfluten (z. B. Mühlgräben) – i. d. R. keine Durchflussbestimmung.
- Ab 1908 entstanden Schreibpegel an den wenigen durch Wasserkraftanlagen unbeeinflussten Gewässerabschnitten für genaue gewässerkundliche Untersuchungen.
- In seinen Grundzügen war der Aufbau des sächsischen Pegelnetzes Ende der 1920-er Jahre abgeschlossen.
- Bis 2002 erfolgten z. T. Lage- und Funktionsverschiebungen infolge des Erkennens von Standortschwächen.
- Insbesondere in Folge der Hochwasser 2002 und 2010 forderten Kommunen und kommunale Behörden eine Verdichtung des Pegelnetzes. Diese Forderungen wurden nachdrücklich durch den Bericht einer von der Staatsregierung eingesetzten Untersuchungskommission gestützt.
- Defizite im räumlichen Informationsgehalt der vorhandenen Beobachtungsdaten wurden im Rahmen von Untersuchungen zur Regionalisierung von Hochwasserkennwerten zwischen 2008 und 2010 deutlich.
- In Zusammenhang mit der Repräsentativität von Beobachtungsdaten sind auch die Forderungen von EU-WRRL und –HWRMRL zu sehen.



Pegel Holtendorf/Weißer Schöps vor und nach der Rekonstruktion (Fotos: BfUL)

Pegelkonzeption für das **staatliche hydrologisches Pegelnetz**

- I Kurzfristig: Sicherung qualitativ hochwertiger Daten an unstrittigen Standorten durch Prüfung der hydraulischen Eigenschaften der Messstellen mit Schlussfolgerungen zur baulichen Gestaltung → rund 95 große und mittlere Baumaßnahmen
- I Mittelfristig: Optimierung und moderate Verdichtung des gewässerkundlichen Pegelnetzes hinsichtlich
 - der Erfassung der zeitlichen und räumlichen Variabilität der Wasserstände und Durchflüsse und
 - unter Beachtung der Dominanz einzelner Abflusskomponenten in verschiedenen Einzugsgebietsgrößen

Konzeption zur Entwicklung des gewässerkundlichen Messnetzes im Freistaat Sachsen

