

Flächendifferenzierte Ermittlung der Grundwasserneubildung im Rheinischen Braunkohlenrevier

Abschlussbericht der AG Grundwasserneubildung

Bezirksregierung Düsseldorf
Bezirksregierung Köln
Erftverband
Forschungszentrum Jülich GmbH
Geologischer Dienst NRW
LANUV NRW
RWE Power AG

Juli 2012

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	3
ANLAGENVERZEICHNIS	4
1 EINLEITUNG	5
1.1 Bedeutung der Grundwasserneubildung	5
1.2 Veranlassung	6
2 BERECHNUNGSVERFAHREN	7
2.1 Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)	7
2.1.1 Beschreibung des Verfahrens	7
2.1.2 Klimatische Datengrundlagen	8
2.1.3 Gebietscharakteristische Datengrundlagen	9
2.2 Wasserhaushaltsmodell GROWA	12
2.2.1 Beschreibung des Verfahrens	12
2.2.2 Klimatische Datengrundlagen	14
2.2.3 Gebietscharakteristische Datengrundlagen	15
2.3 Programmsysteme KLIMA und GLADIS	15
2.3.1 Beschreibung des Verfahrens	15
2.3.2 Klimatische Datengrundlagen	17
2.3.3 Gebietscharakteristische Datengrundlagen	18
2.3.4 Besonderheiten der GLADIS-Simulationen für den Tätigkeitsbereich des Erftverbands	19
2.4 Weitere Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung	21
2.4.1 Allgemeine Wasserhaushaltsgleichung	21
2.4.2 Wasserwerksmethode	22
2.4.3 Weitere Verfahren	22
3 REGIONALE VERFAHRENSVERGLEICHE UND VALIDIERUNG	23
3.1 Ergebnisvergleich in hydrogeologischen Räumen	23
3.1.1 Schollenbezogener Vergleich	23
3.1.2 Vergleich unterschiedlicher Niederschlagsräume	26
3.2 Ergebnisvergleich in Einzugsgebieten / Wasserschutzgebieten	27
3.2.1 Gebietscharakteristiken	27
3.2.2 Ergebnisse	28

3.2.3	Bewertung	30
3.3	Validierung anhand von Abflussdaten	30
4	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	34
	LITERATURVERZEICHNIS	36
	ANLAGEN	

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Wasserhaushalt mit Abflusskomponenten (Quelle: KAMPF ET AL., 2007)
- Abbildung 2: Verfahrensablauf zur Ermittlung der Grundwasserneubildung, verändert nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
- Abbildung 3: Simulation der Sickerwasserrate auf Basis der Bodenkarte i. M. 1 : 50.000 (GD NRW) mit GLADIS 1961 bis 2000. Übersicht über das Untersuchungsgebiet (Erftverband) und der verwendeten Niederschlags- (kleine Punkte) und Klima-Stationen (große Punkte)
- Abbildung 4: Hydrogeologische Teilräume (Schollen) mit Tätigkeitsbereich des Erftverbands
- Abbildung 5: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die hydrogeologischen Teilräume, Zeitraum: 1961-2000
- Abbildung 6: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die Teilräume in der Erft- und Rurscholle, Zeitraum: 1961-2000
- Abbildung 7: Lage der betrachteten Wasserschutzgebiete von Wassergewinnungsanlagen im Untersuchungsraum
- Abbildung 8: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für ausgewählte Wasserschutzgebiete (WSG) von Wassergewinnungsanlagen, Zeitraum: 1961-2000
- Abbildung 9: Lage der für Validierungszwecke herangezogenen Abflusspegel mit den zugehörigen unbeeinflussten unterirdischen bzw. oberirdischen Einzugsgebieten (Zeitpunkt: 1955).
- Abbildung 10: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Grundwasserneubildung und simulierter bzw. gemessener Niedrigwasserabflusspende

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Gruppierung der Böden nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) unter Heranziehung der Bodenkundlichen Kartieranleitung, Quelle: Geologischer Dienst NRW (GD NRW)
- Tabelle 2: Konstanten für die Verdunstungsberechnung nach Renger & Wessolek (DVWK 1996)
- Tabelle 3: Gebietscharakteristische Datengrundlagen für die Modellierung und Validierung des Landschaftswasserhaushalts mit dem Modell GROWA
- Tabelle 4: Klimatische Datengrundlagen zur Sickerwasserberechnung (KLIMA/GLADIS)
- Tabelle 5: Gebietscharakteristische Datengrundlagen zur Sickerwasserberechnung (KLIMA/GLADIS)
- Tabelle 6: Ansatz der Sickerwasserrate für nicht berechenbare Nutzungskategorien (KLIMA/GLADIS)
- Tabelle 7: Gebietscharakteristiken der betrachteten Wasserschutzgebiete von Wassergewinnungsanlagen
- Tabelle 8: Kenndaten der betrachteten Abflusspegel mit Angabe der Kalibrierungs- und Simulationszeiträume (Wiener-Filter-Verfahren)

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Mitglieder der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung
- Anlage 2: Ermittlung des Jahresniederschlags im Tätigkeitsbereich des Erftverbands
- Anlage 3: Mittlere Jahresniederschlagshöhe im Tätigkeitsbereich des Erftverbands (1961 – 2000, unkorrigiert) und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden
- Anlage 4: Bodengruppen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) im Tätigkeitsbereich des Erftverbands und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden
- Anlage 5: Landnutzungsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) im Tätigkeitsbereich des Erftverbands und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden
- Anlage 6: Flurabstandsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) im Tätigkeitsbereich des Erftverbands und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden
- Anlage 7: Hangneigungsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) im Tätigkeitsbereich des Erftverbands und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden
- Anlage 8: Mittlere Jahresniederschlagshöhe nach KLIMA/GLADIS (GD NRW) im Tätigkeitsbereich des Erftverbands (1961 – 2000, unkorrigiert)
- Anlage 9: Generalisierte Realnutzung nach KLIMA/GLADIS (GD NRW) im Tätigkeitsbereich des Erftverbands
- Anlage 10: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die hydrogeologischen Teilräume und Niederschlagsräume
- Anlage 11: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [$l/(s \cdot km^2)$] für den Betrachtungsraum nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990), Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: EV+1%
- Anlage 12: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [$l/(s \cdot km^2)$] für den Betrachtungsraum nach GROWA, Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: DWD
- Anlage 13: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [$l/(s \cdot km^2)$] für den Betrachtungsraum nach GROWA, Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: EV+6%, BFI2006
- Anlage 14: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [$l/(s \cdot km^2)$] für den Betrachtungsraum nach KLIMA/GLADIS, Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: GD_N+4%

1 Einleitung

1.1 Bedeutung der Grundwasserneubildung

Von zentraler Bedeutung für die Erschließung und Nutzung von Grundwasservorkommen ist die Ermittlung des verfügbaren Grundwasserdargebotes innerhalb eines Einzugsgebietes. Hierzu ist eine quantitative Beschreibung des Wasserhaushaltes (Bilanzierung) erforderlich. Für ein geschlossenes Einzugsgebiet lässt sich folgende Wasserbilanzgleichung aufstellen.

$$N - A - V \pm \Delta S = 0$$

mit

N	=	Niederschlag	[mm/a]
A	=	Gesamtabfluss aus dem Einzugsgebiet	[mm/a]
V	=	reale Verdunstung	[mm/a]
ΔS	=	Speicheränderung	[mm/a]

Bei langjährigen Betrachtungen kann die Speicheränderung ΔS vernachlässigt werden.

Der Gesamtabfluss A lässt sich in die Abflussanteile Direktabfluss (A_o , Oberflächenabfluss + Zwischenabfluss) und unterirdischer Abfluss (A_u) aufteilen (Abbildung 1). Im langjährigen Mittel entspricht die Höhe des unterirdischen Abflusses (A_u) eines Einzugsgebietes der Grundwasserneubildung (GWN).

$$GWN = N - V - A_o$$

mit

GWN	=	Grundwasserneubildung	[mm/a]
N	=	Niederschlag	[mm/a]
V	=	reale Verdunstung	[mm/a]
A_o	=	Direktabfluss	[mm/a]

Nach der DIN 4049-3 wird unter dem Prozess der Grundwasserneubildung der „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ verstanden. Die Grundwasserneubildung bildet zwar eine relativ kleine Komponente im gesamten Wasserhaushalt (Restglied der Wasserbilanz), sie ist jedoch die entscheidende Bilanzgröße für Fragen der Nutzung und Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen. So werden belastbare Angaben zur Grundwasserneubildung benötigt, um wasserwirtschaftliche Eingriffe in den Grundwasserhaushalt beurteilen zu können.

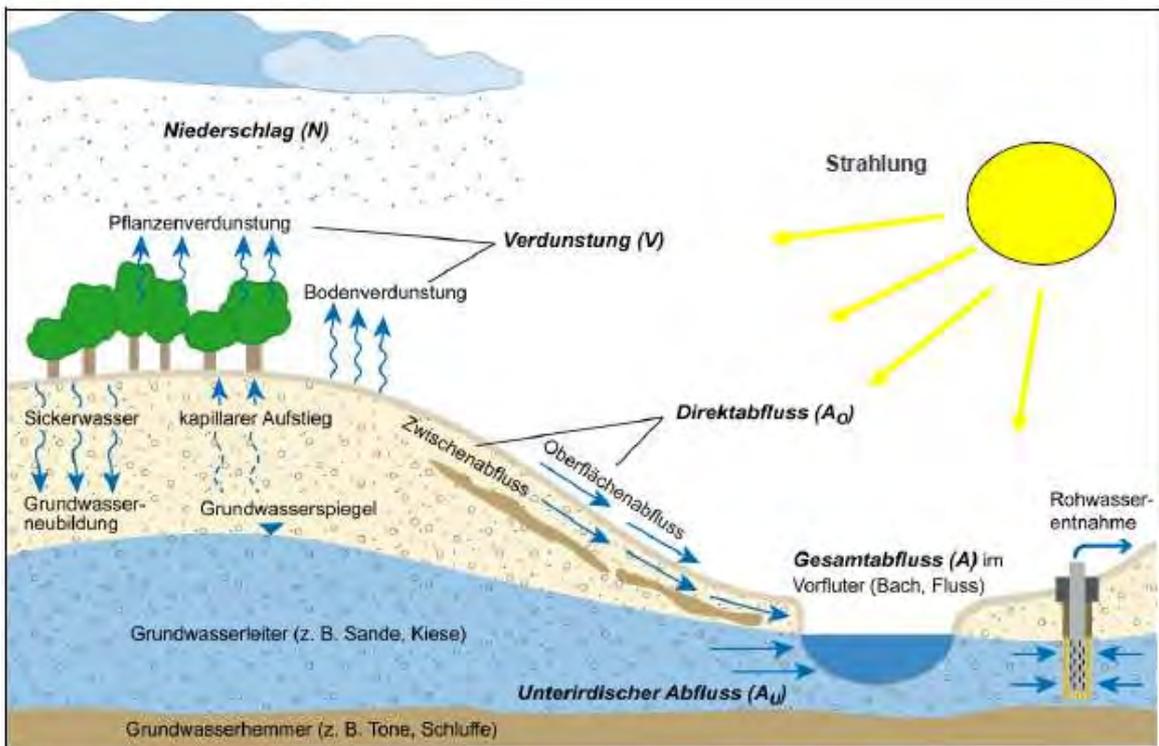


Abbildung 1: Wasserhaushalt mit Abflusskomponenten (Quelle: KAMPF ET AL., 2007)

1.2 Veranlassung

Im Rheinischen Braunkohlenrevier werden für eine Vielzahl wasserwirtschaftlicher Fragestellungen flächenhafte und zum Teil auch zeitabhängige Angaben zur Grundwasserneubildung benötigt. Für Bilanzierungen des verfügbaren Grundwasserdargebotes sind dabei Angaben zur langjährigen, mittleren Grundwasserneubildung von Bedeutung. Für hydrogeologische Betrachtungen höherer zeitlicher Auflösung (z. B. instationäre Grundwassermodellierung) ist zudem die Kenntnis der zeitlichen Veränderung der Grundwasserneubildung erforderlich.

Bislang kommen eine Vielzahl von Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung im Rheinischen Braunkohlenrevier zur Anwendung, die auf unterschiedliche Eingangsdaten zurückgreifen und zum Teil erhebliche Unterschiede in den Berechnungsergebnissen zeigen. Konkrete Empfehlungen zur Verwendung bestimmter Berechnungsansätze existieren nicht.

Im Jahr 2009 wurde daher im Rahmen der Jahresbesprechung „Beobachtung der großräumigen Grundwasserabsenkung im Rheinischen Braunkohlenrevier“ die Einrichtung einer Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung beschlossen. In dieser haben Vertreter des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW), des Geologischen Dienstes NRW (GD NRW), der Bezirksregierungen Köln und Düsseldorf, des Forschungszentrums Jülich (IBG-3: Agrosphäre) sowie der RWE Power AG unter Federführung des Erftverbands mitgewirkt. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung sind in Anlage 1 aufgeführt. In den Jahren 2009 bis 2012 fanden insgesamt sieben Arbeitsgruppensitzungen statt.

Aufgabe der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung war es, die methodischen Ansätze und die Datengrundlagen der bislang überwiegend eingesetzten Verfahren gegenüberzustellen, Berechnungsergebnisse zu vergleichen und zu validieren sowie Empfehlungen für die Verwendung von Ansätzen auszusprechen.

2 Berechnungsverfahren

Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung kommen in Abhängigkeit des erforderlichen Betrachtungsmaßstabs, der Fragestellung sowie der erforderlichen und verfügbaren Datengrundlagen verschiedene Verfahrensansätze in Frage. Nach NEUMANN (2009) wird im Wesentlichen zwischen zwei unterschiedlichen Modellkategorien unterschieden:

Flächendifferenzierte Berechnungsansätze ermöglichen auf der Grundlage der maßgeblichen Inputgröße Niederschlag, der Gebietsparameter Bodeneigenschaften, Relief, Landnutzung und deren empirischen Beziehungen die Bestimmung des Bilanzrestgliedes Grundwasserneubildung. Zum Teil werden die empirischen Ansätze mit vereinfachten physikalisch begründeten Ansätzen kombiniert (konzeptionelle Modelle).

Einzugsgebietsbezogene Verfahren, wie die Anwendung von Wasserhaushalts- oder Flussgebietsmodellen, zielen auf die bestmögliche Beschreibung der integrativen Modellkomponente Gesamtabfluss eines Einzugsgebietes ab und liefern Abschätzungen der Grundwasserneubildung. Derartige System-beschreibende Einzugsgebietsmodelle sind in der Regel physikalisch basiert. Separationsverfahren erlauben durch die Abtrennung grundwasserbürtiger Abflussanteile von Abflussganglinien eine integrale Ermittlung der mittleren Grundwasserneubildung eines Einzugsgebietes (Gebietsmittelwerte)

Nachfolgend werden die drei im Rheinischen Braunkohlenrevier vielfach verwendeten flächendifferenzierte Verfahrensansätze nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990), GROWA (KUNKEL & WENDLAND 2002) und KLIMA/GLADIS (SCHREY 1993) vorgestellt, die ausgehend von der Eingangsgröße Niederschlag und der Berechnung flächendifferenzierter Verdunstungshöhen räumliche Angaben zum Gesamtabfluss liefern. Über die Trennung von oberirdischen und unterirdischen Abflusskomponenten erhält man Flächendaten zur Grundwasserneubildung.

Das Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) als einfacher, empirischer Berechnungsansatz wurde bereits in den 1990er Jahren vom LANUV NRW sowie vom Erftverband für die Berechnung der Grundwasserneubildung im Rahmen der Erstellung großräumiger Grundwassermodelle im Rheinischen Braunkohlenrevier eingesetzt. Die Programmsysteme KLIMA und GLADIS wurden vom GD NRW entwickelt und werden für die Simulation der mittleren jährlichen Sickerwasserrate aus der durchwurzelten Bodenzone eingesetzt. Das vom Forschungszentrum Jülich entwickelte Wasserhaushaltsmodell GROWA wird für die Berechnung der Grundwasserneubildung u. a. in mehreren Bundesländern eingesetzt.

2.1 Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)

2.1.1 Beschreibung des Verfahrens

Das Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) zur Ermittlung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung geht auf die Methode von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) zurück, bei der die Grundwasserneubildung als Differenz zwischen Niederschlag, Verdunstungs- und Direktabflussanteilen bestimmt wird. Im Unterschied zu DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) wird mit fünf Bodengruppen und sechs Landnutzungsklassen gearbeitet. Für die Bestimmung des Direktabflussanteils wird neben der Reliefenergie auch die Flurabstandsklasse sowie die Landnutzung einbezogen.

Im Reviermodell der RWE POWER AG (2007) beruht die Eingangsgröße Grundwasserneubildung ebenfalls auf der Modifikation des DÖRHÖFER & JOSOPAIT-Ansatzes durch SCHRÖDER & WYRWICH (1990). Der Bearbeitungsstand stammt aus den 1990er Jahren. Die Berücksichti-

gung der Grundwasserneubildung in dem gekoppelten Grundwassermodell Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle des LANUV NRW (KÖNGETER ET AL., 2007) geht ebenfalls auf den Berechnungsansatz von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) zurück, weist jedoch in den einzelnen Teilräumen einen unterschiedlichen Bearbeitungsstand und Detaillierungsgrad auf. Zur aktualisierten Ermittlung der Grundwasserneubildung nach dem Ansatz von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) beim Erftverband erfolgte eine GIS-gestützte Verschneidung von Teilflächen der flächendifferenzierten Ausgangsdaten Bodengruppe (fünf Gruppen), Landnutzungs-kategorie (sechs Klassen), Niederschlagshöhe bzw. -klasse, Hangneigungskategorie (vier Stufen) und Grundwasserflurabstand (zwei Klassen). Allen Teilflächen wurde in Abhängigkeit der Bodengruppe und der Landnutzungs-kategorie eine von neun Verdunstungsstufen (ET-Stufen) zugewiesen.

Aus der Differenzbildung zwischen der mittleren Niederschlagshöhe der Teilflächen und der Verdunstungshöhe wird die Gesamtabflusshöhe errechnet. Anhand der zugewiesenen Hangneigungskategorie bzw. A/A_u -Stufe¹ kann der Direktabflussanteil abgetrennt werden. Im Ergebnis errechnet sich die mittlere Grundwasserneubildung, die für bebaute Flächen noch eine Verminderung erfährt (siehe Abbildung 2).

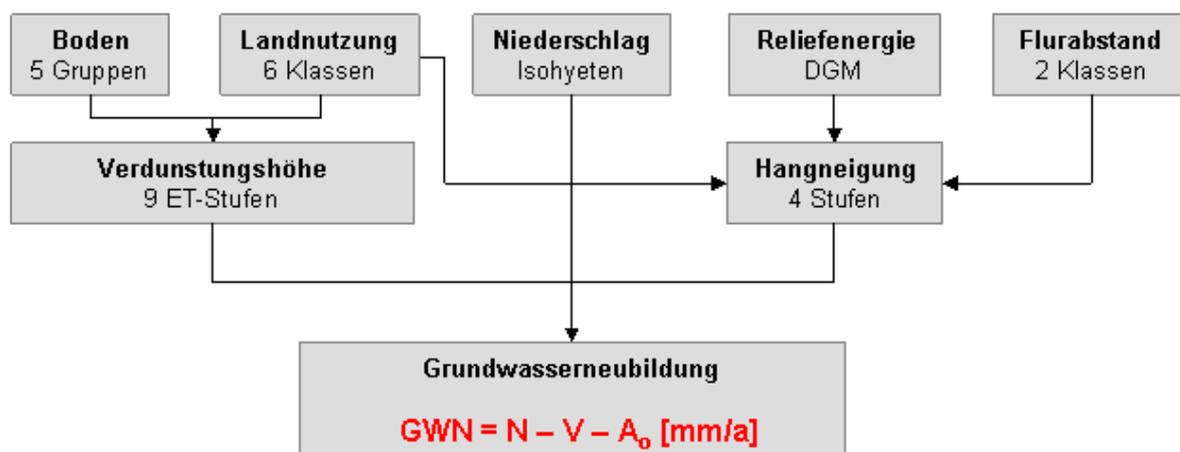


Abbildung 2: Verfahrensablauf zur Ermittlung der Grundwasserneubildung, verändert nach Schröder & Wyrwich (1990)

2.1.2 Klimatische Datengrundlagen

Für die Anwendung des Ansatzes von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung sind flächenbezogene Angaben zu den Kenngrößen Niederschlag und Verdunstung erforderlich.

¹ A: Gesamtabfluss [mm/a], A_u : unterirdischer Abfluss [mm/a]

Niederschlag

Für die Anwendung des Verfahrens von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) können Jahressummen der Niederschläge verwendet werden. Es empfiehlt sich die Verwendung langjähriger Niederschlagshöhen mit ihrer regionalen Differenzierung.

Der Erftverband hat im Jahr 2011 eine umfangreiche Auswertung gemessener Jahresniederschläge einer großen Zahl von Niederschlagsstationen durchgeführt und auf der Grundlage zweier Regionalisierungsverfahren eine Neuberechnung des langjährigen Niederschlagsmittels für den Zeitraum 1961-2000 vorgenommen (siehe Anlage 2).

Die mit Hilfe einer distanzgewichteten Interpolation (Inverse Distance, IDW) berechnete mittlere Niederschlagshöhe (Anlagen 2 und 3) wurde nach Berücksichtigung eines Korrekturfaktors für die Berechnungen der Grundwasserneubildung nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) herangezogen. Es wurde eine geringfügige Korrektur der mittleren Niederschlagshöhen um 1 % vorgenommen. Der Anpassungsfaktor wurde aus den Ergebnissen der Validierung der Grundwasserneubildungsberechnungen anhand von Erfahrungswerten in hydrogeologischen Teilräumen sowie anhand von Basisabflussdaten ausgewählter Gewässereinzugsgebiete vorgenommen (vgl. Kapitel 3). Im Rahmen der dargestellten Vergleiche sind die Ergebnisse mit SCHRÖDER & WYRWICH (EV+1%) gekennzeichnet.

Die Einbeziehung von niederländischen Niederschlagsstationsdaten erlaubte eine Ausdehnung der Niederschlagsregionalisierung des Erftverbands bis zur Maas. Anlage 3 zeigt die unkorrigierten mittleren Jahresniederschlagssummen für den gesamten Betrachtungsraum für die Periode 1961-2000. Hiernach treten im Bereich zwischen Zülpich und Euskirchen in den Leelagen der Eifel die geringsten Niederschläge auf, während die Niederschlagssummen in Richtung Norden und Nordwesten durch den stärkeren maritimen Einfluss sowie im Bereich der Eifelhöhen und zum Kölner Raum deutlich ansteigen. Die mittlere Jahresniederschlagssumme für den gesamten Betrachtungsraum beträgt ca. 690 mm bezogen auf den Zeitraum 1961-2000.

Verdunstung

Die Verlustgröße Verdunstung (Evapotranspiration) wird nach dem Ansatz von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) ausgehend von Pegel- und Lysimeterauswertungen als weitgehend unabhängig von der Niederschlagshöhe angesetzt. Für verschiedene Kombinationen aus Bodenarten und Nutzungstypen werden daher feste Verdunstungshöhen herangezogen. Es wird zwischen neun verschiedenen Verdunstungsstufen unterschieden.

2.1.3 Gebietscharakteristische Datengrundlagen

Bodenart/Bodengruppe

Ursprünglich basiert die Verwendung des DÖRHÖFER & JOSOPAIT-Ansatzes auf der Bodenkundlichen Standortkarte (M 1:200.000) und einer Differenzierung in vier Bodengruppen. Das Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) unterscheidet zwischen insgesamt fünf Bodengruppen und greift auf die digitale Bodenkarte BK 50 (M 1:50.000) zurück. Die Gruppierung der Böden wird anhand der Größen Grundwasseranschluss, Staunäseeinfluss, Wasserspeicherkapazität (nFK) und dominierender Bodenart in der obersten Bodenschicht vorgenommen (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Gruppierung der Böden nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) unter Heranziehung der Bodenkundlichen Kartieranleitung, Quelle: Geologischer Dienst NRW (GD NRW)

BdGrW	Beschreibung	ET _A	ET _L	ET _M	ET _N	Ausweiskriterien
		in mm/a	in mm/a	in mm/a	in mm/a	
1	leichte Sandböden mit sehr geringen bis geringer nFK und ohne Grundwasser; sehr flachgründige skelettreiche Böden	350	450	510	570	GWstufe = 0 UND nFKWe <= 90 ODER BdAGr = 1
2	lehmige Sandböden und sandige Lehm Böden mit geringer bis mittlerer nFK	400	500	560	620	BdAGr = 7 ODER 8 UND nFKWe > 90 und <= 200
3	Lehmböden und Tonböden mit mittlerer bis hoher nFK	450	550	620	670	BdAGr >= 2 UND <= 6 UND nFKWe > 90 und <= 200
4	Tiefgründige Lößböden mit hoher nFK; Lehm Böden mit mittlerer Staunässe oder gelegentlichem Grundwassereinfluss	500	600	660	720	nFKWe > 200 ODER BdAGr >= 3 UND <= 6 UND GWstufe = 3 ODER 4
5	Böden mit Grundwasseranschluss oder starker Staunässe	550	650	700	750	GWstufe = 1 ODER 2 ODER SWstufe = 4 ODER 5

Hinsichtlich der Fehlflächen innerhalb der digitalen Bodenkarte 1:50.000 wurde folgende Vorgehensweise gewählt: Rekultivierte Tagebauflächen wurden der Bodengruppe 2 zugeordnet (lehmige Sandböden, sandige Lehm Böden mit geringer bis mittlerer nFK). Weitere Fehlflächen (Seen, Abgrabungen etc.) wurden entsprechend der angrenzenden Bodeneinheiten manuell einer Bodengruppe zugeordnet.