Version 1.0/2014 – 01.11.2014
Status: Abgeschlossen



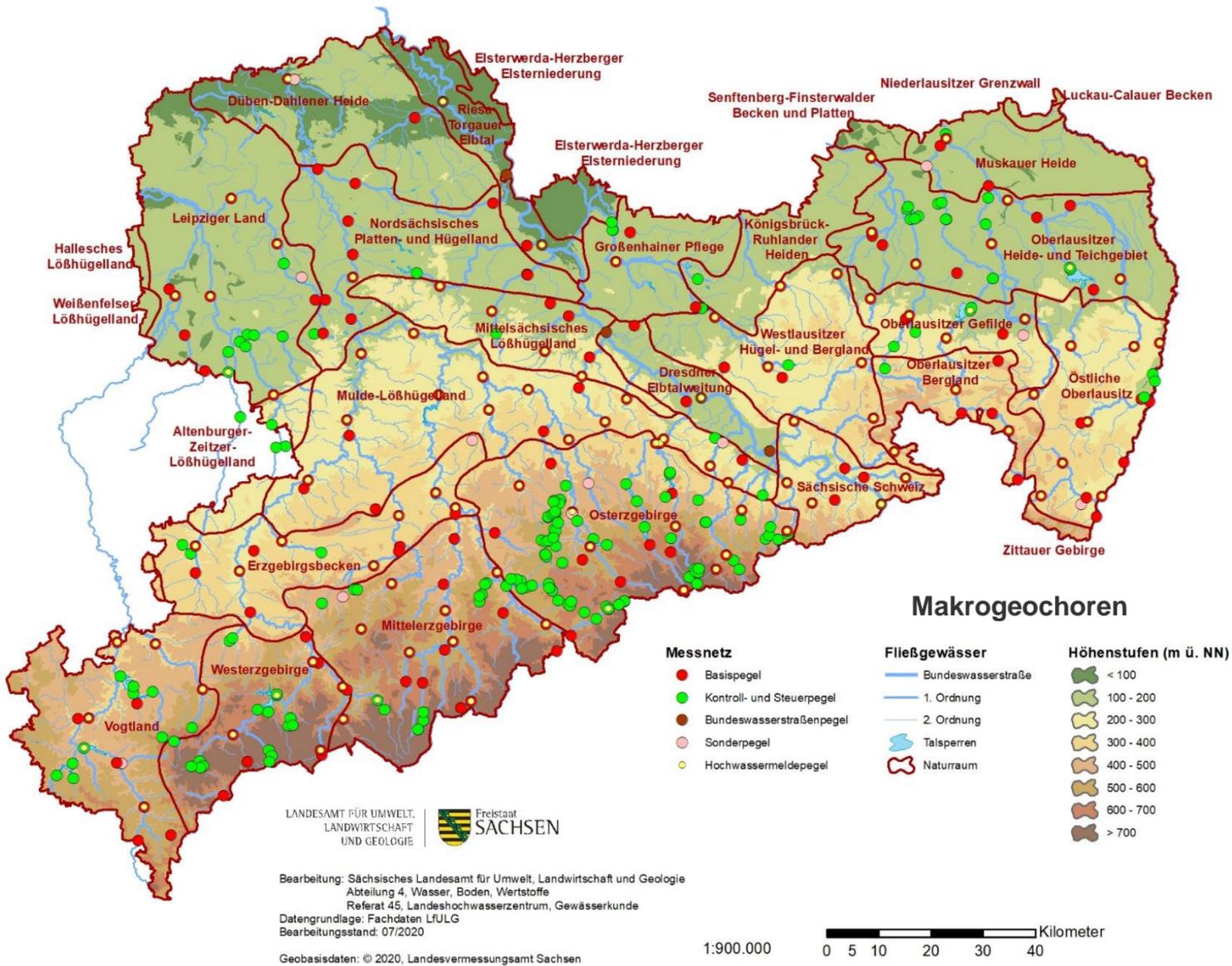
Basispegelnetz	Stand zum 01.11.2014	+172
	Vorgesehene Neubauten	+39
	Aus dem Sonderpegelnetz zu überführende Pegel	+5
	Zur Einstellung vorgesehene Pegel	-8
	Perspektivischer Stand	+208
Sonderpegelnetz	Stand zum 01.11.2014	+12
	Zur Übergabe in das Basispegelnetz vorgesehene Pegel	-5
	Zur Einstellung vorgesehene Pegel	-1
	Perspektivischer Stand	6
Gesamt	Stand zum 01.11.2014	+184
	Perspektivischer Stand	+214

Prämissen für die Gestaltung des Basispegelnetzes

- I Allein aus wirtschaftlichen Gründen heraus ist ein Pegelnetz in seiner Dichte begrenzt.
- I **Demzufolge müssen die Daten eines Pegels aussagekräftig für ein größtmögliches Gebiet, d. h. regionalisierbar sein.**
- I Zum Messen müssen spezifische hydraulische und örtliche (Gelände, Grundstück, Medien) Randbedingungen gegeben sein.
- I Die Daten müssen für Vorhersagezwecke verwendbar sein.
- I Die Daten müssen neben dem natürlichen Durchflussgeschehen definierte und undefinierte anthropogene Beeinflussungen charakterisieren.
- I **Die Daten müssen das Überlagerungsverhalten an Zusammenflüssen und Einmündungen erkennen lassen.**

Landschaftliche Besonderheiten in Sachsen

- I Große landschaftliche Heterogenität
- I Zonale Höhengliederung von Tief- über Hügelland bis zu Mittelgebirgslagen
- I Meridional orientierte Fließgewässer in z. T. stark verästelten Gewässernetzen
- I Verstärkung der klimatischen Kontinentalität von West nach Ost



Räumliche Aussagekraft des Pegelnetzes - Informationsgehalt/Entropie

- Suche nach sich ähnelnden Gebieten in Form des Unterschieds im Informationsgehalt der Einzugsgebiete
- Die niederschlagsbedingte Abflussreaktion ist nicht von den Werten einzelner meteorologischer, morphologischer, pedologischer und geologischer Kenngrößen des Gebietes abhängig, sondern von deren Kombination und damit in unbeobachteten Gebieten per se unbekannt.
- Unterstellung, dass die hydrologische Gebietsreaktion in strenger Abhängigkeit zur Gebietsaustattung steht
- Anwendung der Shannonschen **Informationsentropie H**

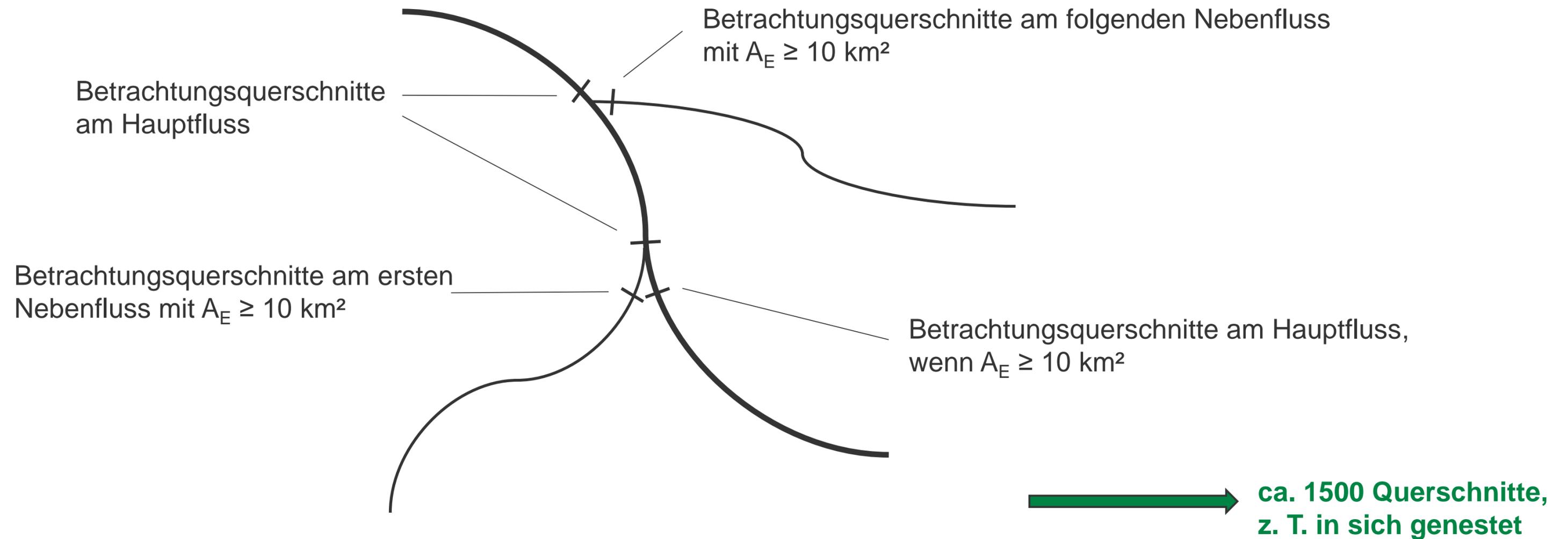
$H = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i)$ - **Erwartungswert des Informationsgehalts einer durch Merkmale x_i beschriebenen Zufallsgröße X**

$H(\hat{p}) = -\sum_{i=1}^n \hat{p}(x_i) \ln \hat{p}(x_i)$ - **Entropie der am besten angepassten Wahrscheinlichkeitsverteilung der Merkmale x_i**

- Die Maximum-Entropie ist als erwarteter Wert des Informationsgehaltes der Gebietskennwerte zu betrachten.
- Wertebereich zwischen 0 (identisch – alle Informationen zum Gebiet sind bekannt) und 1 (völlig unähnlich – vom Gebiet ist nichts bekannt)
- Schätzung der Wahrscheinlichkeit für die Nichtähnlichkeit der Gebietskennwerte eines unbeobachteten Gebiets im Vergleich zu einem beobachteten.