Für die aktiven Tagebauflächen (Stand: 2010, Datenquelle: RWE Power AG) wurden die kartierten Bodeneinheiten der BK 50 nicht berücksichtigt. Die Tagebauflächen wurden gesondert mit der Bodengruppe 2 belegt.

Für den niederländischen Teil des Untersuchungsraumes wurde auf folgende Bodenkarten zurückgegriffen:

1. BK50-Kartenblatt L 4902 mit Abdeckung niederländischer Flächen sowie
2. Niederländische Bodenkarte (Gebiet Provincie Limburg, M 1:50.000).

Für die durch das Kartenblatt L 4902 abgedeckten Flächen auf niederländischem Staatsgebiet wurde eine Zuordnung der Bodengruppen nach Tabelle 1 vorgenommen. Für die verbliebenen Flächen wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Anhand einer Dokumentation der niederländischen Bodensystematik (DE VRIES ET AL., 2003) konnten die Bodeneinheiten der niederländischen Bodenkarte „Bodentypen“ und Bodenbeschreibungen zugewiesen werden. Ergänzend lieferte die Internetanwendung <http://www.bodemdata.nl/> (Alterra, Wageningen) englischsprachige Informationen zu den Bodeneinheiten. Unter Heranziehung der Bodenbeschreibung (*Beschrijving*, Description), der Bodenart (*Grondsoort*, Soil type), Angaben zum Bodenaufbau (*Bodemopbouw*, Global soil profile) sowie Angaben zur Grundwasserbeeinflussung (*Grondwatertrap*², Groundwater cl.) konnte eine Zuordnung der Teilflächen zu den Bodengruppen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) vorgenommen werden. Im Anschluss mussten teilweise manuelle Nachbearbeitungen der zugewiesenen Bodengruppen vorgenommen werden, um Sprünge an den

² *Grondwatertrap I-II* \triangleq Grundwasserstufen 1 und 2 \triangleq Bodengruppe 5 nach Tabelle 1;

Grondwatertrap IIb-VI \triangleq Grundwasserstufen 3 und 4 \triangleq Bodengruppe 4 nach Tabelle 1; vgl. DE VRIES ET AL., 2003, S. 14, Tabelle 1; zu Grundwasserstufen vgl. Bodenkundliche Kartieranleitung

Blatträndern zu vermeiden.

Anlage 4 zeigt die räumliche Differenzierung der Bodengruppen im Tätigkeitsbereich des Erftverbands und dem angrenzenden niederländischen Teilraum.

Landnutzung

Hinsichtlich der Berücksichtigung der Landnutzung wird für den verwendeten Berechnungsansatz nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) zwischen folgenden vier Hauptnutzungsarten unterschieden: Bebaute Flächen, Waldflächen, Wasserflächen, Acker bzw. Grünland. Brach- und Freiflächen werden ebenfalls der Klasse Acker/Grünland zugeordnet. Bebaute Flächen werden mit einer Versickerungsrate von 50 % der berechneten Grundwasserneubildung verknüpft. Waldflächen werden in die Unterklassen Laub-, Nadel- und Mischwald unterteilt. Insgesamt ergeben sich somit sechs Landnutzungsklassen.

Im Rahmen der Berechnungen der Grundwasserneubildung beim Erftverband wurde auf die CORINE Landcover 2000 (CLC2000) Datenbestände der Landnutzung zurückgegriffen. Die aktiven Tagebauflächen (Stand: 2010) wurden gesondert im Landnutzungsdatensatz hinterlegt. Auch für den niederländischen Teil des Betrachtungsraums wurden CORINE Landcover 2000 Daten herangezogen. Die klassifizierte Landnutzung nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) für das gesamte Betrachtungsgebiet ist in Anlage 5 dargestellt. Im Untersuchungsraum dominiert dabei die Acker- und Grünlandnutzung. Im Bereich der Eifel sowie im Nordwesten der Venloer Scholle nehmen die Waldanteile deutlich zu.

Grundwasserflurabstand

Zur Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs von Grundwasser wird die Gruppe der grundwassernahen Böden (Grundwasserflurabstand < 1,2 m) gesondert betrachtet. Diese wurde aus berechneten Grundwasserflurabständen des Erftverband für den Zeitpunkt 10/2008 abgeleitet. Für den Teilraum in den Niederlanden lagen keine Grundwasserflurabstandskarten vor. Hier wurde mit Hilfe des Reviermodells (RWE POWER AG, 2007) unter Zugrundelegung eines Jahresfaktors der Grundwasserneubildung von 100 % eine Modellrechnung für das Jahr 2000 durchgeführt. Für die auf der Grundlage des berücksichtigten Geländemodells berechneten Grundwasserflurabstände wurden in gleicher Weise die grundwassernahen Böden (< 1,2 m) abgegrenzt. Anlage 6 zeigt die Klassifizierung der Grundwasserflurabstände für das Berechnungsverfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) innerhalb des Betrachtungsraums. Deutlich erkennbar sind die flurnahen Bereiche in den Niederungen der Gewässer, sofern keine sumpfbedingten Grundwasserabsenkungen vorliegen.

Relief

Zur Berechnung von Direktabflussanteilen wird die Reliefenergie (Hangneigung) der Teilflächen abgestuft berechnet. Dabei wird zwischen vier Hangneigungsklassen unterschieden (<3 °, 3-10 °, 10-30 °, >30 ° Hangneigung). Als Datengrundlage dienten innerhalb des deutschen Bearbeitungsgebietes die beim Erftverband vorliegenden digitalen Höhendaten.

Für den niederländischen Teilraum wurden SRTM³-Höhendaten verwendet und GIS-basiert

³ SRTM = Shuttle Radar Topography Mission, Stand: 2000

Hangneigungsstufen berechnet. Anlage 7 zeigt die räumliche Differenzierung der vier Hangneigungsstufen innerhalb des Betrachtungsraumes. Die größten Hangneigungen treten im Bereich der Eifel sowie an den Böschungsbereichen der aktiven Tagebaufelder auf.

2.2 Wasserhaushaltsmodell GROWA

2.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Das Wasserhaushaltsmodell GROWA (KUNKEL & WENDLAND, 2002) ist ein empirisches Verfahren, mit dem verschiedene Wasserhaushaltskomponenten flächendifferenziert berechnet werden können: reale Verdunstung, Gesamtabfluss, Direktabfluss (Oberflächenabfluss, natürlicher Zwischenabfluss (Interflow), Abfluss aus Dränagen) und Grundwasserneubildung. Die Berechnung der realen Verdunstungshöhe basiert auf der Beziehung von Renger & Wessolek (DVWK 1996), die aus umfangreichen Feldversuchen zur Ermittlung der realen Verdunstung für verschiedene Landnutzungsarten (Ackerland, Grünland, Laubwald, Nadelwald) abgeleitet wurde. Der Gültigkeitsbereich der von Renger & Wessolek angegebenen Beziehung ist auf ebene, grundwasserferne und unversiegelte Standorte beschränkt.

Um eine flächendeckende Berechnung der Gesamtabflusshöhen zu gewährleisten, wurden von KUNKEL & WENDLAND (2002), BOGENA ET AL. (2003) und TETZLAFF ET AL. (2004) Erweiterungen der Methodik im Hinblick auf die Berücksichtigung von Relief, Grundwassereinfluss, Versiegelung und Geologie vorgenommen.

$$Q_{ges} = N_j - ET_{real}$$

$$= N_j - f_h \cdot [a \cdot N_{So} + b \cdot N_{Wi} + c \cdot \log(W_{pfl}) + d \cdot ET_{pot} + e + f \cdot VS]$$

mit

ET _{real}	=	mittlere jährliche Höhe der realen Verdunstung	[mm/a]
f _h	=	topographischer Korrekturfaktor	
N _j	=	Jahresniederschlagshöhe	[mm/a]
N _{So}	=	Niederschlag im hydrologischen Sommerhalbjahr	[mm/a]
N _{Wi}	=	Niederschlag im hydrologischen Winterhalbjahr	[mm/a]
W _{pfl}	=	pflanzenverfügbare Bodenwassermenge	[mm]
ET _{pot}	=	mittlere jährliche potenzielle Verdunstung	[mm/a]
VS	=	Versiegelungsgrad	[%]
a, ..., f	=	bodenbedeckungsabhängige Koeffizienten	

Tabelle 2: Konstanten für die Verdunstungsberechnung nach Renger & Wessolek (DVWK 1996)

Landnutzung	a	b	c	d	e
Ackerland	0,39	0,08	153	0,12	-109
Grünland	0,48	0,10	286	0,10	-330
Nadelwald	0,33	0,29	166	0,19	-127
Laubwald	0,047	0,047	0	0,02	430,1

Den Definitionen nach DIN 4049 folgend wird der Gesamtabfluss im GROWA-Modell in die vier Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Dränabfluss, (natürlicher) Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung aufgeteilt.

$$Q_{ges} = Q_o + Q_d + Q_z + Q_{gw}$$

mit

Q_{ges}	=	mittlerer jährlicher Gesamtabfluss	[mm/a]
Q_o	=	mittlerer jährlicher Oberflächenabfluss	[mm/a]
Q_d	=	mittlerer jährlicher Dränabfluss	[mm/a]
Q_z	=	mittlerer jährlicher Zwischenabfluss	[mm/a]
Q_{gw}	=	mittlere jährliche Grundwasserneubildung, GWN	[mm/a]

Diese Abflusskomponenten werden durch zeitlich konstante Abflussanteile beschrieben, die jeweils von verschiedenen Standortkenngrößen abhängig sind.

Zur Ermittlung der Zusickerungsraten zum Grundwasser (Grundwasserneubildungshöhe) wird im GROWA-Modell eine Abflusseparation auf der Grundlage statischer Basisabflussanteile durchgeführt. Hierbei wird die Basisabflusshöhe im langjährigen Mittel als konstanter, von bestimmten Flächeneigenschaften abhängiger Anteil an der Gesamtabflusshöhe beschrieben (BFI = Basisabflussanteil). Es wurde ein hierarchischer Ansatz verwendet, bei dem jeweils nur eine Gebietskenngröße als bestimmend für den Basisabflussanteil angesehen wird. Jeder Eigenschaft wird dabei ein charakteristischer BFI-Wert zugeordnet.

$$Q_{gw} = BFI \cdot Q_{ges}$$

mit

Q_{gw}	=	mittlere jährliche Grundwasserneubildung, GWN	[mm/a]
BFI	=	Basisabflussanteil	[]
Q_{ges}	=	mittlerer jährlicher Gesamtabfluss	[mm/a]

Die Basisabflussanteile wurden anhand gemessener Abflusswerte für die betrachtete Zeitreihe einzugsgebietsbezogen kalibriert. Hierzu wurde die Summe der BFI-Werte jedes Standortparameters eines Einzugsgebietes, gewichtet mit dem jeweiligen Flächenanteil, mit den beobachteten BFI-Werten verglichen. Die BFI-Werte der Standortmerkmale wurden in einem nächsten Schritt so variiert, dass die Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen einzugsgebietsbezogenen Werten für alle betrachteten Einzugsgebiete optimal war. Das bestimmende Maß hierfür war das Minimum der kleinsten Fehlerquadrate (Maximum Likelihood). Zur Abtrennung der Grundwasserneubildung aus den gemessenen Pegelwerten wurde in Lockergesteinsregionen das Verfahren nach WUNDT (1958) und in Festgesteinsgebieten das Verfahren nach KILLE (1970) angewandt. Als Ergebnis der Kalibrierung ergab sich ein Satz von BFI-Werten, der für die Gesamtheit der betrachteten Einzugsgebiete in ganz Nordrhein-Westfalen zu einer optimalen Anpassung führt.

Das Modell GROWA wurde zuletzt im Rahmen eines vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

beauftragten Forschungsprojektes zur räumlich differenzierten Quantifizierung von N- und P-Einträgen in Grundwasser und Oberflächengewässer in NRW im Jahr 2010 aktualisiert (WENDLAND ET AL., 2010). Die Kalibrierung der BFI-Werte und Validierung der Modellergebnisse erfolgte dabei anhand langjährig gemessener Abflüsse aus 68 geeigneten Einzugsgebieten in Nordrhein-Westfalen. Die Ergebnisse auf Basis dieses Satzes BFI-Werte sind im Rahmen der im Kapitel 3 dokumentierten Vergleiche mit GROWA (DWD) gekennzeichnet.

Für die Simulation des Wasserhaushalts im Tätigkeitsbereich des Erftverbandes existiert ein an die Gegebenheiten in der Region besser angepasster Satz BFI-Werte (HERRMANN ET AL., 2009). Dieser wurde im Rahmen der hier durchgeführten Rechnung ebenfalls verwendet. Die Ergebnisse sind mit GROWA (EV+6%, BFI2006) gekennzeichnet.

2.2.2 Klimatische Datengrundlagen

Im Rahmen der Studie zur Quantifizierung der N- und P-Einträge in die Gewässer in Nordrhein-Westfalen haben WENDLAND ET AL. (2010) landesweit Wasserhaushaltsberechnungen auf Basis von Klimadatenrastern des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Es handelte sich um folgende digitale reguläre 1-km-Raster für die hydrologische Periode 1961-1990:

- Mittlere Niederschlagshöhe im hydrologischen Sommerhalbjahr,
- Mittlere Niederschlagshöhe im hydrologischen Winterhalbjahr und
- Mittlere jährliche potenzielle Verdunstungshöhe (Gras-Referenzverdunstung) auf Basis des Berechnungsverfahrens von WENDLING (1995).

Der DWD erstellte die Klimaraster nach dem Verfahren von MÜLLER-WESTERMEIER (1995) unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit von Niederschlag und potentieller Verdunstung. Die 1-km-Raster wurden von WENDLAND ET AL. (2010) auf eine Rasterweite von 100 m disaggregiert. Im Rahmen der Validierung des mit GROWA auf Basis der DWD-Klimaraster modellierten Gesamtabflusses und der daraus abgeleiteten Grundwasserneubildung konnte eine gute Übereinstimmung mit dem beobachteten Abflussgeschehen festgestellt werden. Die Ergebnisse aus dieser Studie sind im Rahmen der im Kapitel 3 dokumentierten Vergleiche mit GROWA (DWD) gekennzeichnet.

Mit dem Wasserhaushaltsmodell GROWA wurden mehrere Testrechnungen durchgeführt, bei denen im Vergleich zur Studie von WENDLAND ET AL. (2010) lediglich der Modellinput Niederschlag variiert wurde. Dabei kamen die Niederschlagsraster der vom Erftverband durchgeführten Regionalisierung zum Einsatz (siehe Kapitel 2.1.2). Diese weisen im Vergleich zu den Niederschlagsrastern des DWD tendenziell geringere mittlere Gebietsniederschläge auf, welche durch die verschiedenen Regionalisierungsmethoden, das dichtere Stationsnetz des Erftverbands sowie die verschiedenen abgebildeten hydrologischen Perioden gut begründet werden können (s. Anlage 2). Für die Simulation des Wasserhaushalts mit GROWA wurde eine Korrektur dieser Niederschlagsraster für die Berechnung des Gesamtabflusses und der Grundwasserneubildung durchgeführt. Eine Erhöhung der vom Erftverband regionalisierten Gebietsniederschläge um 6 % führte zu einer deutlichen Annäherung der modellierten Grundwasserneubildung an die zum Vergleich stehenden Werte (siehe Kapitel 3.1 und 3.2). Im Rahmen der dokumentierten Vergleiche sind diese Ergebnisse mit GROWA (EV+6%, BFI2006) gekennzeichnet.

2.2.3 Gebietscharakteristische Datengrundlagen

In Tabelle 3 sind die für die Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes mit dem Modell GROWA in Nordrhein-Westfalen verwendeten gebietscharakteristischen Datengrundlagen zusammenfassend dargestellt. Die Herkunft, Erfassungsmethodik und Genauigkeit der verwendeten Eingabedatensätze werden detailliert von WENDLAND ET AL. (2010) behandelt.

Tabelle 3: Gebietscharakteristische Datengrundlagen für die Modellierung und Validierung des Landschaftswasserhaushalts mit dem Modell GROWA

Themengebiet	Datengrundlage	Datentyp	Quelle
Grunddaten	Verwaltungsgrenzen	Vektor	DLM25 (Landesvermessungsamt NRW)
Hydrographie	Fließgewässer, Seen	Vektor	DLM25 (Landesvermessungsamt NRW)
Boden	effektive Durchwurzelungstiefe		BK50 (Geologischer Dienst NRW)
	nutzbare Feldkapazität		
	kapillare Aufstiegshöhe	Vektor	
	Flurabstand		
	Staunässegrad		
Landnutzung	Bodenbedeckungskategorien	Vektor	ATKIS DLM 25 (Landesvermessungsamt NRW)
Hydrogeologie	Durchlässigkeitsklassen	Vektor	HK100 (Geologischer Dienst NRW)
Topographie	Hangneigung	Raster	DGM5 (Landesvermessungsamt NRW)
	Hangexposition	Raster	
Dränagen	Dränierte landwirtschaftliche Flächen	Raster	Verfahren nach Tetzlaff et al. 2008a
Validierung	Einzugsgebietsgrenzen	Vektor	LANUV NRW
	Tagesmittel der Abflüsse	dbf	Landesämter, Wasserverbände

2.3 Programmsysteme KLIMA und GLADIS

2.3.1 Beschreibung des Verfahrens

Mit Hilfe der vom GD NRW (bis 2000 Geologisches Landesamt – GLA NRW) entwickelten Programmsysteme KLIMA und GLADIS wird die klassifizierte, von den Einflussfaktoren Boden, Klima, Relief und Realnutzung abhängige, jährliche Sickerwasserrate aus dem effektiven Wurzelraum des Bodens auf der Grundlage der großmaßstäbigen Bodenkarte (BK5) oder der mittelmaßstäbigen Bodenkarte (BK50) berechnet; zudem wird als weitere Komponente des Bodenwasserhaushaltes die Interzeption und der Direktabfluss berechnet. Laterale Wasserbewegungen und Informationen über den tieferen Untergrund unterhalb von 2 m bleiben unberücksichtigt. Für Böden mit Grundwassereinfluss wird der tägliche Kapillaraufstieg in die Berechnung einbezogen.

Der Sickerwassersimulation mit den Modulen KLIMA und GLADIS, die als Tool in das GIS-System ArcGIS eingebettet sind, gehen voraus

- die GIS-gestützte Vorauswahl der einzusetzenden Klima- und Niederschlagsstationen und deren individuelle Überprüfung auf morphologische Lage und Messzeitraum
- das Ergänzen aller Einzelflächen der Bodenkarte um mittlere Höhen- und Neigungswerte

- die Regionalisierung: für jede Einzelfläche werden die bestmöglichen Stationen selektiert und deren entfernungsabhängige Gewichte berechnet
- das Berechnen einzelflächenspezifischer Zeitreihen der Luftfeuchte, der höhenkorrigierten Temperatur und des Niederschlags.

Das Modul KLIMA (Modul zur Regionalisierung klimatologischer Parameter) regionalisiert die Punktdaten der Klimaparameter durch ein Kriging-Verfahren (Spatial Analyst / ArcGIS): Für jede Einzelfläche werden aus nächstliegenden Zeitreihen von Stationen höhen- und entfernungsgewichtet mittlere Tageswertzeitreihen für Niederschlag und potenzielle Verdunstung berechnet und in Dateien abgelegt.

Je Einzelfläche werden die zugehörigen klimatologischen Zeitreihen zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes an das Modul GLADIS übergeben. Das Modul GLADIS (**GLAD**irektabfluss und **S**ickerwasser) ist bodenphysikalisch begründet und an Lysimeterdaten geeicht. Es besteht aus zwei Teilmodulen DIREKT (Berechnung des Direktabflusses) und GLASI (GLA-Sickerwasserberechnung).

Das Teilmodul DIREKT bestimmt zunächst den mittleren jährlichen Direktabfluss, der den Oberflächenabfluss und aktuellen Zwischenabfluss umfasst, nach dem Ansatz von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) in zwei Schritten. Erst wird die mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration aus den Faktoren nutzbare Feldkapazität des Bodens sowie Grundwasser- und Staunässestufe ermittelt. Anschließend wird die Differenz zwischen Jahresniederschlag und der berechneten Evapotranspiration berechnet. Die so ermittelte klimatische Wasserbilanz fließt entweder als unterirdischer Abfluss dem Grundwasser oder als oberirdischer Abfluss (Direktabfluss) den Vorflutern zu. Aus der klimatischen Wasserbilanz und dem Verhältnis zwischen Gesamtabfluss zu unterirdischem Abfluss errechnet sich der Direktabfluss. Das Verhältnis des Gesamtabflusses zum unterirdischen Abfluss wird empirisch aus den Faktoren Neigung, Grundwasser- und Staunässestufe ermittelt. Anschließend wird der tägliche Direktabfluss auf Basis des mittleren jährlichen Direktabflusses aus dem Anteil des Tagesniederschlags am Jahresniederschlag berechnet. Der gemessene Tagesniederschlag wird um den täglichen Direktabfluss vermindert und zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes an das Teilmodul GLASI weitergegeben.

Das Teilmodul GLASI bildet den Bodenwasserhaushalt innerhalb des effektiven Wurzelraums ab. Dazu gehen der Niederschlag und der Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser als positive sowie die nutzungsspezifische potenzielle Verdunstung nach HAUDE (1954) und die Sickerwasserspende als negative Bilanzgrößen als Tageswerte in das Modell ein. Der gegebenenfalls um den Direktabfluss verminderte Tagesniederschlag wird in Abhängigkeit von der Realnutzung um den nutzungsspezifischen Anteil der Interzeption an der Verdunstung reduziert.

Die Berechnung der vertikalen Wasserflüsse im effektiven Wurzelraum beginnt an der Bodenoberfläche als Schichtgrenze zwischen Boden und Atmosphäre. Über diese Schichtgrenze werden die Tagesniederschläge und die effektive Verdunstung bilanziert. Der Wurzelraum umfasst bis zu sechs der in der Bodenkarte angegebenen Bodenartenschichten als Speicher des Modells. Die speichernden Schichten sind charakterisiert durch die aus den Bodenarten abgeleiteten Parameter nutzbare Feldkapazität, Feldkapazität, Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit.

Die effektive Verdunstung je Modellschicht und Tag wird nach RENGER, STREBEL & GIESEL (1974) aus der potenziellen Verdunstung und dem Wassergehalt der jeweiligen Schicht be-

rechnet. Dazu wird der Wassergehalt als Anteil der maximal nutzbaren Feldkapazität der Schicht berechnet. Die effektive Verdunstung wird proportional zum Anteil der Schichtmächtigkeit an der Durchwurzelungstiefe reduziert.

Aus dem aktuellen Wassergehalt einer Schicht und ihrem bodenartspezifischen Wert der gesättigten Wasserleitfähigkeit wird der Wert der ungesättigten Wasserleitfähigkeit der Schicht bestimmt. Mit wechselnden Wassergehalten verändert sich die Wasserleitfähigkeit der Hauptbodenart der Schicht in charakteristischer Weise. Für die vier Leitfähigkeitsgruppen Sande, Lehme, Schluffe und Tone werden wassergehaltsabhängige Reduktionsfaktoren für die Umrechnung von der gesättigten zur ungesättigten Wasserleitfähigkeit verwendet.

Bestimmend für den Wasserfluss über eine Schichtgrenze ist der kleinere Wert der beiden (un-)gesättigten Wasserleitfähigkeitswerte. An der Bodenoberfläche infiltriert nur der Teil des Niederschlags, der vom luftgefüllten Porenvolumen aufgenommen werden kann. Nacheinander werden die Wasserflüsse über alle Schichtgrenzen innerhalb des Bodens bis zur effektiven Durchwurzelungstiefe als unterer Schichtgrenze des Bodenkörpers berechnet.

Bei grundwassernahen Standorten wird bei der Wassergehaltsberechnung der untersten Schicht der kapillare Aufstieg berücksichtigt. Die tägliche Rate wird zum Wassergehalt addiert, wenn dieser unter 70 % der nutzbaren Feldkapazität fällt. Berücksichtigt werden die von Bodenart und Tiefe abhängigen Raten des kapillaren Aufstiegs aus DVWK (1984) und ARBEITSGRUPPE BODEN (1994).

Der Wasserfluss über die effektive Durchwurzelungstiefe hinaus wird als Sickerwassermenge pro Fläche auf Tagesbasis berechnet und über die Simulationsdauer für beliebige Zeiteinheiten summiert als Sickerwasserrate des Bodens in mm je Zeiteinheit ausgegeben.

Nach der Simulation liegen für jede Fläche der Bodenkarte drei nutzungstypische Zeitreihen der Sickerwasserrate je Tag, Monat oder Jahr für frei wählbare 10-Jahresabschnitte des Berechnungszeitraums 1951 bis 2000 vor; die Nutzungsvarianten sind Acker, Grünland und Mischwald.

2.3.2 Klimatische Datengrundlagen

Die Datenbasis für den Standortfaktor Klima bilden die Tageswert-Zeitreihen von 40 Klimahauptstationen und von 450 Niederschlagsmessstellen verschiedener Betreiber (Tabelle 4). Die Zeitreihen der Stationen wurden auf Vollständigkeit der Messwerte durchsucht und kleinere Lücken aus entfernungs-gewichteten Werten benachbarter Stationen aufgefüllt. Insgesamt ergibt sich eine zufriedenstellende Verteilung der Niederschlagsmessstellen und Klimahauptstationen in Nordrhein-Westfalen.