Teilgebietsauswahl

Gebietsauswahl entlang eines Gewässers in Abhängigkeit der zufließenden Gewässer mit Einzugsgebietsgrößen A_E von mindestens 10 km^2





Erfasste Gebiets- und Prozesskenngrößen (28)

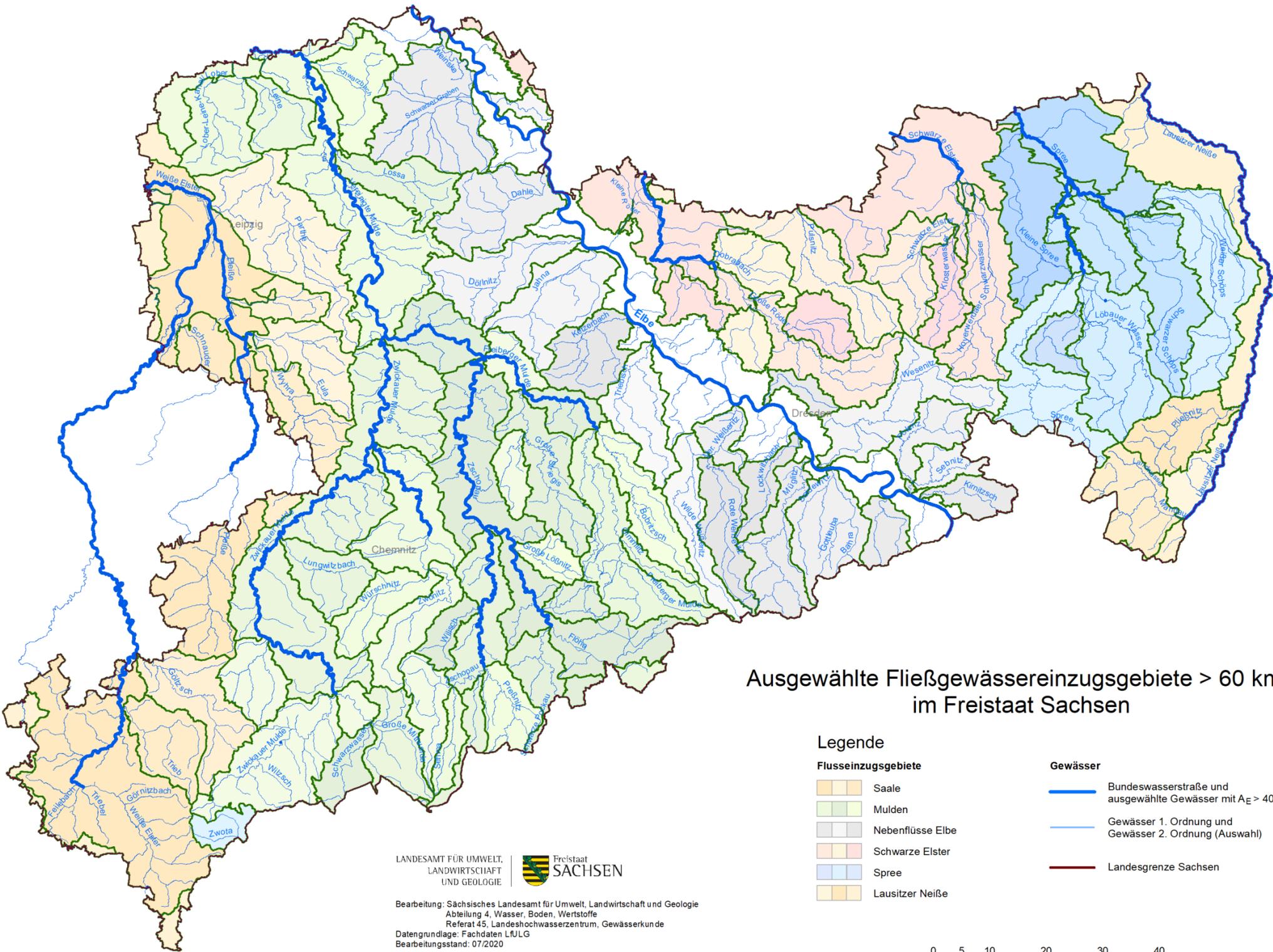
- **Zweijährige Arbeit von zwei Projektmitarbeiterinnen mit**
- **wesentlichen Synergien für die Arbeiten am digitalen Gewässernetz**

Korrelationsanalyse

- Selektion unabhängiger Gebiete (kein Gebiet darf Teil eines anderen sein)
- Bestimmung der unabhängigen Gebietskennwerte für die Gebiete sowohl makrogeochoren- als auch größenklassenbezogen, wobei sich nur auf Basis einer bestimmten Größenklasseneinteilung weitere Schlussfolgerungen ableiten lassen.
- Feststellung der Unabhängigkeit anhand betragsmäßiger Werte des Korrelationskoeffizienten $< 0,6$ als Kompromiss zwischen zu starker und zu lockerer Abhängigkeit (Abschwächung numerisch bedingter Scheinkorrelationen bei Verbleib einer akzeptablen Anzahl von Gebietskennwerten).

Größenklasse	Anzahl unabhängiger Gebiete (davon bepegelt)	Anzahl unabhängiger Gebietskennwerte
$10 \text{ km}^2 \leq A_E < 30 \text{ km}^2$	376 (28 $\hat{=}$ 7,4 %)	13
$30 \text{ km}^2 \leq A_E < 50 \text{ km}^2$	151 (37 $\hat{=}$ 24,5 %)	12
$50 \text{ km}^2 \leq A_E < 75 \text{ km}^2$	85 (20 $\hat{=}$ 23,5 %)	10
$75 \text{ km}^2 \leq A_E < 100 \text{ km}^2$	55 (14 $\hat{=}$ 25,5 %)	11
$100 \text{ km}^2 \leq A_E < 125 \text{ km}^2$	48 (11 $\hat{=}$ 22,9 %)	11
$125 \text{ km}^2 \leq A_E < 150 \text{ km}^2$	36 (8 $\hat{=}$ 22,2 %)	11
$150 \text{ km}^2 \leq A_E < 200 \text{ km}^2$	45 (23 $\hat{=}$ 51,1 %)	11
$200 \text{ km}^2 \leq A_E < 250 \text{ km}^2$	20 (6 $\hat{=}$ 30,0 %)	8
$250 \text{ km}^2 \leq A_E < 300 \text{ km}^2$	19 (4 $\hat{=}$ 21,0 %)	8
$300 \text{ km}^2 \leq A_E < 350 \text{ km}^2$	17 (8 $\hat{=}$ 47,1 %)	10
$350 \text{ km}^2 \leq A_E < 400 \text{ km}^2$	10 (5 $\hat{=}$ 50,0 %)	3
Summe	862 (164 $\hat{=}$ 19,0 %)	

Größenklasse	Anzahl unabhängiger Gebiete (davon bepegelt)	Anzahl unabhängiger Gebietskennwerte
$400 \text{ km}^2 \leq A_E < 500 \text{ km}^2$	7 (1 $\hat{=}$ 14,3 %)	1
$500 \text{ km}^2 \leq A_E < 600 \text{ km}^2$	7 (5 $\hat{=}$ 71,4 %)	0
$600 \text{ km}^2 \leq A_E < 700 \text{ km}^2$	7 (6 $\hat{=}$ 85,7 %)	2
$700 \text{ km}^2 \leq A_E < 800 \text{ km}^2$	6 (3 $\hat{=}$ 50,0 %)	0
$800 \text{ km}^2 \leq A_E < 900 \text{ km}^2$	3 (0 $\hat{=}$ 0,0 %)	0
$900 \text{ km}^2 \leq A_E < 1000 \text{ km}^2$	3 (2 $\hat{=}$ 66,7 %)	0
$1000 \text{ km}^2 \leq A_E < 2000 \text{ km}^2$	4 (4 $\hat{=}$ 100,0 %)	0
$2000 \text{ km}^2 \leq A_E < 5000 \text{ km}^2$	2 (2 $\hat{=}$ 100,0 %)	0
$A_E \geq 5000 \text{ km}^2$	1 (1 $\hat{=}$ 100,0 %)	0
Summe	40 (24 $\hat{=}$ 60,0 %)	