In Anlage 8 sind die mittleren jährlichen, unkorrigierten Niederschlagssummen für den Zeitraum 1961-2000 dargestellt. Für nicht simulierbare Flächen der digitalen Bodenkarte BK 50 sind keine Niederschlagshöhen ausgewiesen. Die mittlere Niederschlagshöhe für den gesamten Betrachtungsraum beläuft sich hiernach auf 681 mm pro Jahr.

Tabelle 4: Klimatische Datengrundlagen zur Sickerwasserberechnung (KLIMA/GLADIS)

Standortfaktor	Datenherkunft	von der Simulation unabhängige, feste Daten	von der Simulation abhängige, variierende Daten
Klima	40 Klimastationen über 450 Niederschlagsstationen Tageswerte der Jahre 1951 bis 2000	Tageswerte: <ul style="list-style-type: none"> • Luftfeuchte • Temperatur • Niederschlag 	für jede Einzelfläche als Tageswertreihen: <ul style="list-style-type: none"> • Verdunstung nach HAUDE • Niederschlag

2.3.3 Gebietscharakteristische Datengrundlagen

Neben dem Standortfaktor Klima sind für die Berechnung der mittleren jährlichen Sickerwasserrate aus dem Boden mit Hilfe der Module KLIMA und GLADIS auch die Standortfaktoren Boden, Relief und Realnutzung von Bedeutung (Tabelle 5). Mit Hilfe eines Speicher-Kaskaden-Modells werden für alle Einzelflächen der Bodenkarte Sickerwasserzeitreihen auf Tagesbasis berechnet.

Tabelle 5: Gebietscharakteristische Datengrundlagen zur Sickerwasserberechnung (KLIMA/GLADIS)

Standortfaktor	Datenherkunft	von der Simulation unabhängige, feste Daten	von der Simulation abhängige, variierende Daten
Boden	Bodenkarten von Nordrhein-Westfalen verschiedener Maßstäbe (BK50/BK5)	für jede Bodeneinheit: <ul style="list-style-type: none"> • Grundwasserstufe • effektive Wurzeltiefe für jede Bodenschicht: <ul style="list-style-type: none"> • nutzbare Feldkapazität • Feldkapazität • Luftkapazität • Gesättigte Wasserleitfähigkeit 	für jede Bodeneinheit als Tageswertreihen: <ul style="list-style-type: none"> • Kapillaraufstieg des Grundwassers für jede Bodenschicht als Tageswertreihen: <ul style="list-style-type: none"> • ungesättigte Wasserleitfähigkeit
Relief	Digitales Geländemodell (DGM 5) als 10 x 10-m-Raster	je Rasterpunkt: <ul style="list-style-type: none"> • Höhe über NN • maximale Neigung 	für jede Einzelfläche: <ul style="list-style-type: none"> • mittlere Höhe • mittlere Neigung • Direktabfluss
Realnutzung	Amtliches Topographisches Kartographisches Informationssystem (AT-KIS)	klassifizierte Nutzungsangaben, im GD generalisiert zu: <ul style="list-style-type: none"> • Acker • Grünland • Laubwald (optional simuliert) • Nadelwald (optional simuliert) • Mischwald • Siedlung (nicht simuliert) • Gewässer (nicht simuliert) 	für jede Einzelfläche, nutzungs-spezifisch: <ul style="list-style-type: none"> • Interzeption • Kennwerte zur Berechnung der effektiven Wurzeltiefe • monatliche HAUDE-Faktoren

Die generalisierte Realnutzung für das gesamte Betrachtungsgebiet ist in Anlage 9 dargestellt.

2.3.4 Besonderheiten der GLADIS-Simulationen für den Tätigkeitsbereich des Erftverbands

Rahmenbedingungen und Vorgehen bei der Simulation

Die Simulation der Sickerwasserrate auf Basis der BK50 für den vereinbarten Zeitraum 1961 bis 2000 für das Gebiet des Erftverbands folgte jeweils dem Blattschnitt i. M. 1 : 100.000, d. h. in BK50-4er-Blöcken, wie es auch für die Standard-Bearbeitung im GD NRW vorgesehen ist.

Für diese Blöcke erfolgte jeweils eine Zuordnung von allen dem GD NRW zur Verfügung stehenden, geeigneten Tageswert-Zeitreihen von Niederschlags- (107) und Klimastationen (12), wobei im Randbereich der Blöcke auf eine Überlappung der benutzten Stationen geachtet wurde (Abbildung 3). Für die Regionalisierung der Punktdaten auf die jeweiligen Simulationsflächen wird innerhalb des GIS-Systems ArcGIS mit Spatial Analyst ein Kriging-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3.1).

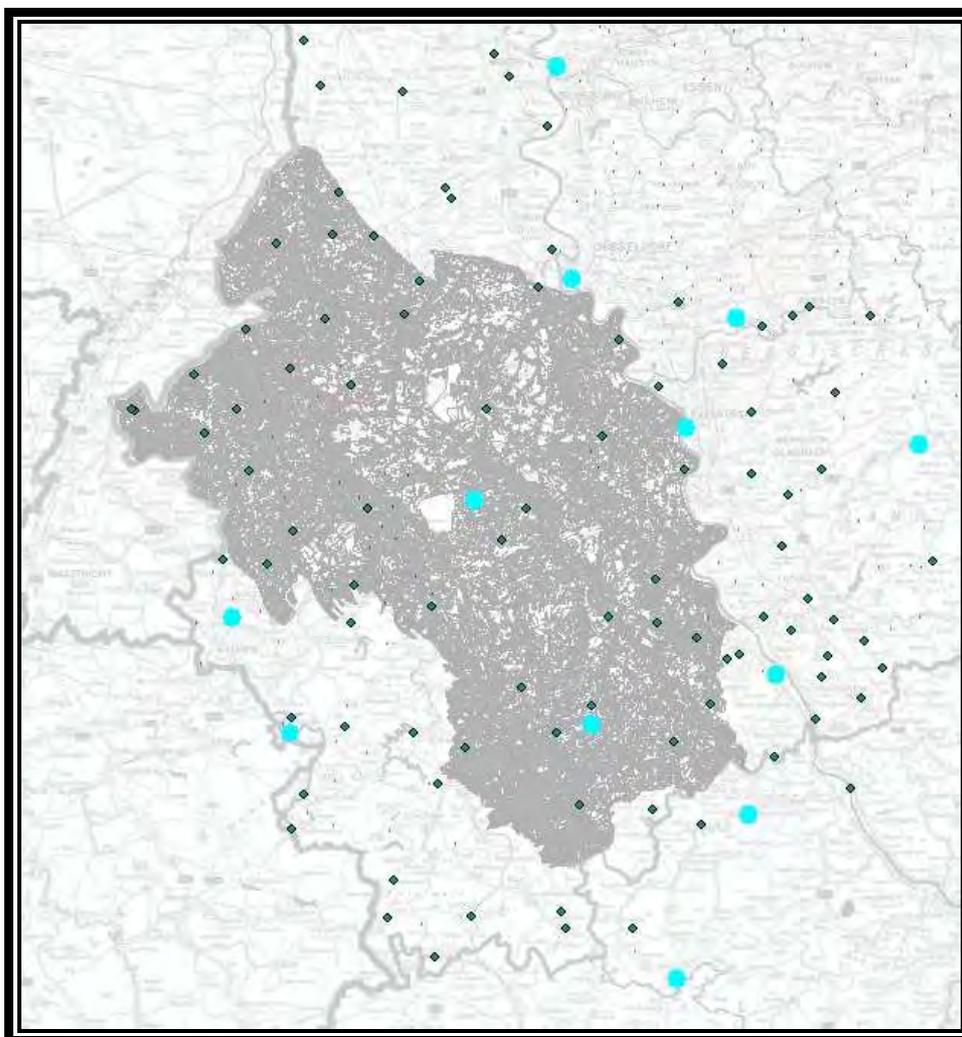


Abbildung 3: Simulation der Sickerwasserrate auf Basis der Bodenkarte i. M. 1 : 50.000 (GD NRW) mit GLADIS 1961 bis 2000. Übersicht über das Untersuchungsgebiet (Erftverband) und der verwendeten Niederschlags- (kleine Punkte) und Klima-Stationen (große Punkte)

Entsprechend den Vorauswertungen des Erftverbands beim Vergleich von eigenen Niederschlagsregionalisierungen mit den Gebietsmittelwerten nach der REGNIE-Methode des DWD (Anlage 2) sowie der Ergebnisvergleiche der berechneten Grundwasserneubildung (Kapitel 3) wurde vorgeschlagen, die zu verwendenden Niederschlagsdaten um 4 % zu erhöhen (Niederschlagskorrektur). Im Rahmen der dokumentierten Vergleiche sind diese Ergebnisse mit KLIMA/GLADIS (GD_N+4%) gekennzeichnet.

Für GLADIS wurden dazu die jeweiligen N-Tageswerte um den entsprechenden Wert korrigiert. Temperatur- und Luftfeuchte-Tageswerte zur Berechnung der Verdunstung nach HAUDE (1954, Abschätzung der potenziellen Evapotranspiration) blieben unverändert.

Nach Ermittlung der Ergebnisse für die jeweilige Nutzung Acker, Grünland und Mischwald wurden die Simulations-Blöcke zusammengelegt, blattschnittfrei verschmolzen und mit der Außengrenze des Tätigkeitsbereichs des Erftverbands ausgeschnitten. Für die hydrogeologischen Teilräume (Schollen) innerhalb dieses Bereiches wurden Mittelwerte für die drei Nutzungen ermittelt.

Verschneidung mit Nutzungsdaten nach ATKIS

Anschließend wurde der ausgeschnittene Tätigkeitsbereich des Erftverbands noch mit einem auf wenige Nutzungen generalisierten Datensatz aus dem ATKIS (Amtl. Topografisch-kartografisches Informationssystem) verschnitten, um die nutzungsspezifischen Sickerwasserraten je entstandener Teilfläche bestimmen zu können.

Folgende Nutzungskategorien wurden aus dem ATKIS-Datensatz generiert (Anlage 9):

- Acker
- Grünland
- Wald
- Gewässer
- Moore
- Siedlungsflächen, anthropogen überprägte Flächen usw.

Für Acker, Grünland und Wald konnten die jeweils direkt errechneten Simulationsergebnisse zugeordnet werden.

Annahmen für nicht berechenbare Nutzungskategorien

Für die anderen Nutzungen mussten in Absprache Annahmen für die Sickerwasserrate bzw. Grundwasserneubildungswirkung getroffen werden:

Tabelle 6: Ansatz der Sickerwasserrate für nicht berechenbare Nutzungskategorien (KLIMA/GLADIS)

ATKIS-Gewässer	Sickerwasserrate: 0 mm/a bzw. l/s*km ²
Moore	mittlerer Niederschlag minus mittlere potentielle Verdunstung
Siedlungsflächen, anthropogen überprägte Flächen usw.	dichte Bebauung, Ballungsräume: Sickerwasserrate (Grünland) * Faktor 0,5
	Sonstige Siedlungsflächen: Sickerwasserrate (Grünland) * Faktor 0,7

Für nicht berechenbare Flächen, für die weder Sickerwasser- noch Niederschlags- oder Verdunstungswerte zur Verfügung stehen, wurden 100 oder 150 mm/a Sickerwasserrate angenommen (Einheiten ‚XG?‘ der BK50) in Anlehnung an die für diese Gegend zu erwartende Bilanz aus Niederschlag minus Verdunstung.

Hinter dem Faktor 0,5 für Ballungsräume steht die Annahme, dass dort verstärkt Niederschlagswasser kanalisiert und nicht auf der Fläche abgeführt wird und die Interzeption/Verdunstung tendenziell höher ist. Ob das kanalisiert abgeführte Niederschlagswasser wiederum direkt oder indirekt der Grundwasserneubildung zu Gute kommt, kann in dieser Betrachtung nicht geklärt werden.

2.4 Weitere Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung

2.4.1 Allgemeine Wasserhaushaltsgleichung

Grundlage für die Berechnung der langjährigen Grundwasserneubildung nach der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung bilden vieljährige Mittelwerte des Niederschlags, der Verdunstung und des oberirdischen Abflusses (ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERNEUBILDUNG“ 1982, ERFTVERBAND 1995).

$$GWN = N - V - A_o$$

mit

GWN	=	Grundwasserneubildung	[mm/a]
N	=	Niederschlag	[mm/a]
V	=	reale Verdunstung	[mm/a]
A _o	=	Direktabfluss	[mm/a]

Im Basisplan III (ERFTVERBAND 1995) wurden die mittleren Niederschlagshöhen im Tätigkeitsbereich des Erftverbands (Zeitraum 1971 bis 1990) abgeleitet und eine Berechnung der Verdunstungshöhen nach dem in der Wasserwirtschaft gebräuchlichen empirischen Ansatz von TURC (1954) vorgenommen, bei dem die Eingangsgrößen Verdunstung, Niederschlag und mittlere Jahrestemperatur berücksichtigt werden.

Der Direktabflussanteil wurde für einzelne Bilanzgebiete in Abhängigkeit der morphologischen und hydrogeologischen Verhältnissen ermittelt (ERFTVERBAND 1995).

2.4.2 Wasserwerksmethode

Grundlage der sogenannten Wasserwerksmethode zur Ermittlung der langjährigen Grundwasserneubildung ist die Aufstellung einer Grundwasserbilanz für das Einzugsgebiet eines Wasserwerks (ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERNEUBILDUNG“, 1982). Die Grundwasserneubildungsspende lässt sich dabei aus der langjährigen, mittleren Grundwasserförderung bezogen auf das unterirdische Einzugsgebiet der Förderbrunnen ermitteln.

$$GWN = Q_{Entn} / A_{EZG}$$

mit

GWN	=	langjährige Grundwasserneubildungsspende	[l/(s*km ²)]
Q _{Entn}	=	langjährige, mittlere Grundwasserförderung	[l/s]
A _{EZG}	=	unterirdisches Einzugsgebiet	[km ²]

Unberücksichtigt bleiben bei der einfachen Relation zwischen Grundwasserförderung und Einzugsgebietsfläche Vorratsänderungen im Grundwasserspeicher, Aussickerungen in tiefere Stockwerke, Zusickerungen aus Oberflächengewässern, In- und Exfiltrationen aus Versorgungsleitungen oder der Kanalisation.

Die Wasserwerksmethode liefert einen integralen Wert der Grundwasserneubildung in einem Einzugsgebiet und damit keine Flächendifferenzierung.

2.4.3 Weitere Verfahren

In BOGENA ET AL. (2003) sowie NEUMANN (2009) werden weitere Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung für unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen vorgestellt und zum Teil vergleichend betrachtet.

3 Regionale Verfahrensvergleiche und Validierung

Die Berechnungsergebnisse der im Rheinischen Braunkohlenrevier überwiegend verwendeten Verfahren zur Ermittlung der langjährigen Grundwasserneubildung nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990), GROWA (KUNKEL & WENDLAND 2002) und KLIMA/GLADIS (SCHREY 1993) wurden für verschiedene Bilanzräume ausgewertet und vergleichend betrachtet. Zum Einen erfolgte dabei ein großräumiger Vergleich innerhalb von hydrogeologischen Teilräumen, zum Anderen innerhalb von Einzugsgebieten bzw. Wasserschutzzonen ausgewählter Wassergewinnungsanlagen in den Teilräumen. Für diese lagen zum Teil umfangreiche Dargebotsbilanzierungen aus Wasserrechtsverfahren vor. Darüber hinaus wurden die Berechnungsergebnisse auf der Basis von Trockenwasserabflüssen ausgewählter Abflusspegel validiert. Aufgrund des in weiten Bereichen des Betrachtungsraumes vorliegenden Sumpfungseinflusses (zur Entwässerung der Braunkohletagebaue der RWE Power AG) sowie sonstiger anthropogener Einflüsse auf das Abflussgeschehen konnten nur wenige Gewässer herangezogen werden. Die Aussagekraft der Validierungen ist daher eingeschränkt.

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung wurde der Zeitraum 1961 bis 2000 als einheitlicher Referenzzeitraum für Berechnungen der langjährigen, mittleren Grundwasserneubildung festgelegt. Gegenüber der bislang überwiegend betrachteten Periode 1971 bis 1990 wurden die eher niederschlagsreichen 1960er Jahre sowie die 1990er Jahre bis 2000 mit einem leicht unterdurchschnittlichen Niederschlagsgeschehen einbezogen.

Darüber hinaus wurden die Niederschlagsdaten zum Teil noch mit Korrekturfaktoren belegt. Die Verwendung korrigierter Niederschläge stellt ein übliches Vorgehen bei hydrologischen Modellierungen dar. Hintergrund sind systematische Messfehler bei der Erfassung des gefallenen Niederschlags durch Windabdrift und Verdunstungsverluste (RICHTER 1995). Im Rahmen der durchgeführten Methodenvergleiche wurden ausgehend von einer Erhöhung um 4% verfahrensabhängige Korrekturfaktoren ermittelt, die eine bestmögliche Wiedergabe der Erfahrungswerte der Grundwasserneubildung bzw. der simulierten Niedrigwasserabflüsse an Vergleichspegeln erlauben (vgl. Kapitel 3.3).

3.1 Ergebnisvergleich in hydrogeologischen Räumen

3.1.1 Schollenbezogener Vergleich

Das Rheinische Braunkohlenrevier als Teil der Niederrheinischen Bucht gliedert sich in vier weitgehend hydrogeologisch abgeschlossene Einheiten: Venloer Scholle, Rurscholle, Erftscholle sowie Kölner Scholle bzw. Rheintalscholle (Abbildung 4). Die quartären und tertiären Lockergesteinsvorkommen der Niederrheinischen Bucht werden im Süden bzw. Südwesten durch die mesozoischen und paläozoischen Gesteine der Eifel begrenzt. Die jährlichen Niederschlagsmengen liegen zwischen 550 und 800 mm (vgl. Anlage 3).

Die Ergebnisvergleiche innerhalb der hydrogeologischen Teilräume beschränkten sich auf den Tätigkeitsbereich des Erftverbands (ca. 4.200 km²). Er reicht vom Rhein als östliche Begrenzung bis zur niederländischen Grenze innerhalb der Rur- und Venloer Scholle. Die Berechnungen des Erftverbands nach dem Verfahren von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) wurden darüber hinaus auf das niederländische Staatsgebiet bis zur Maas ausgedehnt, um den Untersuchungsraum der Grundwassermodelle im Rheinischen Braunkohlenrevier abdecken zu können (vgl. Kapitel 2.1.2 und 2.1.3).

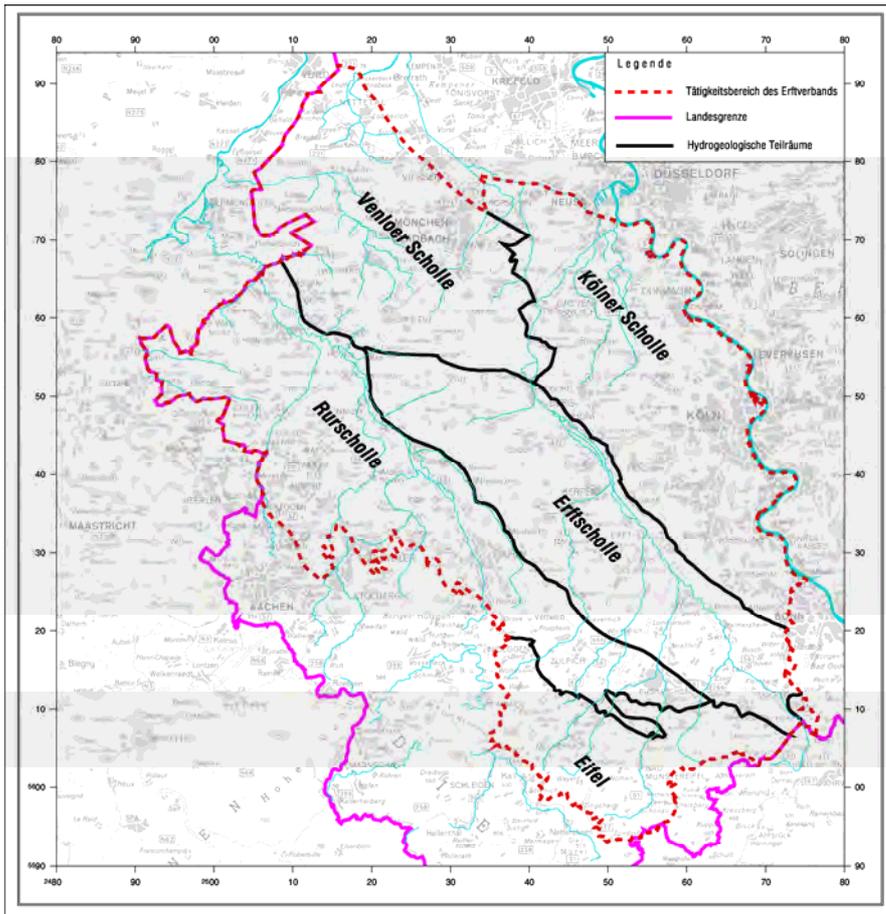


Abbildung 4: Hydrogeologische Teilräume (Schollen) mit Tätigkeitsbereich des Erftverbands

In Abbildung 5 sowie den Anlagen 10 bis 14 sind die Ergebnisse der Grundwasserneubildungs- bzw. Sickerwasserratenberechnungen für die im Rahmen dieses Berichtes verglichenen Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990), GROWA (KUNKEL & WENDLAND 2002) und KLIMA/GLADIS (SCHREY 1993) dargestellt. Darüber hinaus werden in Abbildung 5 die bislang im Basisplan III (ERFTVERBAND 1995) veröffentlichten Bilanzgrößen für die mittlere Grundwasserneubildung (Zeitraum 1971 - 1990) in den Teilräumen zum Vergleich dargestellt. Wie in Kapitel 0 dargelegt, greifen die Berechnungsverfahren zum Teil auf eine unterschiedliche Datenbasis zurück. Vereinheitlicht wurde der Bezugszeitraum (1961 - 2000) für die verwendeten Niederschlagsdaten (Regionalisierung von Niederschlagsdaten durch Erftverband (EV) und GD NRW mit Korrekturfaktoren bzw. unkorrigierte Niederschlagsdaten des DWD) und die Berechnung der Grundwasserneubildung bzw. Sickerwasserrate.

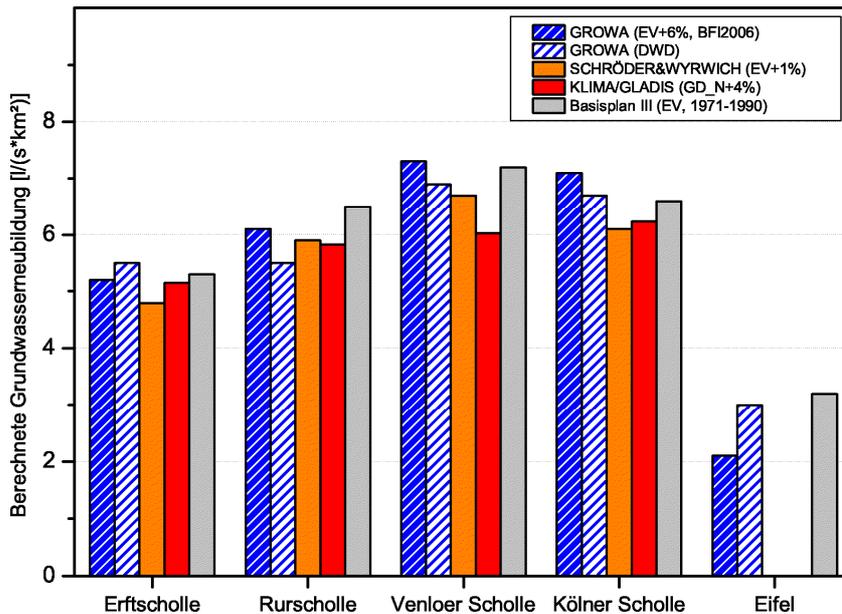


Abbildung 5: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die hydrogeologischen Teilräume, Zeitraum: 1961-2000

Die geringsten Grundwasserneubildungsspenden innerhalb der Lockergesteinsbereiche treten in der Erftscholle auf, die aufgrund der Lage großer Teile im Regenschatten (Lee) der Eifel deutlich verminderte mittlere Jahresniederschlagssummen aufweist. Mit den Verfahrensansätzen des Modells GROWA werden mittlere Grundwasserneubildungsspenden von 5,2 l/(s*km²) (EV+6%, BFI2006) bzw. 5,5 l/(s*km²) (DWD) berechnet. Das Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH (EV+1%) kommt auf eine mittlere Grundwasserneubildung von 4,8 l/(s*km²). Die Sickerwasserratenberechnung mit dem Modellsystem KLIMA/GLADIS (GD_N+4%) liefert 5,2 l/(s*km²).

Für den Teilraum der Rurscholle variiert die berechnete Grundwasserneubildung bzw. Sickerwasserrate zwischen 5,5 l/(s*km²) (GROWA, DWD) und 6,1 l/(s*km²) (GROWA, EV+6%, BFI2006). Nach dem Basisplan III ist für die westlichste Großscholle der Niederrheinischen Bucht mit einer langjährigen mittleren Grundwasserneubildung von 6,5 l/(s*km²) zu rechnen (Zeitraum: 1971-1990, vgl. Kap. 2.4.1).