Ausgewählte Fließgewässereinzugsgebiete > 60 km²
im Freistaat Sachsen

Legende

Flusseinzugsgebiete

- Saale
- Mulden
- Nebenflüsse Elbe
- Schwarze Elster
- Spree
- Lausitzer Neiße

Gewässer

- Bundeswasserstraße und ausgewählte Gewässer mit $A_E > 400 \text{ km}^2$
- Gewässer 1. Ordnung und Gewässer 2. Ordnung (Auswahl)
- Landesgrenze Sachsen



Schlussfolgerungen aus der Korrelationsanalyse

- Regionalisierung mit statistischen Verfahren nur in Größenklassen bis 400 km² zulässig
- Lediglich Verwendung der Daten von Pegeln mit Einzugsgebieten bis 400 km² statthaft
- Jedoch geringer Anteil bepegelter Gebiete in diesen Größenklassen mit durchschnittlich 19 %
- Vergrößerung der Pegelanzahl erforderlich



**Suche nach der Ausdehnung des Gebietes,
für das ein Pegel repräsentativ ist**

Bestimmung der Maximum-Entropie

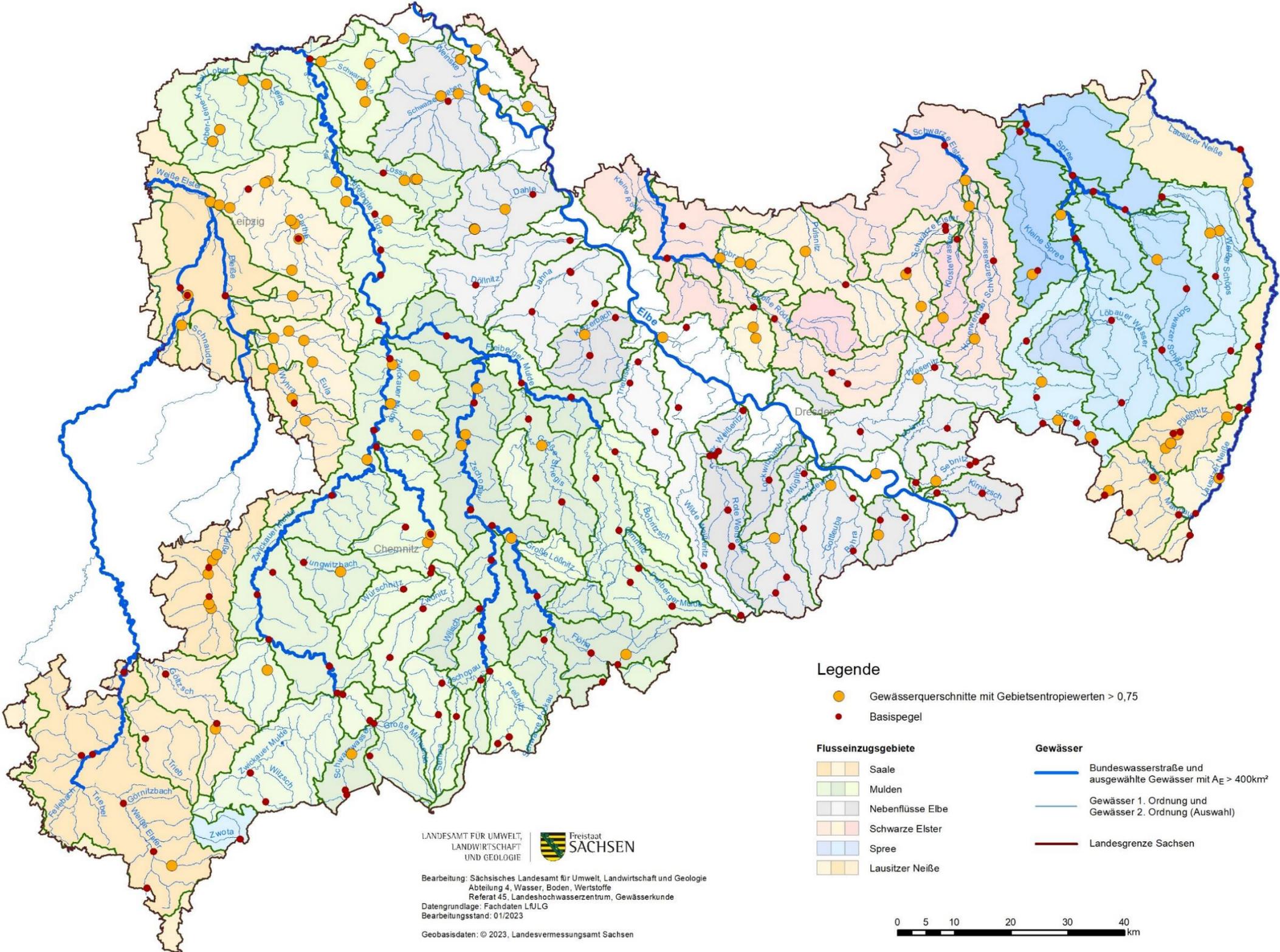
- Erwartungswert des Informationsgehaltes des Gebiets = Summe der gewichteten mittleren Informationsgehalte jedes unabhängigen Merkmals