Mit Hilfe der Verfahren von SCHRÖDER & WYRWICH (EV+1%) und GROWA (DWD) werden für die Venloer Scholle Grundwasserneubildungsspenden von 6,7 l/(s*km²) bzw. 6,9 l/(s*km²) berechnet. Der letztgenannte Wert entspricht dem langjährigen Mittelwert der Grundwasserneubildung für den nördlichen Teil des Rheinischen Braunkohlenreviers (ARBEITSKREIS "GRUNDWASSERNEUBILDUNG", 1982) und liegt geringfügig unter den Angaben des Basisplans III mit 7,2 l/(s*km²). Die Venloer Scholle weist im Vergleich der hydrogeologischen Teilräume die höchste Grundwasserneubildung auf. Das Berechnungsergebnis des Modells GROWA (EV+6%, BFI2006) für die Venloer Scholle liegt bei 7,3 l/(s*km²). Nach den Berechnungen des Modells KLIMA/GLADIS (GD_N+4%) ist für die Venloer Scholle lediglich von einer mittleren Grundwasserneubildung von 6 l/(s*km²) auszugehen.

Für die Kölner Scholle bzw. Rheintalscholle wird anhand des flächendifferenzierten Berechnungsverfahrens nach SCHRÖDER & WYRWICH eine mittlere Grundwasserneubildung von 6,1 l/(s*km²) berechnet, nach KLIMA/GLADIS (GD_N+4%) 6,2 l/(s*km²). Die Kölner Scholle umfasst die Ville-Teilscholle mit den verkippten und rekultivierten ehemaligen Tagebauflächen. Nach dem Basisplan III wurde eine mittlere Grundwasserneubildung von 6,3 l/(s*km²) ermit-

telt, wobei seinerzeit noch zwei aktive Tagebaue dargebotsmindernd angesetzt worden sind. Die mit dem Berechnungsverfahren GROWA (EV+6%, BFI2006) ermittelte Grundwasserneubildung liegt mit 7,1 l/(s*km²) etwas über den Ergebnissen der anderen Verfahren.

Für die Festgesteinsregion der Eifel liefern die Verfahren von SCHRÖDER & WYRWICH (1990) und KLIMA/GLADIS keine belastbare Aussage über die mittlere Grundwasserneubildung. Die mit dem Modellsystem GROWA berechnete Grundwasserneubildung liegt zwischen 2,1 bis 3 l/(s*km²) und damit geringfügig unter dem im Basisplan III dargelegten Flächenmittel von ca. 3,2 l/(s*km²) für die Eifel.

Für den niederländischen Teil des Betrachtungsraums wurde nach dem Verfahren von SCHRÖDER & WYRWICH eine mittlere Grundwasserneubildung von 7 l/(s*km²) berechnet (vgl. Anlagen 10 und 11).

3.1.2 Vergleich unterschiedlicher Niederschlagsräume

Aufgrund der durch vorherrschende Westwind-Wetterlagen im Lee der Eifel resultierenden deutlich verringerten Niederschlagshöhen ist innerhalb der hydrogeologischen Teilräume der Rur- und der Erftscholle eine deutliche Niederschlagszonierung zu verzeichnen (vgl. Anlage 3).

Im Rahmen der in diesem Bericht dokumentierten Verfahrensvergleiche wurde eine räumliche Differenzierung von Rur- und Erftscholle in einen nördlichen sowie einen südlichen Bereich vorgenommen. Die Unterteilung erfolgt anhand der 650 mm - Isohyete der mittleren unkorrigierten Niederschlagshöhe (Zeitraum: 1961-2000, Niederschlagsregionalisierung des Erftverbands, gestrichelte Linie in Anlage 3).

Abbildung 6 und Anlage 10 zeigen den Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die Teilräume der Rur- und der Erftscholle. Für die nördliche Erftscholle werden Grundwasserneubildungsspenden zwischen 5,7 und 6,5 l/(s*km²), in der nördlichen Rurscholle 5,5 bis 6,6 l/(s*km²) berechnet. In den südlichen Teilbereichen beider Schollen stehen nach den Berechnungsverfahren durchschnittlich nur 67 bis 76 % der Grundwasserneubildung der niederschlagsreicheren nördlichen Bereiche zur Verfügung.

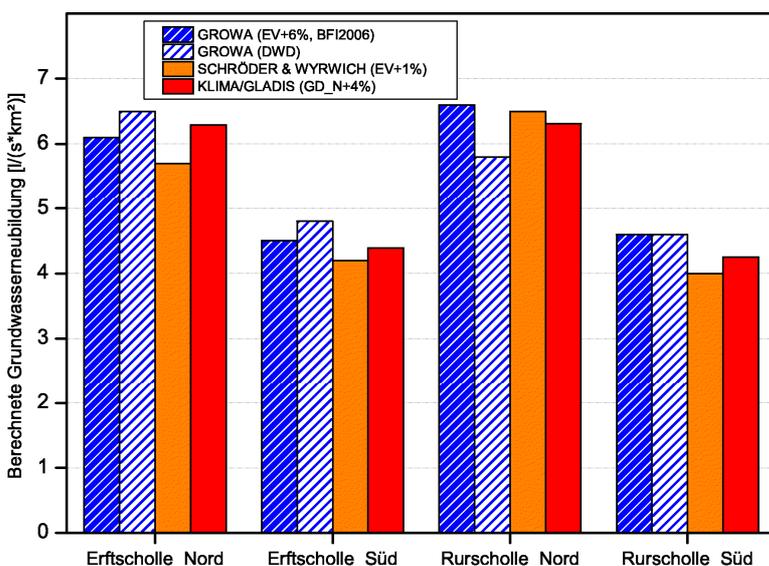


Abbildung 6: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die Teilräume in der Erft- und Rurscholle, Zeitraum: 1961-2000

3.2 Ergebnisvergleich in Einzugsgebieten / Wasserschutzgebieten

3.2.1 Gebietscharakteristiken

Neben einem Vergleich der Bilanzgröße Grundwasserneubildung für größere hydrogeologische Einheiten (Schollen) wurden im Rahmen der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung auch Ergebnisvergleiche innerhalb von Einzugsgebieten bzw. Wasserschutzgebieten von Wassergewinnungsanlagen für die öffentliche Trinkwasserversorgung durchgeführt (Abbildung 7). Tabelle 7 enthält einige gebietscharakteristische Angaben der Gebiete.

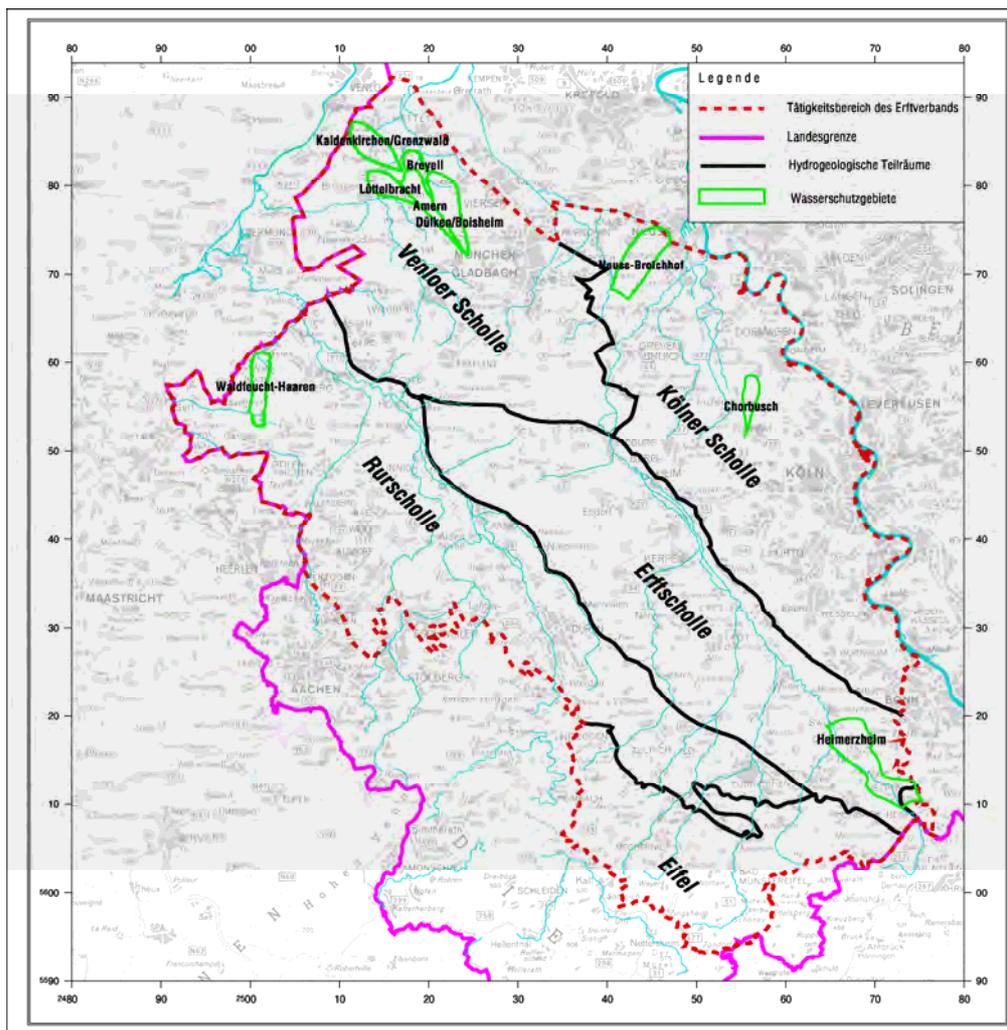


Abbildung 7: Lage der betrachteten Wasserschutzgebiete von Wassergewinnungsanlagen im Untersuchungsraum

Tabelle 7: Gebietscharakteristiken der betrachteten Wasserschutzgebiete von Wassergewinnungsanlagen⁴

Wasserschutzgebiet	Hydrogeologischer Teilraum	mittlere Niederschlagshöhe (EV unkorrigiert, 1961-2000) [mm/a]	dominierende Bodentypen	überwiegende Landnutzung
WSG Kaldenk./Grenzwald	Venloer Scholle	755	Braunerde	Acker/Grünland
WSG Breyell	Venloer Scholle	746	Braunerde, Gley	Acker/Grünland, Siedlung
WSG Amern	Venloer Scholle	741	Parabraunerde, Braunerde	Acker/Grünland
WSG Lüttelbracht	Venloer Scholle	755	Braunerde	Acker/Grünland
WSG Dülken/Boisheim	Venloer Scholle	738	Parabraunerde, Braunerde	Acker/Grünland
WSG Neuss-Broichhof	Kölner Scholle	727	Parabraunerde	Acker/Grünland
WSG Chorbusch	Kölner Scholle	724	Parabraunerde, Braunerde	Acker/Grünland, Laubwald
WSG Heimerzheim	Erftscholle	635	Parabraunerde, Pseudogley	Acker/Grünland
WSG Waldfeucht-Haaren	Rurscholle	722	Parabraunerde, Braunerde	Acker/Grünland

Die innerhalb der Venloer Scholle, der Kölner Scholle, der Rur- und der Erftscholle ausgewählten Gebiete stellen wasserwirtschaftlich gut untersuchte Räume dar. Bei den jeweiligen regionalen Wasserversorgungsunternehmen liegen in der Regel belastbare Daten über das verfügbare Grundwasserdargebot im Einzugsgebiet der Förderanlagen vor. Oftmals wurden im Zuge der wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren verschiedene empirische Verfahren eingesetzt, um das verfügbare Grundwasserdargebot abzuschätzen.

3.2.2 Ergebnisse

Die für die betrachteten Einzugsgebiete bzw. Wasserschutzgebiete von Wassergewinnungsanlagen ermittelten Berechnungsergebnisse der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung für die untersuchten Verfahren sind in Abbildung 8 dargestellt.

Für vier der fünf im Nordwesten der Venloer Scholle gelegenen Vergleichsgebiete zeigt sich, dass die Berechnungsergebnisse nach SCHRÖDER & WYRWICH geringfügig über denen des Wasserhaushaltsmodells GROWA (EV+6%, BF12006) liegen. Die Ergebnisse der Sickerwasserratenberechnung mit KLIMA/GLADIS für die Vergleichsräume in der Venloer Scholle liegen für die sehr nahe beieinander liegenden Gebiete unter den beiden anderen Verfahren bzw. unter den zum Vergleich herangezogenen Angaben aus dem Basisplan III und den jeweiligen Wasserrechtsverfahren. Für die Regenerationsgebiete der Wassergewinnungen Breyell und Amern gehen die ausgewerteten Wasserrechtsunterlagen bislang von Grundwasserneubildungshöhen aus, die über den anhand der drei Verfahren berechneten Werten liegen.

Relativ gute Übereinstimmungen der berechneten Grundwasserneubildung zwischen den Verfahren GROWA, SCHRÖDER & WYRWICH sowie KLIMA/GLADIS ergeben sich für das in der nördlichen Kölner Scholle gelegene Schutzgebiet der Wassergewinnung Neuss-Broichhof sowie für das Schutzgebiet der Wassergewinnung Chorbusch (Kölner Scholle). Die GROWA-Berechnungen mit den unkorrigierten Niederschlagshöhen (DWD) erweisen sich in beiden Vergleichsräumen der Kölner Scholle recht hoch. Die im Wasserrechtsverfahren für das Einzugsgebiet der Wassergewinnung Chorbusch angesetzte Grundwasserneubildung von 6,5 l/(s*km²) liegt ca. 1 l/(s*km²) unter den flächendifferenzierten Berechnungen

⁴ Die Grundwasserförderung der genannten Wassergewinnungsanlagen erfolgt aus unterschiedlichen Grundwasserstockwerken.

nach GROWA (EV+6%, BFI2006, SCHRÖDER & WYRWICH und KLIMA/GLADIS.

Für das Einzugsgebiet der Wassergewinnung Heimerzheim in der südlichen Erftscholle ist nach den Verfahren von SCHRÖDER & WYRWICH und GROWA von Grundwasserneubildungs-spenden auszugehen, die ca. 1 l/(s*km²) unter den nach dem Basisplan III bzw. den Wasser-rechtsunterlagen dargelegten Regenerationsraten für das obere Stockwerk liegen. Hierfür sind v. a. die geringen Niederschlagssummen in Verbindung mit hohen Verdunstungsraten verantwortlich. Das Modell KLIMA/GLADIS liefert mit 2,8 l/(s*km²) die niedrigste Grundwas-serneubildung der drei miteinander verglichenen Verfahren.

Nach dem Basisplan III des Erftverbands sowie nach den aktuellen Berechnungen mit dem SCHRÖDER & WYRWICH-Ansatz ist im Einzugsgebiet der Wassergewinnung Waldfeucht-Haaren auf der Rurscholle von einer langjährigen Grundwasserneubildung von über 7 l/(s*km²) auszugehen. Die Ergebnisse der Modellansätze GROWA und KLIMA/GLADIS lie-gen ca. 1,2 l/(s*km²) darunter. Die im Rahmen des Wasserrechtsverfahren dargelegte Rege-nerationsrate von 4,8 l/(s*km²) weicht deutlich von den aktuellen Berechnungen ab.

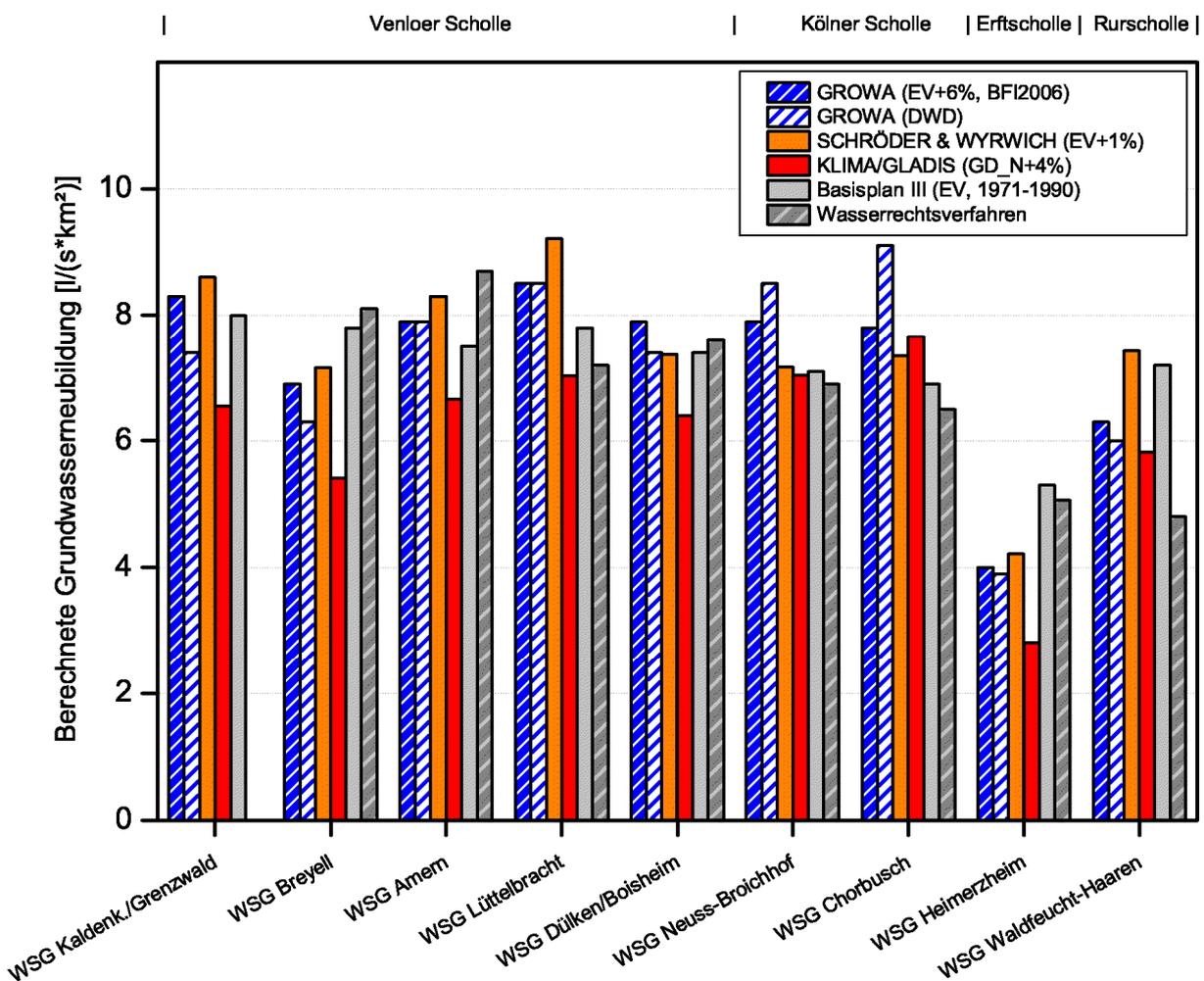


Abbildung 8: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für ausgewählte Wasserschutzgebiete (WSG) von Wassergewinnungsanlagen, Zeitraum: 1961-2000

3.2.3 Bewertung

Die Berechnungsergebnisse der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung für die Verfahren SCHRÖDER & WYRWICH, GROWA und KLIMA/GLADIS zeigen innerhalb der Vergleichsgebiete nur eine geringe mittlere Abweichung von ca. 0,7 l/(s*km²). Der Ansatz von SCHRÖDER & WYRWICH weist dabei überwiegend die höchsten Grundwasserneubildungsspenden auf. Für die beiden Vergleichsgebiete in der Kölner Scholle überschätzt das Modell GROWA sehr wahrscheinlich die Grundwasserneubildung (vgl. auch Kapitel 3.1.1). Das Modell KLIMA/GLADIS liefert insbesondere für die Vergleichsgebiete in der Venloer Scholle Sickerwasserraten, die unter den bisherigen Erfahrungswerten liegen. Gründe hierfür sind evtl. in höheren Verdunstungsverlusten über Waldflächen zu sehen, die in diesen Vergleichsgebieten einen höheren Flächenanteil aufweisen, sowie einer differenzierteren ATKIS-Nutzung und daraus resultierenden unterschiedlichen Werten für Acker- und Grünland-Sickerwasserraten zu sehen.

Die drei vergleichend betrachteten Verfahren zeigen eine Spannweite der mit erheblichen Unsicherheiten behafteten Berechnung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den Vergleichsgebieten auf. Die Abweichungen der berechneten Grundwasserneubildung erscheinen angesichts der sehr unterschiedlichen methodischer Ansätze und Berechnungsgrundlagen als vertretbar. Teilweise beruhen die zu Vergleichszwecken herangezogenen Werte der langjährigen Grundwasserneubildung in den jeweiligen Wasserrechtsverfahren ebenfalls auf verschiedenen empirischen Ansätzen. Nur selten stehen belastbare, z. B. mit Hilfe der Wasserwerksmethode gewonnene integrale Werte der Grundwasserneubildung für Einzugsgebiete zur Verfügung.

3.3 Validierung anhand von Abflussdaten

Ergänzend zu den im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Vergleichsrechnungen in Einzugsgebieten von Gewinnungsanlagen wurden Validierungen der berechneten Wasserhaushaltsgröße Grundwasserneubildung anhand von Abflussdaten in einigen Gewässern des Betrachtungsraums vorgenommen. Aufgrund der großräumigen Einflüsse der Sumpfungsmaßnahmen im Rheinischen Braunkohlenrevier sowie anderer anthropogener Einflüsse auf das Abflussgeschehen in den Einzugsgebieten (Grundwasserentnahmen, Maßnahmen an Gewässern etc.) finden sich nur wenige geeignete Abflusspegel, deren Abflusswerte für zuverlässige Validierungen herangezogen werden können. Für eine belastbare Plausibilisierung von Neubildungsberechnungen sollte die Auswahl geeigneter Gewässerpegel darüber hinaus eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher klimatischer, pedologischer und nutzungsbezogener Verhältnisse abdecken.

Im Rahmen der Validierung der Berechnungsergebnisse anhand von Abflussdaten wurden fünf Abflusspegel an den Gewässern Schwalm und Niers (Venloer Scholle) sowie Neffelbach und Rotbach (Eifel, Rurscholle) ausgewählt (Abbildung 9). Die Gewässerpegel Landesgrenze und Pannenmühle an der Schwalm sowie Oedt an der Niers repräsentieren seit den 1980er Jahren einen Zustand, der von bergbaubedingten Sumpfungsmaßnahmen bzw. Gegenmaßnahmen geprägt ist. Deshalb wurde hier auf mit Hilfe des Wiener-Filter-Verfahrens (BUCHER, 1999) simulierte Abflussspenden zurückgegriffen, die im Rahmen des Monitorings für den Tagebau Garzweiler II im Nordraum des Rheinischen Braunkohlenreviers verwendet werden und das von Bergbaueinflüssen unbeeinflusste, natürliche Abflussgeschehen widerspiegeln. Auch für den vom Bergbau unbeeinflussten Pegel Bessenich (Neffelbach) wurden die im Rahmen des Monitorings für den Tagebau Inden simulierten Niedrigwasserabflüsse

herangezogen. Die Wiener-Filter-Simulationen greifen auf unbeeinflusste Referenzpegel (Eingangsgröße: Niedrigwasserabfluss) und Grundwassermessstellen (Eingangsgröße: Grundwasserstand) zurück und wurden innerhalb ausreichend langer und geeigneter Zeiträume für den jeweiligen Zielpegel kalibriert (5 bis 32 Jahre). Die simulierten Zeitreihen decken zudem einen Zeitraum von mehreren Dekaden mit ihrer Witterungsdynamik ab (vgl. Tabelle 8) .

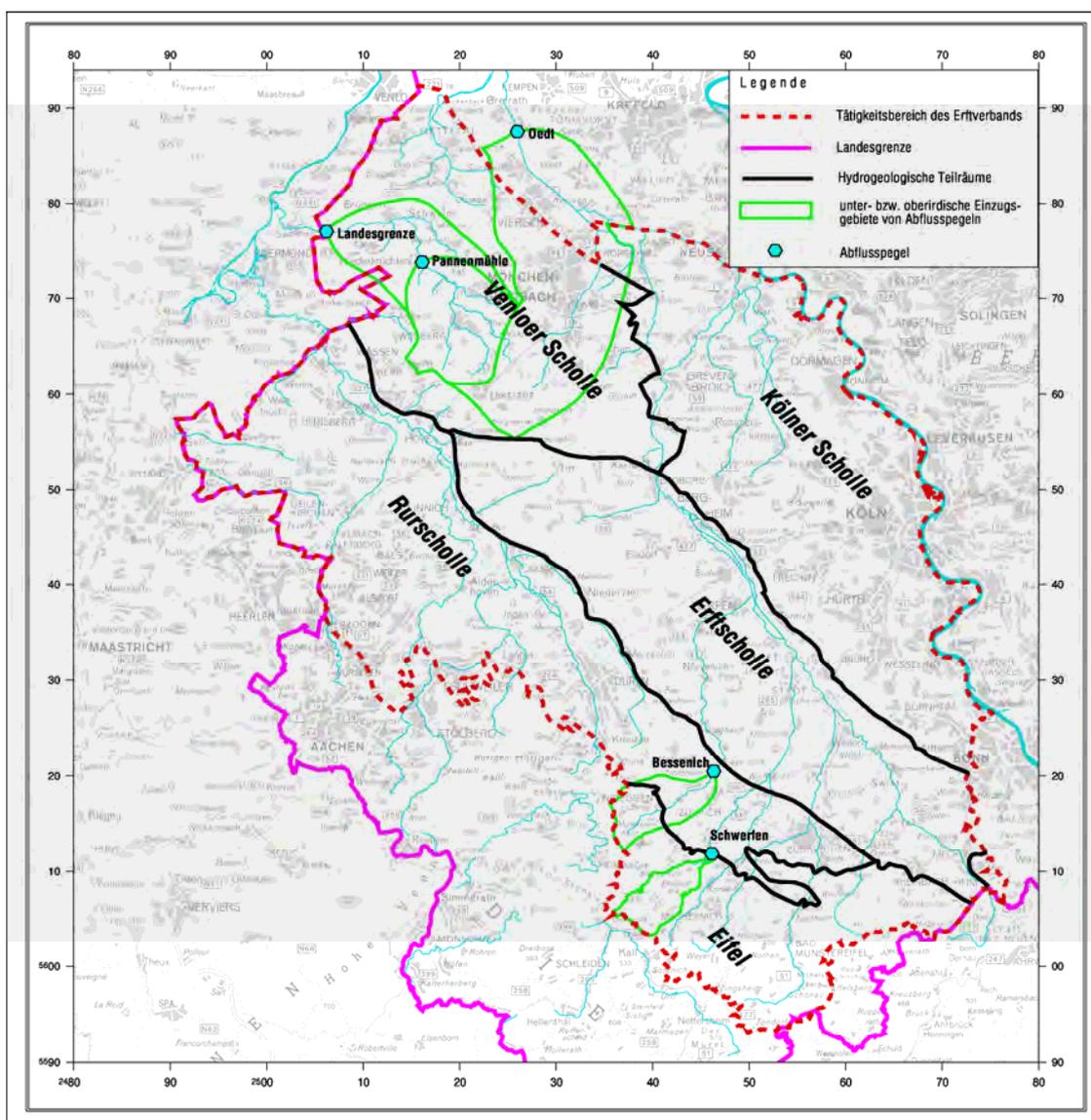


Abbildung 9: Lage der für Validierungszwecke herangezogenen Abflusspegel mit den zugehörigen unbeeinflussten unterirdischen bzw. oberirdischen Einzugsgebieten (Zeitpunkt: 1955).

Tabelle 8: Kenndaten der betrachteten Abflusspegel mit Angabe der Kalibrierungs- und Simulationszeiträume (Wiener-Filter-Verfahren)

Pegel	Einzugsgebiet, unterirdisch 1955 [km ²]	mittl. Basisabfluss [l/s]	Abflussspende [l/(s*km ²)]	Kalibrierungszeitraum	Simulationszeitraum
Pannmühle (Schwalm)	113,3	764,1	6,7	10/1955 - 10/1973	11/1961 - 11/2000
Landesgrenze (Schwalm)	209,6	1226,4	5,9	11/1985 - 10/2009	06/1975 - 06/2000
Oedt (Niers)	353,2	2369,8	6,7	04/1998 - 10/2010	11/1961 - 11/2000
Bessenich (Neffelbach)	50,1	189,9	3,8	12/1978 - 11/2010	02/1972 - 11/2000

Der Ergebnisvergleich der anhand der drei empirischen Berechnungsansätze ermittelten mittleren Grundwasserneubildung mit den simulierten Niedrigwasserabflusspenden für die verwendeten Pegel ist in Abbildung 10 dargestellt.

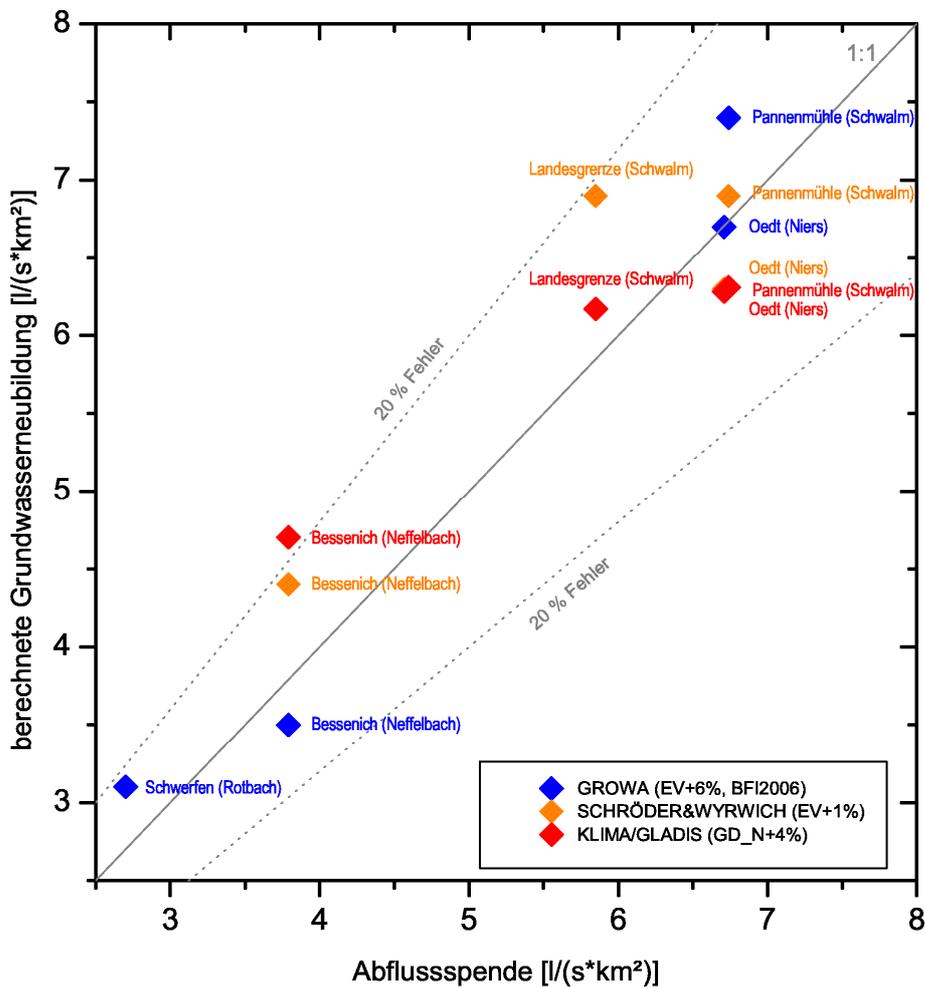


Abbildung 10: Vergleich zwischen berechneter mittlerer Grundwasserneubildung und simulierter bzw. gemessener Niedrigwasserabflussspende

Für den Pegel Pannmühle (Schwalm) ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen aller drei Verfahren mit den simulierten Abflusswerten (Abweichung < 10 %). Für den Schwalm-

pegel an der Landesgrenze weist das SCHRÖDER & WYRWICH-Verfahren Abweichungen von fast 20 % gegenüber dem simulierten natürlichen Niedrigwasserabfluss auf. Hierbei ist zu beachten, dass die simulierten Niedrigwasserabflüsse einen relativ kurzen Zeitraum abdecken (Tabelle 8). Für das Einzugsgebiet des Nierspegel Oedt⁵ zeigen alle drei Verfahren eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Abflussspenden. Die Abweichungen zwischen simulierter Abflussspende und berechneter Grundwasserneubildung für den Pegel Besse nich (Neffelbach) liegen für die Verfahren innerhalb bzw. knapp außerhalb der 20 %-Fehlerschranke.

Das oberirdische Einzugsgebiet des Pegel Schwerfen (Rotbach) liegt im Festgesteinsbereich der Eifel, so dass nur das Verfahren GROWA (EV+6%, BFI2006) betrachtet wurde. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit dem mittleren Niedrigwasserabfluss.

Es zeigt sich, dass alle drei Verfahren in der Lage sind, die gemessenen bzw. simulierten mittleren Niedrigwasserabflüsse an den zu Validierungszwecken herangezogenen Gewässerpegeln zu reproduzieren und damit belastbare Angaben zur Grundwasserneubildung im jeweiligen Einzugsgebiet zu machen.

⁵ Die mit dem Verfahren nach SCHRÖDER & WYRWICH berechnete Grundwasserneubildung deckt nicht das gesamte unterirdische Einzugsgebiet des Pegels Oedt ab, da dieses zum Teil außerhalb des Tätigkeitsbereiches des Erftverbands liegt.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung wurden die im Rheinischen Braunkohlenrevier überwiegend eingesetzten Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten langjährigen Grundwasserneubildung nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990), GROWA (KUNKEL & WENDLAND 2002) und KLIMA/GLADIS (SCHREY 1993) hinsichtlich ihrer methodischen Ansätze und ihrer Berechnungsergebnisse verglichen. Ausgehend von der Eingangsgröße Niederschlag und der Bestimmung flächendifferenzierter Verdunstungshöhen berechnen die Verfahren nach Auftrennung oberirdischer und unterirdischer Abflusskomponenten flächendifferenziert die Grundwasserneubildung als Restglied der Wasserbilanz. Die Ergebnisvergleiche wurden auf hydrogeologische Teilräume (Schollen) und Niederschlagsräume bezogen sowie innerhalb von Einzugs- bzw. Schutzgebieten von Wassergewinnungsanlagen durchgeführt, für die Erfahrungswerte vorliegen. Es wurde ein einheitlicher Referenzzeitraum von 1961 bis 2000 für die Berechnung der Grundwasserneubildung herangezogen. Zudem wurde eine Validierung der Berechnungsergebnisse anhand von Abflussdaten ausgewählter Abflusspegel vorgenommen.

Es zeigt sich, dass alle drei Verfahren auf der Grundlage klimatischer und gebietscharakteristischer Daten überwiegend belastbare Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung liefern. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Berechnungsverfahren und der zum Teil unterschiedlichen Datengrundlagen differieren die Berechnungsergebnisse erwartungsgemäß. Auf der Ebene der hydrogeologischen Einheiten ergeben sich jedoch mit 0,25 bis 0,5 l/(s*km²) nur geringe durchschnittliche absolute Abweichungen. Unter Berücksichtigung möglicher Leakageverluste in tiefere Stockwerke und des Anspruches von Feuchtgebieten oder Fließgewässern kann mit Hilfe der Berechnungsansätze das nachhaltig nutzbare Grundwasserangebot innerhalb eines Untersuchungsgebietes ermittelt werden. Zudem stehen für Grundwassermodellrechnungen flächendifferenzierte Ergebnisse der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung zur Verfügung.

Nach Auffassung der Vertreter der AG Grundwasserneubildung können die im Rahmen dieses Berichtes betrachteten Verfahren nahezu gleichwertig für die Berechnung der mittleren Grundwasserneubildung herangezogen werden. Im Gegensatz zu den Verfahren GROWA und KLIMA/GLADIS beinhaltet der Ansatz nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990) lediglich einen stark vereinfachten Ansatz zur Berechnung der Verlustgröße Verdunstung, so dass hier mit etwas größeren Unsicherheiten zu rechnen ist. Das Verfahren KLIMA/GLADIS liefert streng genommen nur Angaben über die aus der durchwurzelten Bodenzone aussickernde Wassermenge, die eine Abschätzung der Grundwasserneubildung ermöglicht. Interflow-Prozesse unterhalb von 2 Metern werden nicht explizit betrachtet, sondern werden indirekt über den Ansatz von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) abgeschätzt. Allerdings bietet das Modell die beste räumliche und zeitliche Auflösung bedingt durch die Simulation auf Tageswertbasis und feiner aufgelösten ATKIS-Nutzungsdaten. Das Modell GROWA wird in Nordrhein-Westfalen für alle Bilanzbetrachtungen im Zusammenhang mit der EG-Wasserrahmenrichtlinie eingesetzt, damit eine einheitliche Berechnungsgrundlage gewährleistet ist.

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung herangezogenen GROWA- und SCHRÖDER & WYRWICH-Datensätze der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung können als flächendifferenzierte Rasterdaten über den Erftverband kostenfrei bezogen werden. Sie stehen somit als belastbare Eingangsdaten für Bilanzbetrachtungen, Grundwassermodelluntersuchung o. ä. zur Verfügung. KLIMA/GLADIS-Daten können auf Nachfrage beim GD NRW be-

zogen werden.

Die Vertreter der AG Grundwasserneubildung sind der Ansicht, dass die Eingangsdaten der Grundwasserneubildung für die im Rheinischen Braunkohlenrevier verwendeten großräumigen und kleinräumigen Grundwassermodelle (Betreiber: u. a. LANUV NRW, RWE Power AG, Erftverband) möglichst auf einheitlichen Berechnungsgrundlagen basieren sollten. Im Zuge zukünftiger Modellaktualisierungen ist daher eine Überarbeitung und Vereinheitlichung der flächendifferenzierten Eingangsdaten der Grundwasserneubildung zu empfehlen.

Literaturverzeichnis

- [1] ARBEITSGRUPPE BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage, 392 S., 33 Abb., 91 Tab., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- [2] ARBEITSKREIS "GRUNDWASSERNEUBILDUNG" (1982): Ermittlung der Grundwasserneubildung für den nördlichen Teil des Rheinischen Braunkohlenreviers, 290 S., unveröffentlicht.
- [3] BOGENA, H., KUNKEL, R., SCHÖBEL, T., SCHREY, H.-P. & WENDLAND, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen.- Schr.-R. Umw./Envir. Forschungszentr. Jülich, 37, Jülich, 148 S.
- [4] BUCHER, B. (1999): Die Analyse von Grundwasserganglinien mit dem Wiener-Mehrkanal-Filter. Grundwasser, S. 113-118.
- [5] DE VRIES, F., DE GROOT, W.J.M., HOOGLAND, T. & DENNEBOOM, J. (2003): De Bodemkaart von Nederland digital; Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionel informatie. Wageningen, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 811. 48 blz.; 3 tab.; 2 fig.; 11 ref.
- [6] DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate.- Geol. Jb., 27: 45-65.
- [7] DVWK (1984): Berechnungsbedürftigkeit - Berechnungsbedarf. (Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 205), Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg), Hamburg.
- [8] DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. (Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 238), Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg), Bonn.
- [9] ERFTVERBAND (1995): Basisplan III zur Sicherstellung der Wasserversorgung im Bereich des Erftverbands, Bergheim.
- [10] HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evapotranspiration. Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes 8, 3-32, Bad Kissingen.
- [11] HERRMANN, F., JAHNKE, C., JENN, F., KUNKEL, R., VOIGT, H.-J., VOIGT, J. & WENDLAND, F. (2009): Groundwater recharge rates for regional groundwater modelling: a case study using GROWA in the Lower Rhine lignite mining area, Germany, Hydrogeology Journal, 17, 2049-2060.
- [12] KAMPF, J., PLAUL, W., SCHWEBLER, W. (2007): Grundwasserbericht 2007, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Mainz- ISBN 978-3-933123-18-3.
- [13] KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNOQ, ein Beitrag zur Berechnung der Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserflüsse.- Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem. 89-95.
- [14] KÖNGETER, J., BECKER, B., KLAUDER, W. S. (2007): Gekoppeltes Grundwassermodell Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle, Bericht I/2007. Lehrst. u. Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH. Aachen, 2007. – Wiss. Unters. i. A. d. Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen.
- [15] KUNKEL, R. & WENDLAND, F. (2002): The GROWA98 Model for Water Balance Analysis in Large River Basins – the River Elbe Case Study. J. Hydrol., 259, 152-162.

- [16] MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 193.
- [17] NEUMANN, J. (2009): Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland : Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu. Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. - Stuttgart : Schweizerbart, 2009.
- [18] RENGER, M., STREBEL, O. & GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten 1. Bericht: Berechnungsbedürftigkeit.- Z. f. Kulturtechnik u. Flurbereinigung 15, H.3: 148-160.
- [19] RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194.
- [20] RWE POWER AG (2007): Grundwassermodell für das Rheinische Braunkohlenrevier – Modellbericht.- Köln (unveröffentlicht).
- [21] SCHREY, H. P. (1993): Simulation des Bodenwasserhaushaltes auf der Grundlage der digitalen Bodenkarte 1:50.000 in NRW. In: Grundwasserneubildung aus Niederschlag, LfU-Schriften, Reihe Grundwasserüberwachungsprogramm, Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg, Abt. IV – Wasser, Karlsruhe.
- [22] SCHROEDER, M. & WYRWICH, D. (1990): Eine in Nordrhein-Westfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung.- DGM, 34 (1/2): 12-16.
- [23] TETZLAFF, B., KUNKEL, R., TAUGS, R. & WENDLAND, F. (2004): Grundlagen für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in der Metropolregion Hamburg.- Schr.-R. Umw./Envir. Forschungszentr. Jülich, 46, Jülich, 87 S.
- [24] TETZLAFF, B., KREINS, P., KUNKEL, R. & WENDLAND, F. (2008A): Area-differentiated modelling of P-fluxes in heterogeneous macroscale river basins. Water Sci. Technol., 55(3), 123 - 131.
- [25] TURC, L. (1954): Calcul du bilan de l'eau evaluation en fonction des precipitations et des temperatures. Publ. No. 37 des I/Association International d'Hydrology, Assemblée Générale de Rome, Tome III, 188-202.
- [26] US SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): National Engineering Handbook (Chapter 4: Hydrology).- 2. Aufl., Washington D.C.
- [27] WENDLAND, F., KREINS, P., KUHR, P., KUNKEL, P., TETZLAFF B. & VERECKEN, H. (2010): Räumlich differenzierte Quantifizierung der N- und P-Einträge in Grundwasser und Oberflächengewässer in Nordrhein-Westfalen unter besonderer Berücksichtigung diffuser landwirtschaftlicher Quellen . Schr.-R. Umw./Envir. Forschungszentr. Jülich, 88, Jülich, 216 S. <http://hdl.handle.net/2128/4313>.
- [28] WENDLING, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. Wasserwirtschaft 85, 602-604.
- [29] WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: Grahamm, R.: Die Grundwässer von Deutschland und ihre Nutzung.- Forsch. Deut. Landeskunde, 104: 47-54.

Anlage 1: Mitglieder der Arbeitsgruppe Grundwasserneubildung

Institution	Person	E-Mail-Adresse
LANUV NRW, Recklinghausen	Dorothee Levacher	dorothee.levacher@lanuv.nrw.de
Geologischer Dienst NRW, Krefeld	Dr. Thomas Schöbel	thomas.schoebel@gd.nrw.de
Bezirksregierung Köln	Helmuth Schröter	helmuth.schroeter@bezreg-koeln.nrw.de
Bezirksregierung Düsseldorf	Hans-Jürgen Ferdian	hans-juergen.ferdian@brd.nrw.de
Forschungszentrum Jülich GmbH, IBG-3, Jülich	Dr. Frank Herrmann	f.herrmann@fz-juelich.de
RWE Power AG, Köln	Yvonne Reinisch	yvonne.reinisch@rwe.com
	Udo Junghans	udo.junghans@rwe.com
Ertfverband, Bergheim	Stefan Simon	stefan.simon@ertfverband.de
	Dr. Renate Jaritz	renate.jaritz@ertfverband.de
	Dr. Tilo Keller	tilo.keller@ertfverband.de

Anlage 2: Ermittlung des Jahresniederschlags im Tätigkeitsbereich des Erftverbands

Ausgangssituation

Für die Ableitung von Grundwasserneubildungsraten werden flächendifferenzierte Summen des Jahres- und Halbjahresniederschlags benötigt. Bislang liegt beim Erftverband der räumlich differenzierte und zeitlich gemittelte Gebietsniederschlag für den Zeitraum von 1971 bis 1990 als langjähriger Vergleichswert vor. Grundlage waren ca. 300 Niederschlagsstationen, die allerdings nicht alle den gesamten Zeitraum abdeckten. Die tatsächlich berücksichtigten Messstationen und die verwendete Methodik sind heute nicht mehr vollständig rekonstruierbar. Da die 1970er Jahre überdurchschnittlich trocken waren, ist zudem davon auszugehen, dass die berechneten Summen das langjährige Mittel unterschätzen.

Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) liegen nach dem REGNIE (Regionalisierung von Niederschlagshöhen) - Verfahren für ganz Deutschland berechnete Gebietsniederschlagshöhen im 1 x 1 km Raster vor. Grundlagen für REGNIE sind die DWD-Stationen sowie Hintergrundfelder des Niederschlags, die an Hand von Gebietseigenschaften (Höhe, geografische Lage, Exposition) ermittelt wurden. Die große Anzahl der im Untersuchungsgebiet liegenden, nicht zum DWD-Messnetz gehörenden Niederschlagsstationen gehen nicht in REGNIE ein.

Im Rahmen der flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung im Rheinischen Braunkohlenrevier wurde daher eine neue Auswertung der langjährigen Niederschlagssummen durchgeführt. Dabei sollten einerseits die vorhandenen Niederschlagsdaten berücksichtigt werden. Gleichzeitig sollte überprüft werden, ob die Nutzung von Höhen- und Lageinformationen bei der Regionalisierung bessere Ergebnisse als eine einfache entfernungs-gewichtete Interpolation liefert.

Methodik

Stationsauswahl

Für jedes Jahr zwischen 1961 und 2010 wurde folgendermaßen vorgegangen

- (1) Selektion aller in diesem Jahr lückenfrei vorliegenden Stationen
- (2) Berechnung der Entfernung jeder Station zu ihren drei nächsten Nachbarn und Ermittlung der Differenzen der Jahresniederschlagssummen zu diesen Vergleichsstationen.
- (3) Entfernung von Stationen mit deutlichen negativen Abweichungen oder unplausiblen Werten
- (4) Interpolation und Visualisierung des Gebietsniederschlags des Jahres.

Die Schritte 2-4 wurden dabei mehrfach durchlaufen. Ergebnis war eine Liste der für die einzelnen Jahre zu verwendenden Stationen. Es liegen also für die verschiedenen Jahre jeweils unterschiedlich viele Stationen vor.

Lineare Regression

Um die Abhängigkeit der mittleren Jahresniederschläge von der Höhe und den Lagekoordinaten zu erfassen, wurde eine lineare Regression durchgeführt. Damit sollte herausgefunden werden, ob ein Zusammenhang zwischen den unabhängigen Parametern des Geländemodells und den mittleren Jahressummen der Niederschlagsstationen besteht. Der

Informationsgehalt der Geländeparameter kann dann in einem zweiten Schritt bei der Interpolation der Stationsdaten berücksichtigt werden.

Zur Ermittlung der Regressionsgleichung wurden insgesamt 226 Stationen verwendet. Stationen in deutlicher Entfernung zum Tätigkeitsbereich blieben unberücksichtigt, um die Niederschlags – Lagebeziehung auf das Tätigkeitsgebiet zu fokussieren. Als abhängige Variable wurde für die Regression die mittleren Jahresniederschläge über 10 Jahre verwendet. Für jedes Jahr wurden daher nur Stationen berücksichtigt, die in den nächsten 10 Jahre im Rahmen der Vorauswahl akzeptiert wurden. Aus einem Höhenmodell wurden für die ausgewählten Stationen verschiedene Parameter extrahiert:

- X: Rechtswert
- Y: Hochwert
- Z: Geländehöhe
- logZ: Logarithmus der Geländehöhe
- Z²: Quadrat der Geländehöhe
- SLOPE: Hangneigung
- log SLOPE: Logarithmus der Hangneigung
- KRUEMM: Krümmung
- ASPECT: Exposition
- RAU10: Variation der Höhe in der Umgebung (Rauhigkeitsparameter)
- LUV: Abweichung der Exposition von der Hauptwindrichtung

Interpolation

Für die Interpolation wurde für jedes Jahr folgendermaßen vorgegangen (Abb. A1):

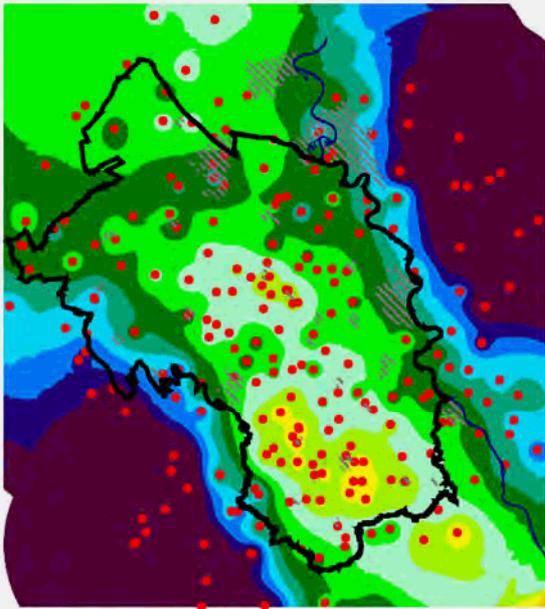
- (1) Interpolierte Messung (IDW): Entfernungsgewichtete lineare Interpolation der gemessenen Jahresniederschläge der berücksichtigten Stationen (IDW-Verfahren)
- (2) Regression: Flächendeckende Berechnung des geschätzten Niederschlags aus der linearen Regressionsgleichung sowie aus Mittelwert und Standardabweichung der Niederschlagsstichprobe des entsprechenden Jahres
- (3) Differenzinterpolation: Berechnung der Differenz zwischen Regression (2) und Messung (1) punktuell an den Stationen und Interpolation dieser Differenzen nach dem IDW-Verfahren
- (4) Merging: Bildung der Differenz zwischen Regression (2) und den interpolierten Differenzen (3).

Diese Vorgehensweise gewährleistet sowohl die exakte Wiedergabe der gemessenen Jahressummen an den Stationsstandorten als auch die Berücksichtigung der über die lineare Regression ermittelten lageabhängigen Strukturen zwischen den Stationen.

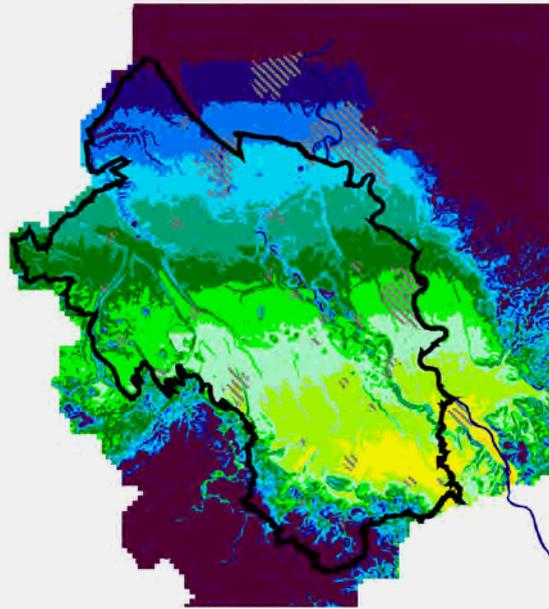
Validierung der Interpolation

Zur Analyse der beiden Interpolationsmethoden IDW und Merging sowie einem gewichteten Mittel zwischen beiden Verfahren wurde eine Kreuzvalidierung durchgeführt. Dabei wurde in jedem zweiten Jahr zwischen 1961 und 2010 bis zu 10% der für die Analyse herangezogenen Stationen weggelassen, die Interpolationen mit den verbliebenen Stationen durchgeführt und der Interpolationswert mit dem Messwert verglichen. Die Auswahl der Validierungsstationen erfolgte zufällig.