$$H(\hat{p}) = - \sum_{i=1}^n \hat{p}(x_i) \ln \hat{p}(x_i) - \text{Entropie der am besten angepassten Wahrscheinlichkeitsverteilung der Merkmale } x_i$$

- Über alle m Gebiete einer Größenklasse werden die empirischen Wahrscheinlichkeiten für die Werte des jeweiligen Merkmals berechnet.
- Sind die Werte eines Merkmals über alle Gebiete gleichverteilt, gilt $p_i = \frac{1}{m}$.
- Je ungleicher die Verteilung eines Merkmals ist, um so mehr weicht p_i vom Wert $1/m$ ab, die Gebiete ähneln sich weniger.
- Hohe Entropiewerte weisen damit auf Gebiete mit unbekanntem Eigenschaften hin.
- Die Erklärungskraft ist abhängig von der Anzahl der betrachteten Gebiete.
- Näheres bei: Fischer, S., P. Bühler, U. Büttner & A. Schumann (2020): The use of maximum entropy to increase the informational content of hydrological networks by additional gauges, Hydrological Sciences Journal, DOI: [10.1080/02626667.2020.1802028](https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802028)

Ergebnisse der Entropiebestimmung

- In den Größenklassen unter 150 km² finden sich die meisten „unähnlichen“ Gebiete.
- 120 Gebiete mit Größen zwischen 10 und 207 km² weisen Entropiewerte >0,75 auf



Entwicklung des sächsischen Basispegelnetzes seit 2014

- Alle Fließgewässer überdeckende Suche nach möglichen zusätzlichen Pegelstandorten
- Ausstattung von 50 Standorten mit einfacher Messtechnik
- Mehrjähriger vollumfänglicher Betrieb zur Prüfung der Eignung
- Für 31 Standorte liegen Entscheidungen zum vollumfänglichen Ausbau vor.
- An 19 Standorten laufen noch die Untersuchungen.



Pegel St. Egidien/Lungwitzbach mit einfacher Messtechnik in Vorbereitung des zwischenzeitlich stattgefundenen Neubaus (Foto: BfUL)

Nach deren Abschluss ist davon auszugehen, dass es in Sachsen keinen Standort mehr gibt, der unter hydrologischen und hydraulischen Gesichtspunkten für den Betrieb eines Basispegels geeignet ist.



**Büttner, U., E. Wolf, S. Fischer, P. Bühler & A. Schumann (2023):
Die Konzeption von Pegelnetzen – Anthropogenes Erfordernis
versus Prozesskenntnis. – Wasserwirtschaft 113, H. 7-8, S. 26 - 30**

Fotos: BfUL