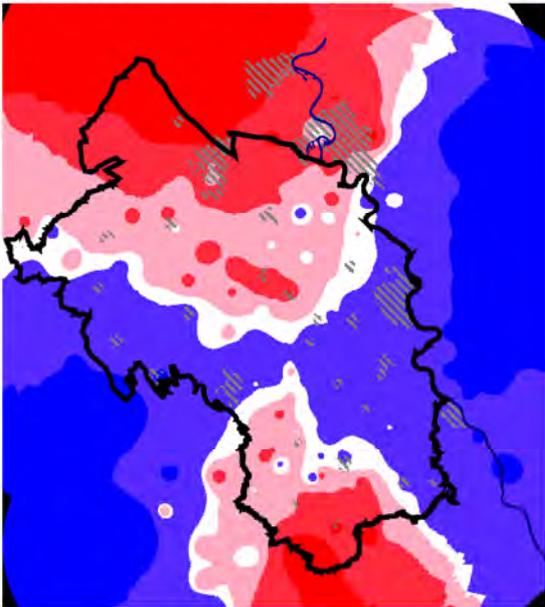
(1) Interpolation (IDW)



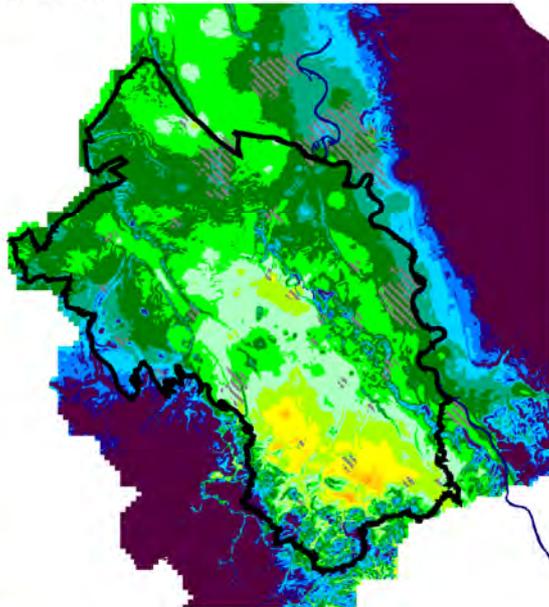
(2) Regression



(3) Differenz - Interpolation



(4) Merging



Differenz (Regression - Messung) [mm]



Jahresniederschlagssumme [mm]



Abb. A1: Vorgehensweise bei der Interpolation am Beispiel des Jahres 1983

Ergebnisse

Stationsauswahl

Erstes Zwischenergebnis ist eine Liste der berücksichtigten Stationen über die Jahre. Insgesamt wurden 347 verschiedene Stationen verwendet (Abb. A2).

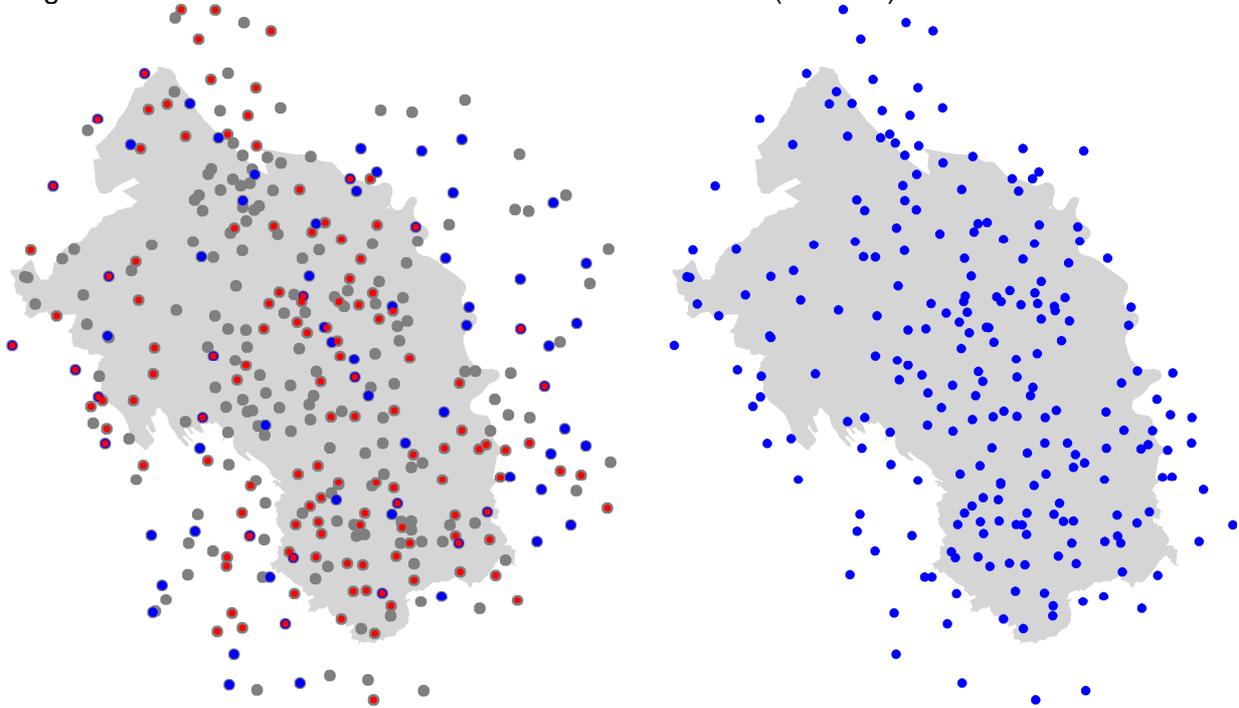


Abb. A2: Links: Insgesamt verwendete Stationen (grau), Stationen 1960 (blau) und 2010 (rot). Rechts: Für die Regression verwendete Stationen

Tabelle A1 verdeutlicht die Veränderung des Stationsmessnetzes über die 50 analysierten Jahre. Demnach stieg die Anzahl der verwendeten Stationen von Anfangs unter 70 (davon ca. 60 DWD - Stationen) bis zu einem Maximalwert von 233 Stationen (1991) und sank seither auf aktuell 134 Stationen (davon 23 DWD Stationen). Die Angaben des mittleren Rechtswertes der verwendeten Stationen zeigt, dass das Stationsnetz im Lauf der Zeit im Mittel leicht nach Westen verlagert wurde, gleichzeitig sank auch die mittlere Höhe. Ursache ist zum einen die sukzessive Einstellung einiger der am höchsten gelegenen Stationen v.a. des DWD, zum anderen die Zunahme von Stationen des Erftverbands, die häufig in den tieferen Lagen des Erftinzugsgebietes (Kläranlagen) lagen. Weiterhin verdeutlicht die Tabelle die relativ feuchten 60er Jahre und die überdurchschnittlich trockenen 70er Jahre.

Tabelle A1 : Stichprobe der Stationen in den Dekaden 1960 - 2010

Dekade	Mittlere Anzahl an Stationen	Mittlerer Rechtswert der Stationen	Mittlere Höhe der Stationen	Mittlerer Jahresniederschlag der Stationen
1961-1970	93	2546340	154,4	816
1971-1980	152	2546275	151,4	667
1981-1990	209	2543827	146,8	776
1991-2000	224	2543231	149,1	755
2001-2010	161	2543047	141,9	759

Lineare Regression

Abb.A2 (rechts) zeigt die in die lineare Regression mindestens einmal mit ihrem mittleren 10-Jahresniederschlag eingegangenen 226 Stationen. Insbesondere die Stationen im Bergischen Land wurden nicht berücksichtigt.

Die höchste Korrelation der mittleren 10-Jahresniederschläge ergab sich zum Quadrat der Geländehöhe ($r^2=0,21$). Die lineare Regression über alle 10-Jahres Mittel im Zeitraum 1961-2009 ergab die folgende Regressionsgleichung:

$$\langle N \rangle = 0,809 \langle Z^2 \rangle + 0,743 \langle Y \rangle + 0,258 \langle RAU10 \rangle \quad (1)$$

wobei

$$\langle X \rangle = \frac{X - \bar{X}}{\sigma} \quad (X = N, Z^2, Y, RAU10)$$

die mit Mittelwert (\bar{X}) und Standardabweichung (σ) z-standardisierte Variable ist. Insgesamt erwies sich die Regressionsgleichung über den betrachteten Zeitraum als zeitlich relativ stabil, d.h. die Regressionsanalyse ergab ähnliche Ergebnisse, wenn nicht der gesamte Zeitraum sondern nur einzelne 10-Jahresmittel analysiert wurden.

Ergebnis der Regression sind Schätzungen des z-standardisierten Niederschlags. Die Ent – Standardisierung erfolgt über den Mittelwert und die Standardabweichung der für das Jahr verwendeten Niederschlagsstationen. Somit ergibt die Regression eine Schätzung der räumlich differenzierten Niederschlagssumme eines Jahres aus dem mittleren Niederschlag, der räumlichen Variabilität und dem Wissen über die mittleren Zusammenhänge mit den Lage bzw. Höhenparametern. Insgesamt erklärt die Regression ca. 50% der Varianz der gemessenen mittleren 10-Jahressummen.

Mittlerer Fehler der jährlichen Niederschlagsschätzung

Abbildung A3 zeigt das Bestimmtheitsmaß für die Stichproben, also zwischen den Jahresniederschlagssummen der Stationen und den nach der Regressionsgleichung geschätzten Werten von 1961 bis 2010. Weiterhin ist der mittlere prozentuale Fehler dargestellt. Demnach liegt die über die Lageparameter erklärbare Varianz bis zum Jahr 2000 bei ca. 50% und fällt dann auf ca. 30%. Ursache ist wiederum die Einstellung einiger der am höchsten gelegenen DWD-Stationen. Gleichzeitig sinkt aber auch der mittlere Fehler der Schätzung gegenüber der Messung.

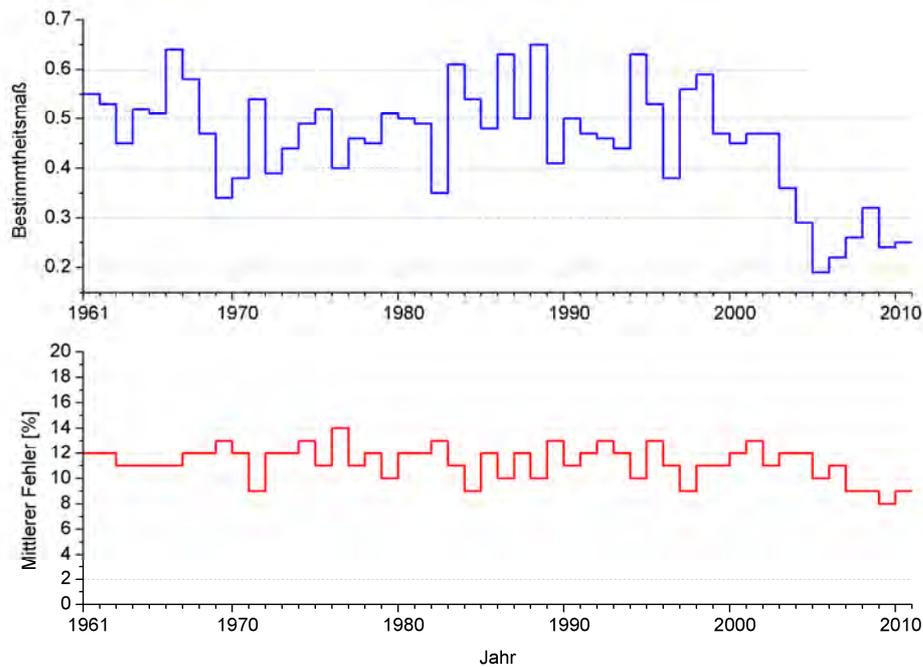


Abb. A3: Bestimmtheitsmaß (oben) und mittlerer prozentualer Fehler (unten) zwischen den mittleren Jahressummen der Stationen und den Schätzwerten nach Gleichung (1)

Validierung

Tabelle A3 zeigt das Ergebnis der Validierung. Aufgelistet sind die gemessenen mittleren Niederschlagssummen an den Validierungsstationen für die einzelnen Dekaden sowie die mittleren Schätzungen nach dem IDW- und nach dem Mergingverfahren. Weiterhin ist ein gewichtetes Mittel zwischen dem IDW- und dem Mergingverfahren („Gewichtet“) aufgeführt, wobei sich das Gewicht für jedes einzelne Jahr aus dem Korrelationskoeffizient zwischen der Niederschlagssumme der Stationen und dem über die Regression geschätzten Niederschlag ergibt. Dieses Gewicht trägt der Niederschlagscharakteristik des entsprechenden Jahres Rechnung, bei hoher Korrelation zwischen Niederschlagssumme und den Geländeparametern steigt der Einfluss der Geländeparameter bei der Interpolation, während bei geringerem Zusammenhang der einfache entfernungsgewichtete Niederschlag ein höheres Gewicht erhält. Da sich hohe positive und negative Abweichungen der Schätzung für einzelne Stationen ausgleichen können, sind darüber hinaus die mittleren absoluten Fehler für die Methoden IDW, Merging und dem gewichteten Mittel angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Merging- gegenüber dem IDW-Verfahren nicht besser abschneidet. Nur in der 60er Jahren, als die Interpolation mit noch relativ wenigen Stationen ausgeführt wurde, ist der mittlere absolute Fehler im Vergleich zum IDW-Verfahren geringer. Die gewichtete Mittelung zwischen IDW und Mergingverfahren zeigt etwas geringere mittlere Abweichungen zu den Messwerten. Insgesamt liegt der mittlere Fehler der Schätzung bei den Verfahren im Mittel bei 6 – 7 % der Messung. In einzelnen Jahren beträgt der Fehler bis zu 10%, einzelne Stationen in einem Jahr zeigen Abweichungen bis zu 28%.

Tabelle A3: Ergebnis der Kreuzvalidierung (n: Anzahl der Validierungsstationen)

Jahr	n	Niederschlag [mm]				Mittlerer Fehler [mm]		
		Messung	IDW	Merging	Gewichtet	IDW	Merging	Gewichtet
1961-1970	54	708	738	729	734	55.7	52.6	53.4
1971-1980	71	619	610	620	615	44.5	45.2	43.2
1981-1990	109	678	686	694	690	41.7	53.3	43.8
1991-2000	93	730	728	733	731	44.5	48.5	43.5
2001-2010	83	734	723	739	729	37.7	40.8	33.9
1961-2010	410	694	697	703	700	44.8	48.1	43.6

Gebietsmittelwerte

Tabelle A4 zeigt die nach den verschiedenen Verfahren ermittelten mittleren Jahresniederschlag für das Tätigkeitsgebiet im Vergleich zu früheren Analysen. Die Ergebnisse der bisherigen Erftverbandsanalyse (EV1) für den Zeitraum 1971 bis 1990 werden dabei bestätigt. Der REGNIE – Werte für den Zeitraum 1961 – 2000 liegen dagegen deutlich höher als die hier ermittelten Werte und im Bereich der aus der Regressionsgleichung und Mittelwert und Standardabweichung der gesamten Stichprobe geschätzten mittleren Jahressumme (EV-2011 Reg). Im räumlichen Mittel ist der Unterschied zwischen IDW- und Mergingverfahren gering (Abb. A4), kleinräumig treten aber insbesondere im Bereich der Nordeifel erhebliche Differenzen auf (Abb. A5).

Tabelle A4: Gebietsmittelwerte (Tätigkeitsbereich)

	REGNIE	EV1	EV-2011 (IDW)	EV-2011 (Merge)	EV-2011 (Gewichtet)	EV-2011 (Reg)
1961-1970			740	738	739	778
1971-1980			615	616	615	642
1981-1990			712	717	715	747
1991-2000			698	704	701	724
2001-2010			719	720	719	722
1971-1990		667	664	666	665	695
1961-2000	720		691	694	693	723

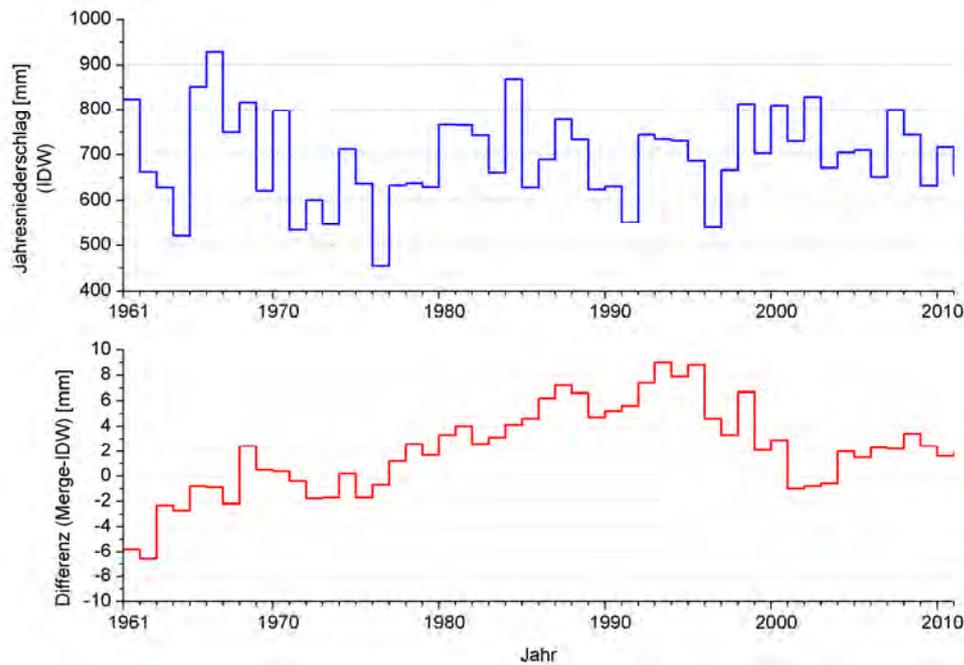


Abb. A4 Niederschlagssummen (Merging 1961-2009) und Differenz zwischen Merging und IDW

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass der langjährige Jahresniederschlag im Tätigkeitsgebiet des Erftverbandes eine Lage- und Höhenabhängigkeit aufweist. Demnach nimmt der Niederschlag tendenziell mit der geografischen Breite und der Höhe über dem Meeresspiegel zu. Sind mittlerer Jahresniederschlag eines Jahres und die räumliche Varianz bekannt, kann an Hand dieser Abhängigkeit der Jahresniederschlag der Stationen geschätzt werden. Der mittlere Fehler liegt dabei für die einzelnen Jahre zwischen 8 und 14 %.

Das Mergingverfahren ermöglicht es, diesen Zusammenhang für die Ermittlung des Gebietsniederschlags zu nutzen und gleichzeitig die an den Stationen gemessenen Werte zu reproduzieren. Das Verfahren wird in ähnlicher Weise zur Aneicherung von Radardaten an Stationsmessungen verwendet. Im Vergleich zu den reinen IDW - Interpolationen ergeben sich damit auch zwischen den Stationen Strukturen, die die Höhen- und Lageabhängigkeit des Gebietes berücksichtigen. Die Ergebnisse wirken daher optisch realistischer als die rein entfernengewichteten Mittelungen des IDW-Verfahrens.

Die Validierung zeigt allerdings, dass mit der Berücksichtigung der mittleren Lage- und Höhenabhängigkeit des Niederschlags über das Mergingverfahren keine Verbesserung im Vergleich zur IDW-Interpolation erreicht wird. Nur in der ersten Dekade (1961–1970) ergibt das Mergingverfahren – wahrscheinlich auf Grund der noch relativ geringen Stationsdichte - im Vergleich zu IDW einen geringeren mittleren Fehler der geschätzten Jahresniederschlagssumme einer Station.

Ursache ist, dass die Regressionsfunktion nur den mittleren zeitlichen und räumlichen Zusammenhang zwischen den Geländeparametern und den Jahresniederschlagssummen aufzeigt. Kleineräumige Besonderheiten werden daher nicht erfasst, ebenso wenig wie Zufälligkeiten im Niederschlagsverlauf, die in einzelnen Jahren den generellen Zusammenhang zu den Lageparametern überprägen können. Diese räumlichen und zeitlichen Abweichungen vom generellen Zusammenhang zwischen Lage und Niederschlagsmenge können von einem einfachen Interpolationsverfahren (IDW) bei einer ausreichenden Stationsdichte besser reproduziert werden als über die Schätzung unter Berücksichtigung des Geländeeinflusses. Ein einfaches Maß für den Grad der jährlichen zufälligen

Abweichung zu den aufgrund der Geländeparameter erwarteten Jahresniederschlagsverteilung ist der Korrelationskoeffizient zwischen den Messungen an den Stationen und den Schätzungen über die Regressionsgleichung. Daher ist eine gewichtete Mittelung zwischen IDW- und Mergingverfahren gerechtfertigt: Das IDW-Verfahren wird dabei bei geringen Korrelationskoeffizienten (Jahren mit hohem Anteil an „zufälligen“ Ereignissen) stärker gewichtet, das Merging Verfahren dann, wenn es sich um eher „typische“ Jahre im Sinne der Regressionsanalyse handelt.

Insgesamt sind die Unterschiede zwischen Merging- und IDW-Verfahren aber im überwiegenden Bereich des Untersuchungsgebietes und vor allem im räumlichen Mittel gering. Nach den Ergebnissen der Validationsuntersuchung ist die einfache IDW-Interpolationen daher für die Ableitung der Grundwasserneubildung ausreichend. Deutlich höher sind demgegenüber die Differenzen der durchgeführten Interpolationen zu den REGNIE - Daten. Diese basieren wiederum auf einer vergleichsweise geringen Stationsanzahl und sind demnach stark von den Hintergrundfeldern abhängig, die ähnlich wie bei der durchgeführten Regression den Zusammenhang mit Lage- und Höhenparametern berücksichtigen, allerdings für einen deutlich größeren räumlichen Bereich. Der Vergleich zu der hier mit zahlreichen zusätzlichen Stationen durchgeführten Untersuchung legt die Vermutung nahe, dass diese Zusammenhänge für den Untersuchungsraum nicht optimal sind.

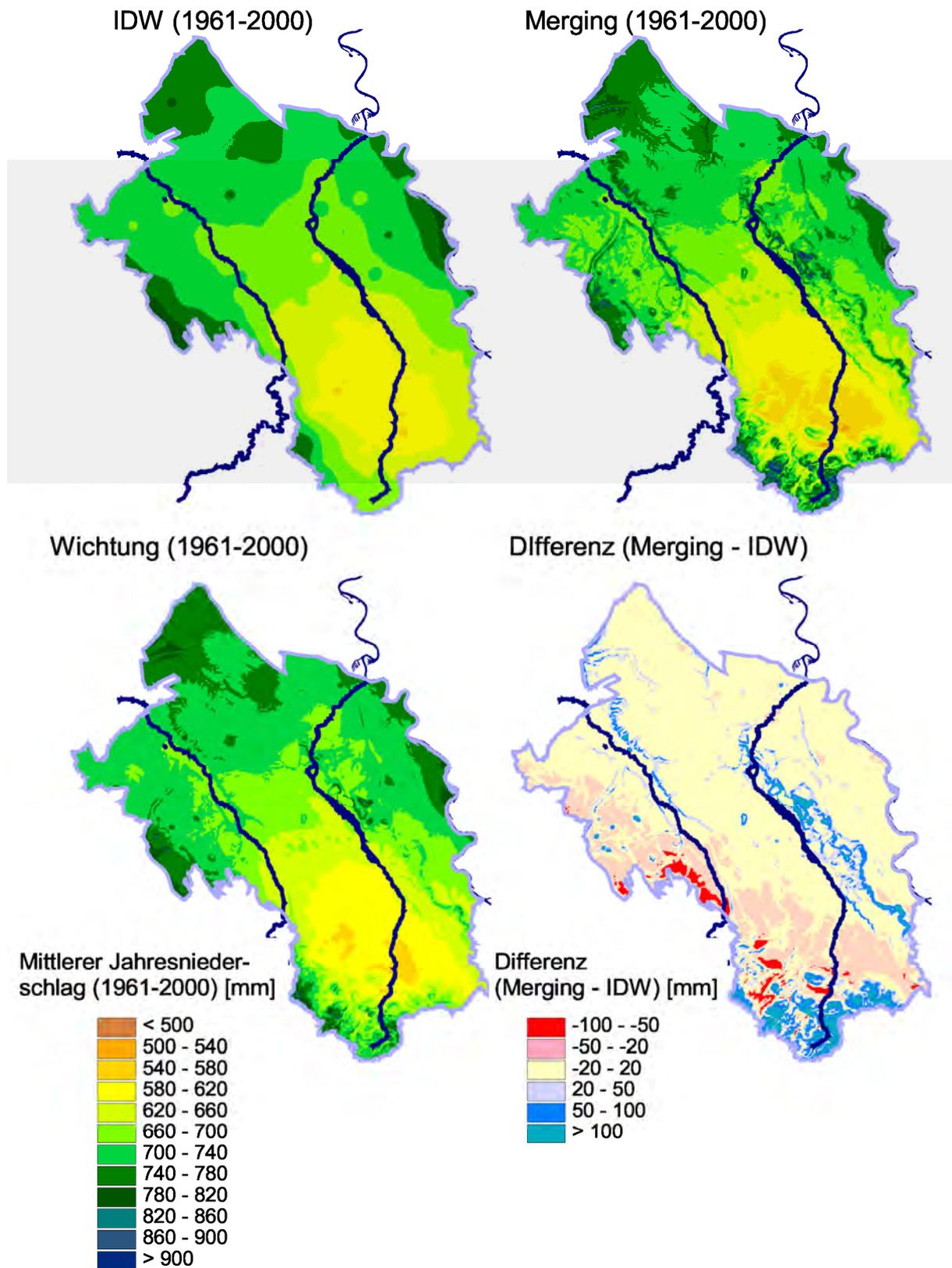
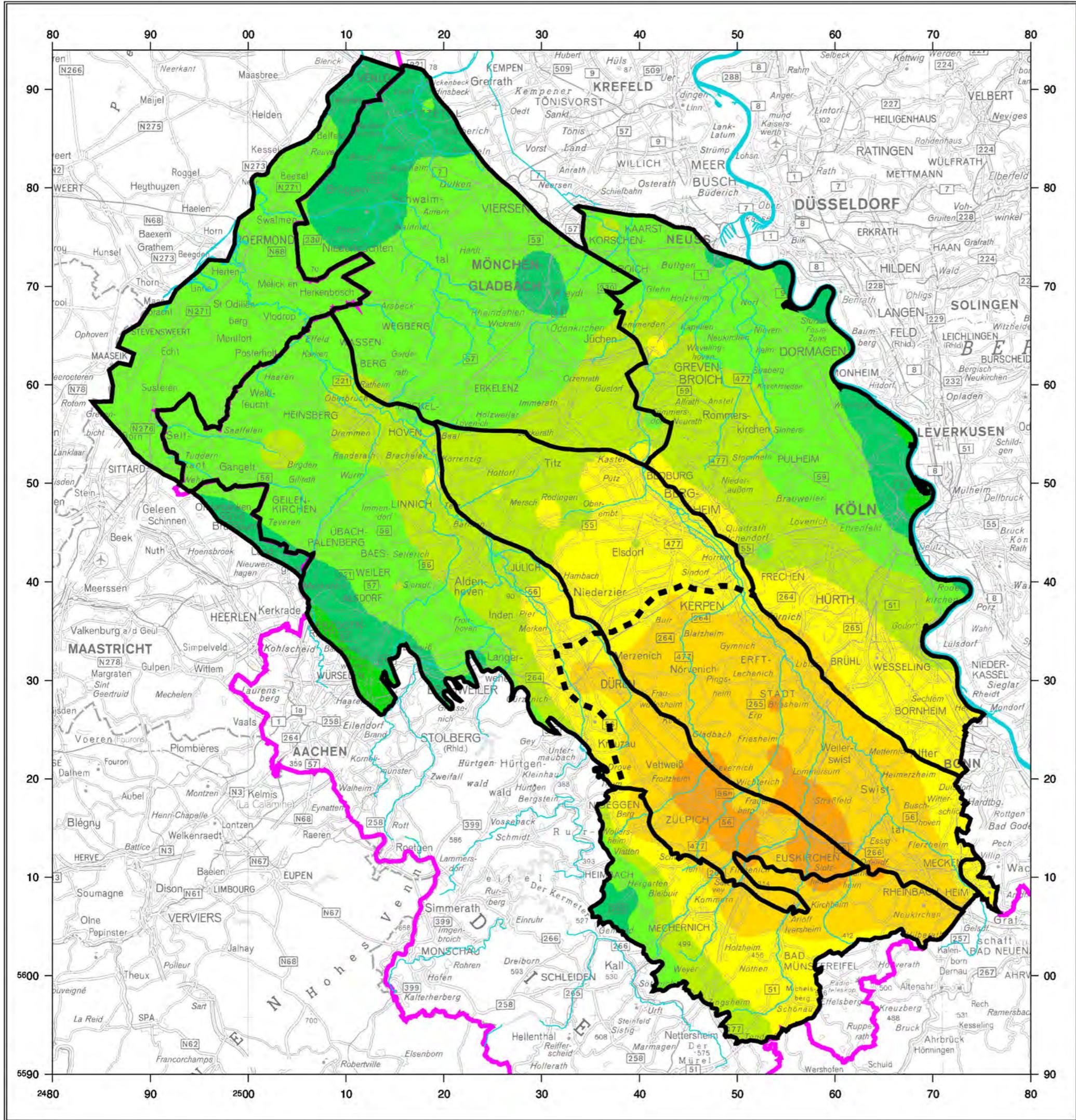
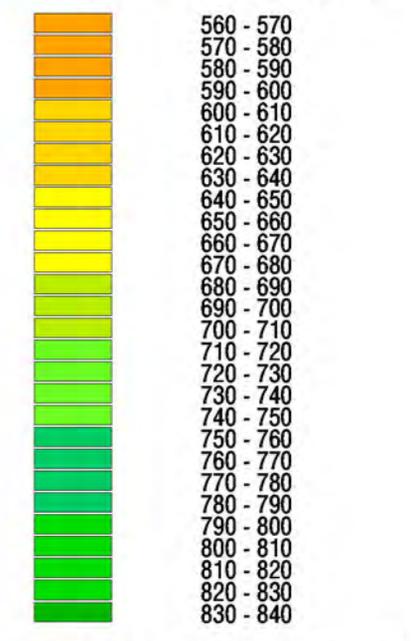


Abb. A5: Mittlerer Gebietsniederschlag (1961-2000): Oben links: Interpolierte Messungen, oben rechts: Merging, unten links: gewichtetes Mittel zwischen IDW und Merging, unten rechts: Differenz Merging-IDW.



- Legende**
- Landesgrenze
 - Hydrogeologische Teilräume
 - Trennlinie zwischen Niederschlagsräumen

mittlere Jahresniederschlagshöhe (mm/a, 1961 - 2000, unkorrigiert)

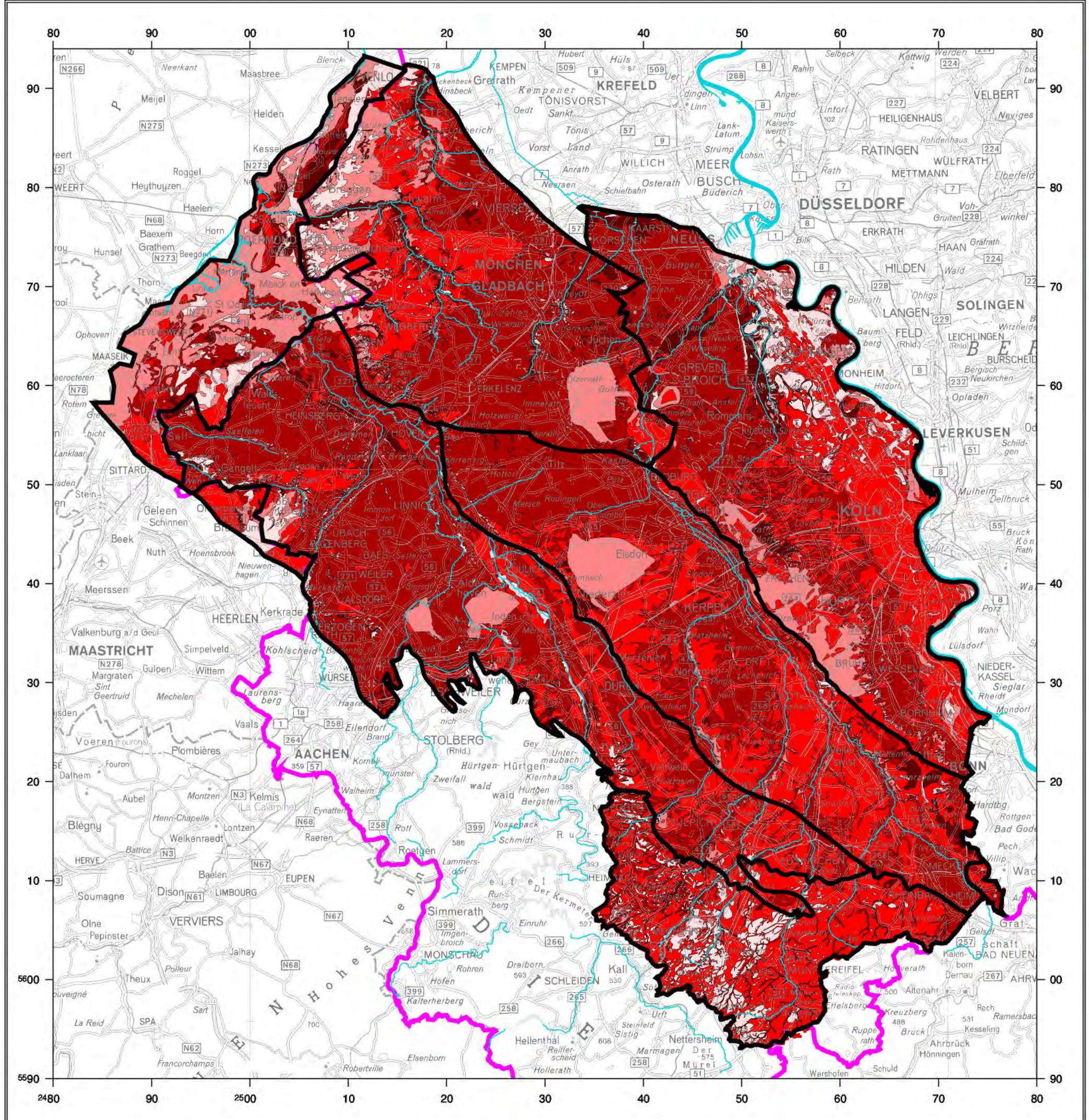


(Quelle: Ertfverband, vgl. Anlage 2)

AG Grundwasserneubildung

Mittlere Jahresniederschlagshöhe im Tätigkeitsbereich des Ertfverbands (1961 - 2000, unkorrigiert) und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden

Anlage 3
06/2012



Legende

— Landesgrenze

— Hydrogeologische Teilräume

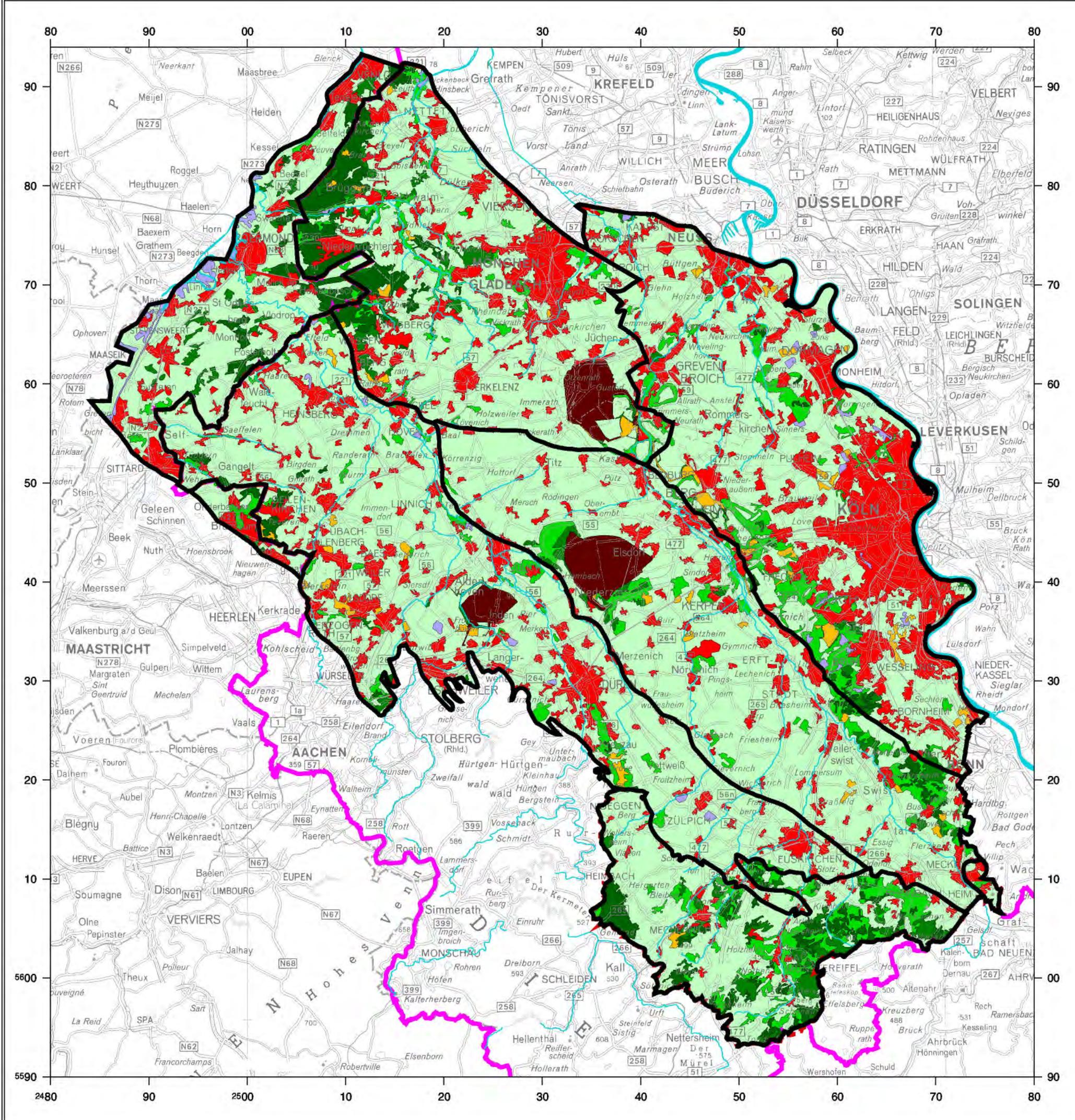
Bodengruppen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)

- Bodengruppe 1
- Bodengruppe 2
- Bodengruppe 3
- Bodengruppe 4
- Bodengruppe 5



AG Grundwasserneubildung

Bodengruppen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
im Tätigkeitsbereich des Erftverbands
und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden



Legende

- Landesgrenze
- Hydrogeologische Teilräume

Landnutzungsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)

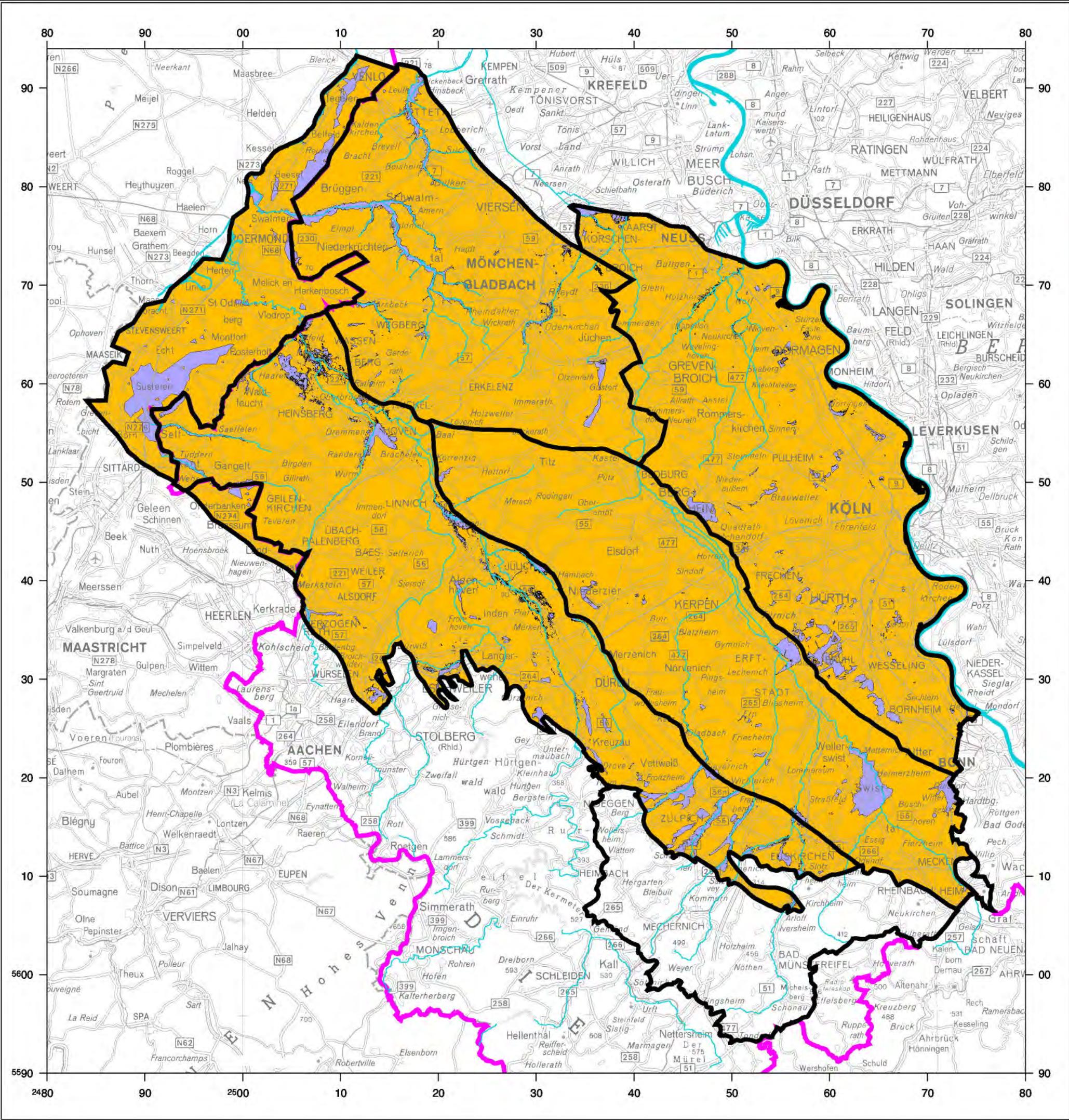
- Acker, Grünland
- Laubwald
- Mischwald
- Nadelwald
- Stadt, Industrie, Wohnfläche
- Wasserflächen
- Tagebau
- unbekannt

Ertf Verband

AG Grundwasserneubildung

Landnutzungsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
im Tätigkeitsbereich des Ertfverbands
und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden

Anlage 5	06/2012
----------	---------



Legende

- Landesgrenze
- Hydrogeologische Teilräume

Flurabstandsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)

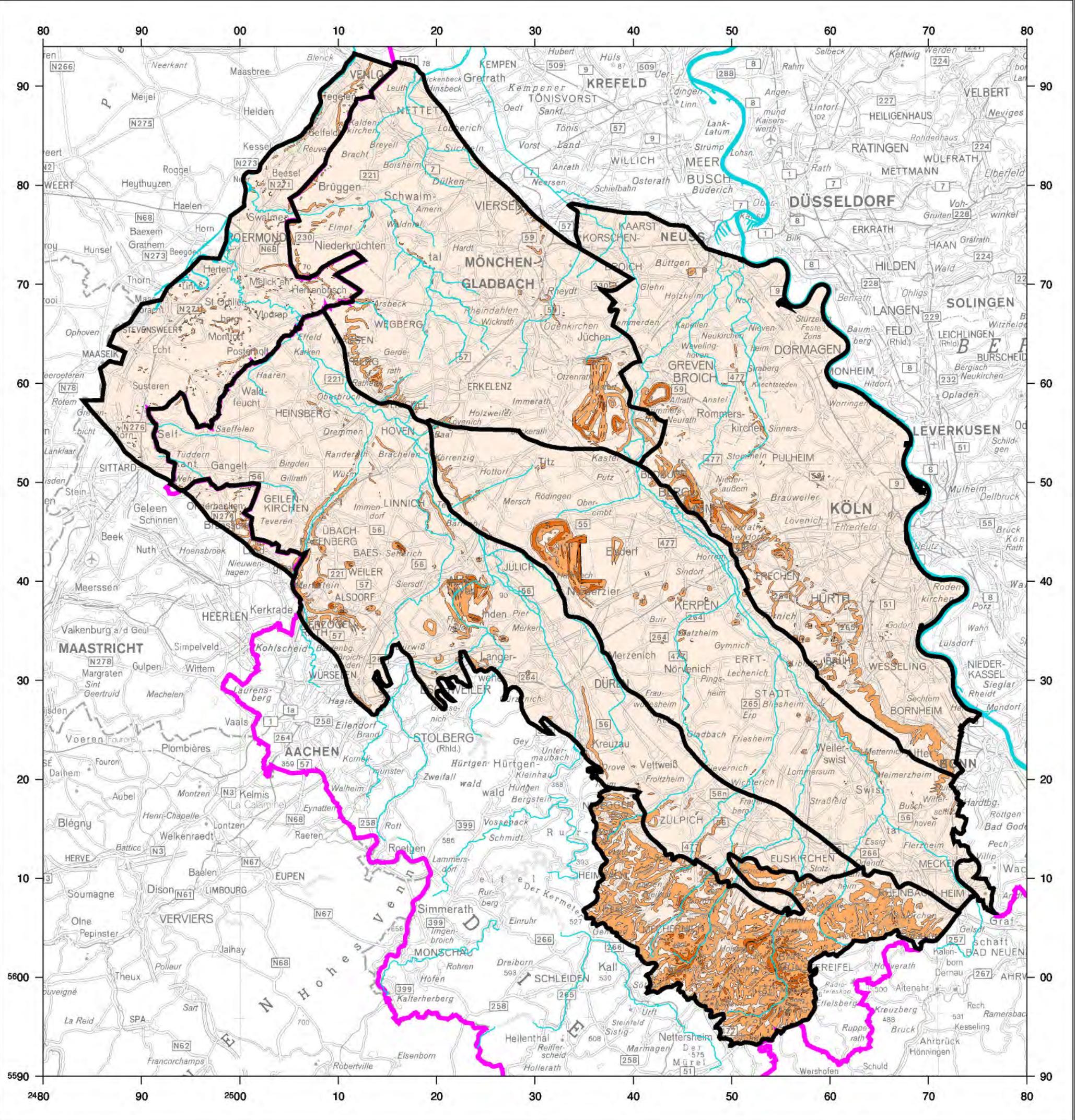
- <math>< 1.2\text{ m}</math>
- $\ge 1.2\text{ m}$

Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

Flurabstandsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
im Tätigkeitsbereich des Erftverbands
und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden

Anlage 6
06/2012



Legende

- Landesgrenze
- Hydrogeologische Teilräume

Hangneigungsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)

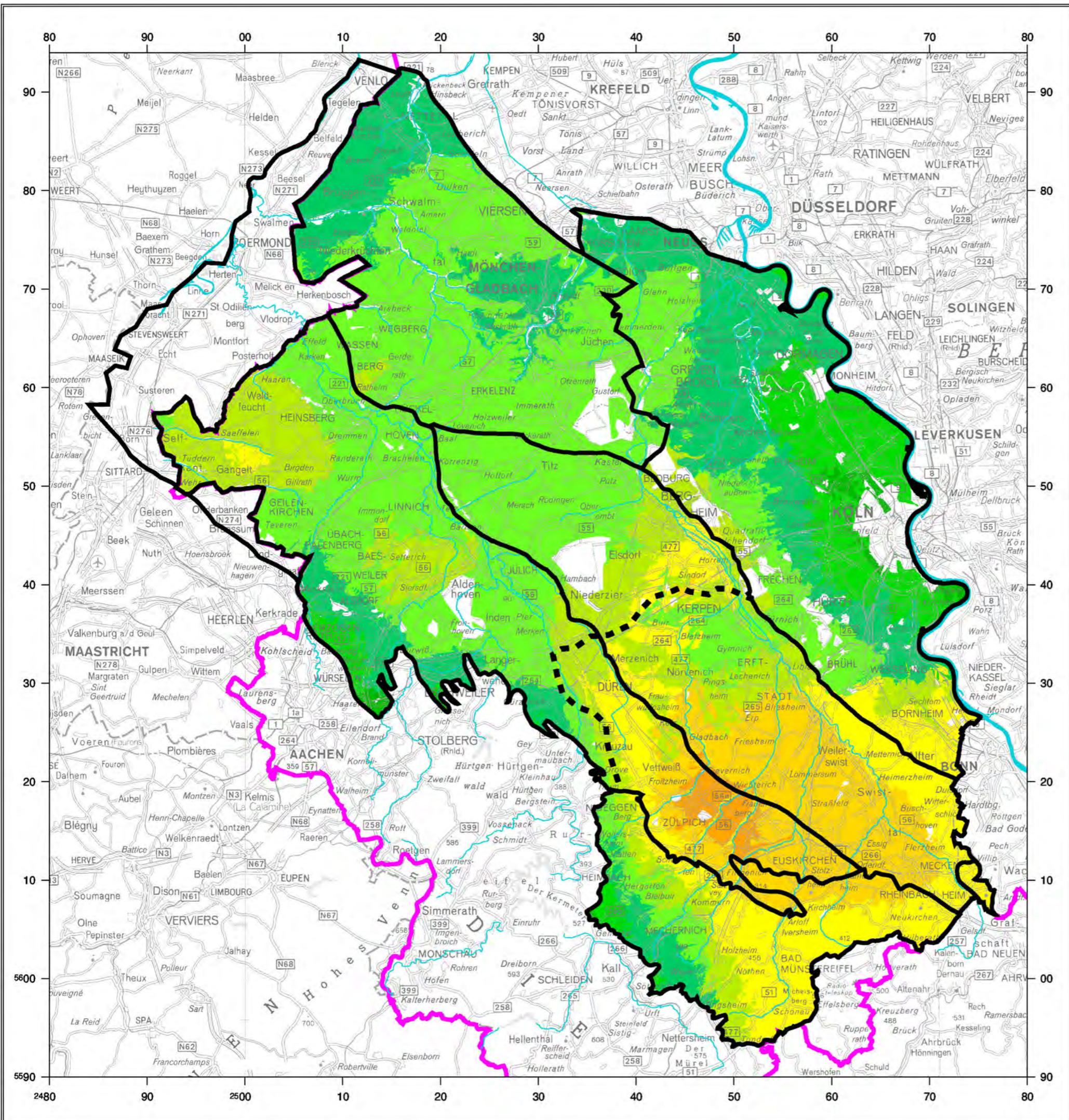
	0-3 °
	3-10 °
	10-30 °
	> 30 °

Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

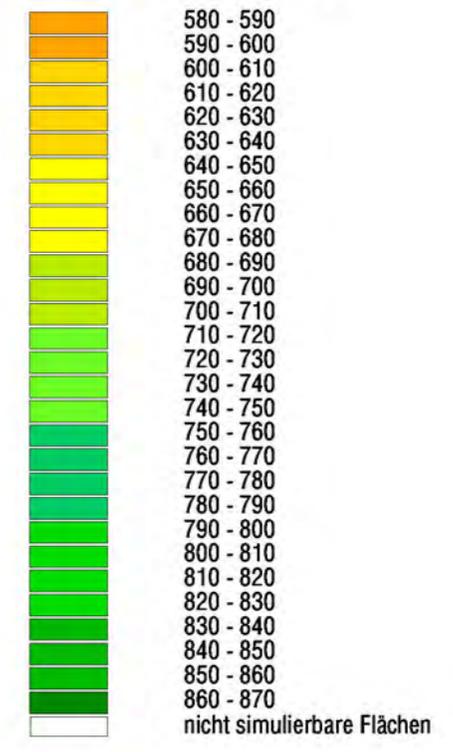
Hangneigungsklassen nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
im Tätigkeitsbereich des Erftverbands
und angrenzendem Teilgebiet in den Niederlanden

Anlage 7
06/2012



- Legende**
- Landesgrenze
 - Hydrogeologische Teilräume
 - Trennlinie zwischen Niederschlagsräumen

mittlere Jahresniederschlagshöhe nach KLIMA/GLADIS (GD NRW) (mm/a, 1961 - 2000, unkorrigiert)

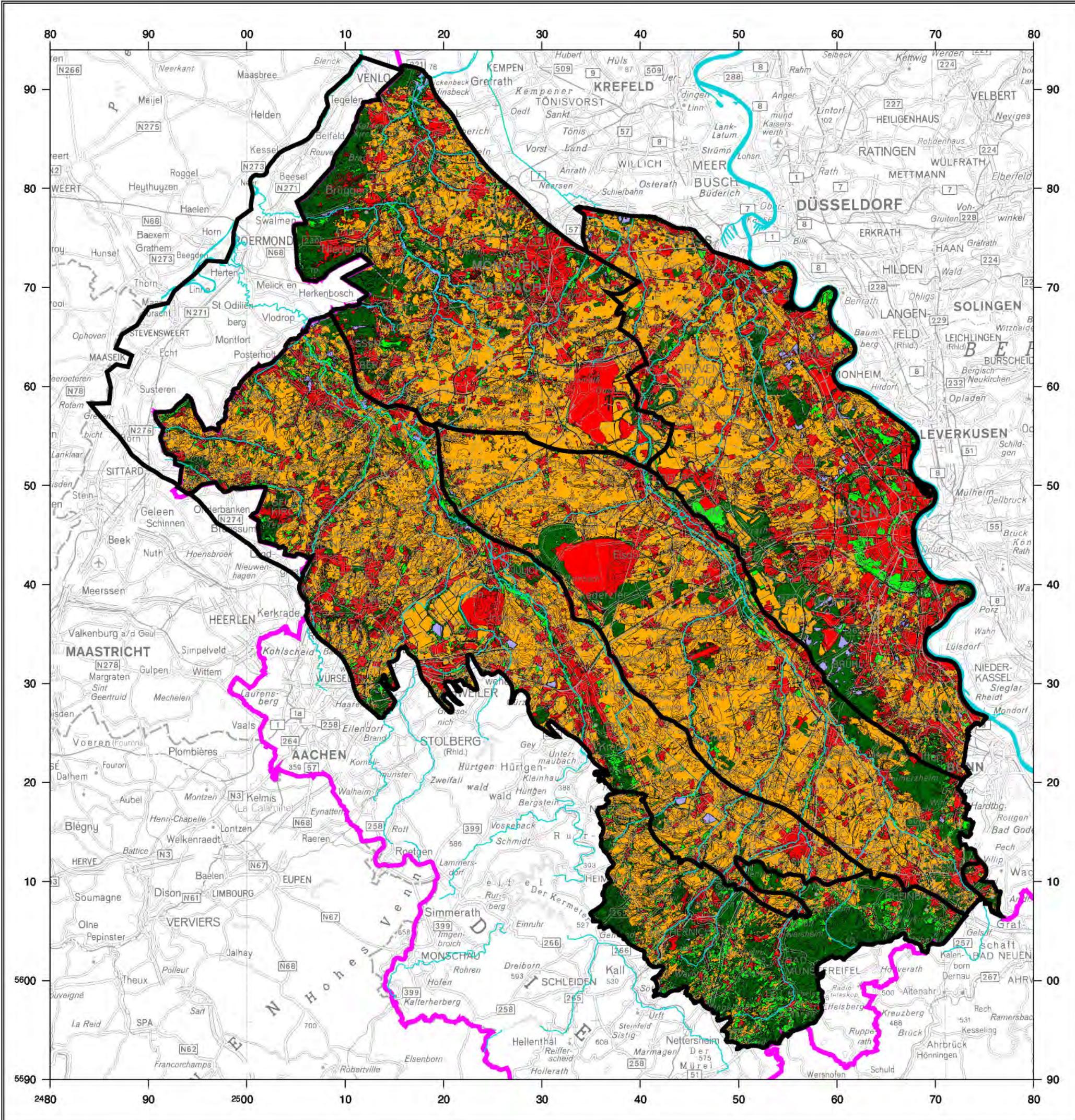


Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

Mittlere Jahresniederschlagshöhe
nach KLIMA/GLADIS (GD NRW)
im Tätigkeitsbereich des Erftverbands
(1961 - 2000, unkorrigiert)

Anlage 806/2012



Legende

- Landesgrenze
- Hydrogeologische Teilräume

Generalisierte Realnutzung nach KLIMA/GLADIS (GD NRW)

- Gewässer
- Acker
- Grünland
- Moore
- Wald
- Siedlungsflächen, anthropogen überprägte Flächen usw.



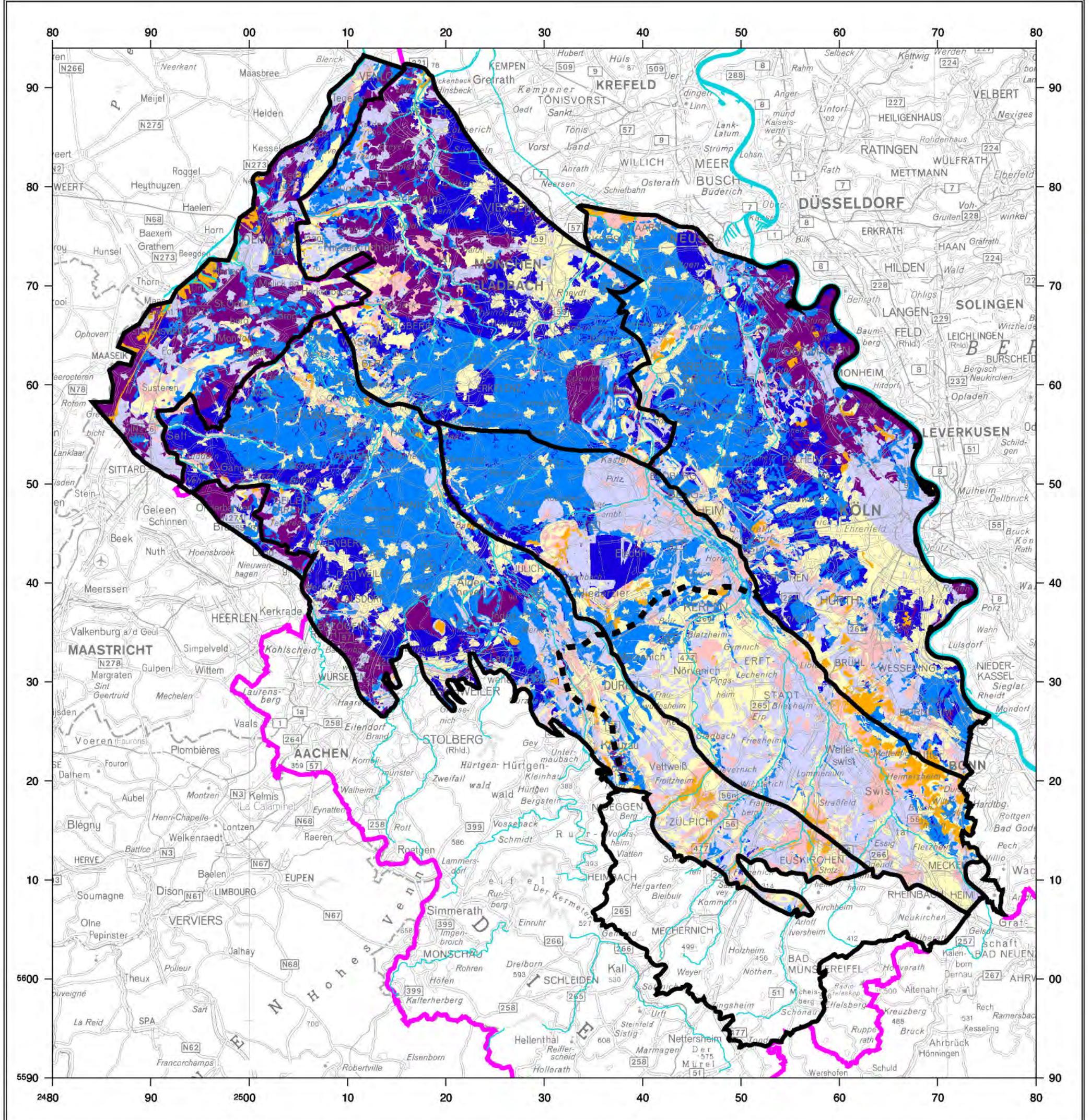
AG Grundwasserneubildung

Generalisierte Realnutzung
nach KLIMA/GLADIS (GD NRW)
im Tätigkeitsbereich des Erftverbands

Anlage 9
06/2012

Anlage 10: Vergleich der Berechnungsergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung für die hydrogeologischen Teilräume und Niederschlagsräume

Teilraum	Mittlere Grundwasserneubildung [$l/(s \cdot km^2)$] - Berechnungsverfahren				
	GROWA (EV+6%, BFI2006)	GROWA (DWD)	SCHRÖDER & WYRWICH (EV+1%)	KLIMA/GLADIS (GD_N+4%)	Basisplan III (EV, 1971-1990)
Erftscholle	5,2	5,5	4,8	5,2	5,3
Erftscholle_Nord	6,1	6,5	5,7	6,3	
Erftscholle_Süd	4,5	4,8	4,2	4,4	
Rurscholle	6,1	5,5	5,9	5,8	6,5
Rurscholle_Nord	6,6	5,8	6,5	6,3	
Rurscholle_Süd	4,6	4,6	4,0	4,3	
Venloer Scholle	7,3	6,9	6,7	6,0	7,2
Kölner Scholle	7,1	6,7	6,1	6,2	6,6
Eifel	2,1	3,0			3,2
Niederlande			7,0		



Legende

- Landesgrenze
- Hydrogeologische Teilräume
- Trennlinie zwischen Niederschlagsräumen

Mittlere Grundwasserneubildung nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: EV+1%

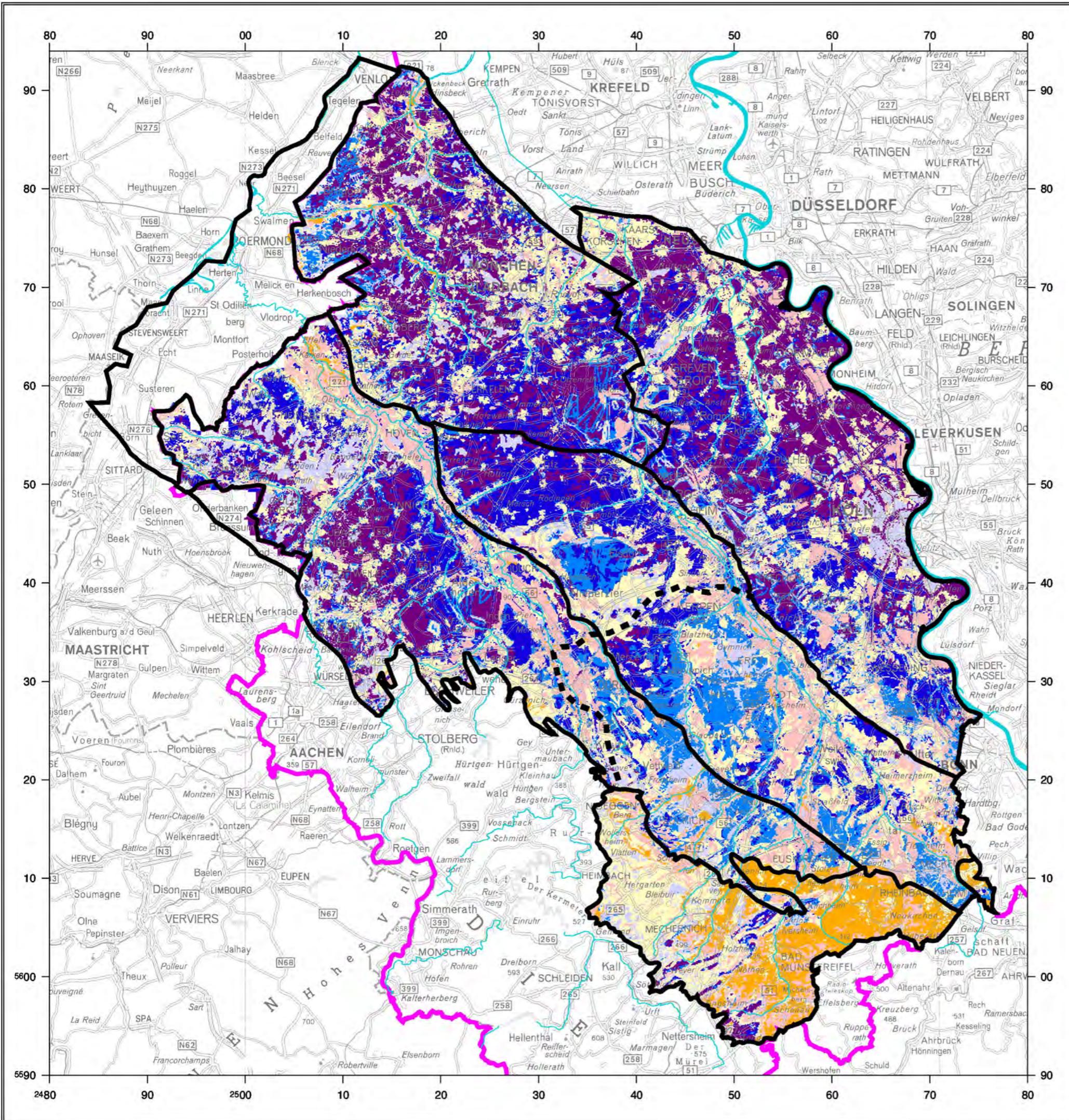
	< 1.5 l/(s*km ²)
	1.5 - 3
	3 - 4.5
	4.5 - 6
	6 - 7.5
	7.5 - 9
	> 9

Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

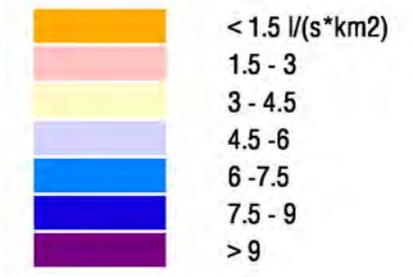
Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [l/(s*km²)]
für den Betrachtungsraum
nach SCHRÖDER & WYRWICH (1990)
Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: EV+1%

Anlage 11 06/2012



- Legende**
- Landesgrenze
 - Hydrogeologische Teilräume
 - Trennlinie zwischen Niederschlagsräumen

Mittlere Grundwasserneubildung für den Betrachtungsraum nach GROWA, Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: DWD

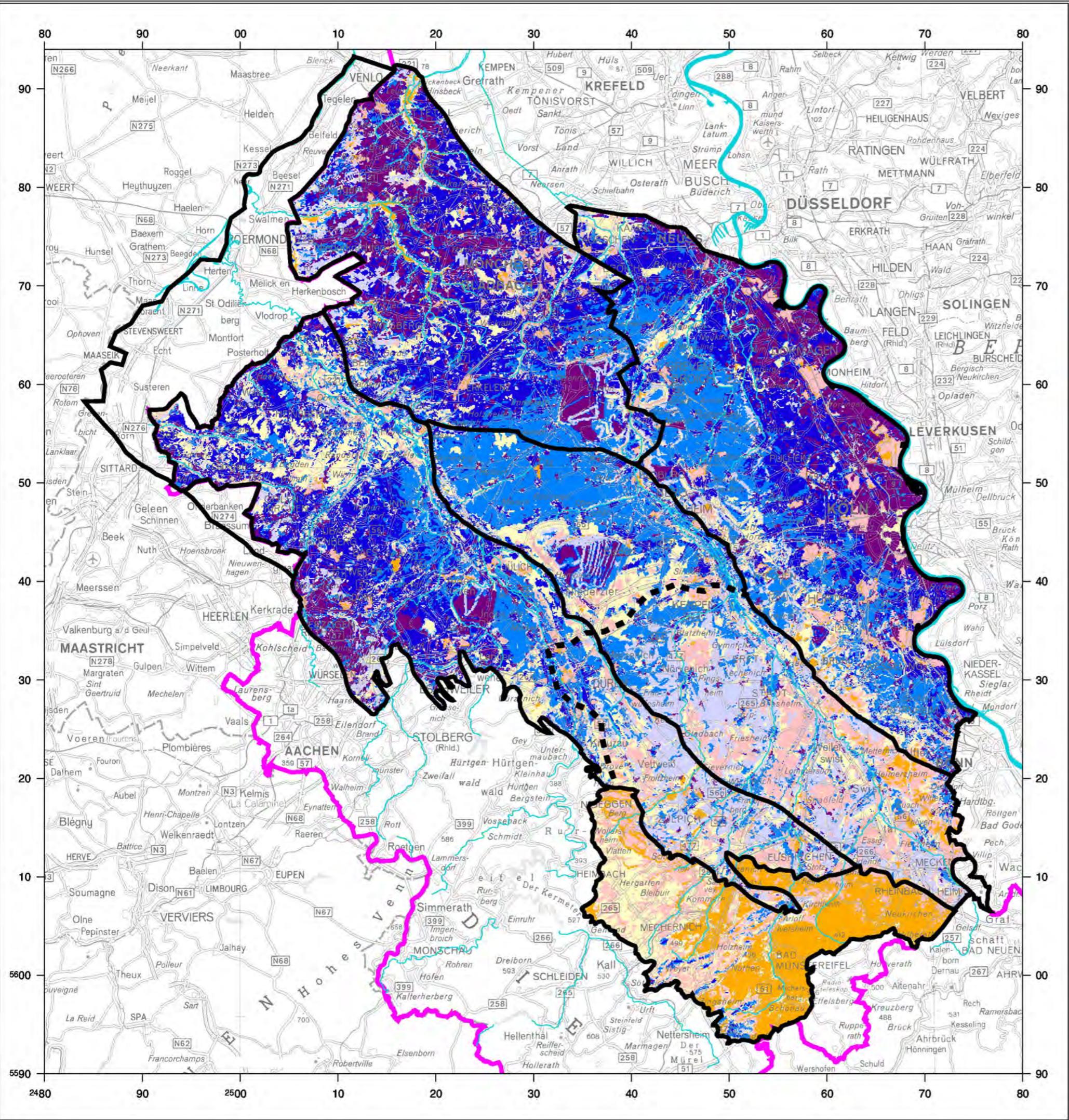


Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

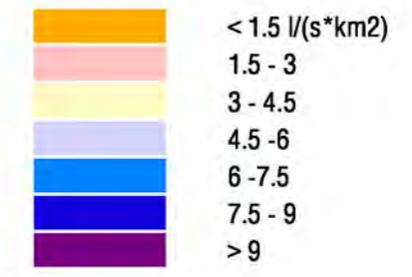
Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [l/(s*km²)]
für den Betrachtungsraum nach GROWA
Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: DWD

Anlage 1206/2012



- Legende**
- Landesgrenze
 - Hydrogeologische Teilräume
 - - -** Trennlinie zwischen Niederschlagsräumen

Mittlere Grundwasserneubildung für den Betrachtungsraum nach GROWA, Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: EV+6%, BFI2006

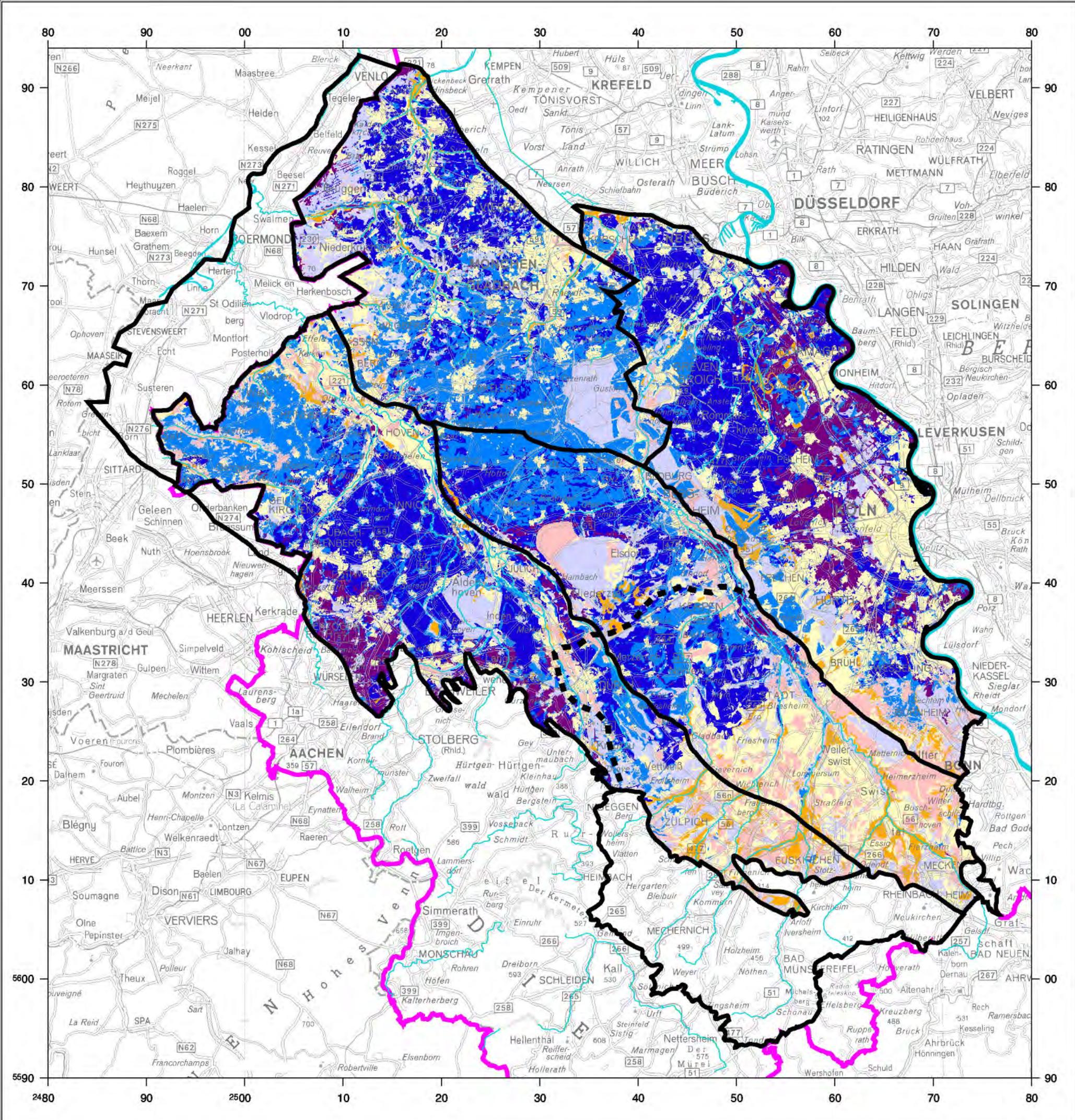


Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [l/(s*km²)]
für den Betrachtungsraum nach GROWA
Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: EV+6%, BFI2006

Anlage 13 06/2012



Legende

- Landesgrenze
- Hydrogeologische Teilräume
- - -** Trennlinie zwischen Niederschlagsräumen

Mittlere Grundwasserneubildung nach KLIMA/GLADIS (1990)
Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: GD_N+4%

	< 1.5 l/(s*km ²)
	1.5 - 3
	3 - 4.5
	4.5 - 6
	6 - 7.5
	7.5 - 9
	> 9

Erft Verband

AG Grundwasserneubildung

Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung [l/(s*km²)]
Betrachtungsraum nach KLIMA/GLADIS
Zeitraum: 1961 - 2000, Niederschlag: GD_N+4%

Anlage 14 06/2012